



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SROVNÁNÍ VLIVU DVOUHOTOVÉHO A HYDRAULICKÉHO BUFFERU NA ZPĚTNÝ RÁZ SAMONABÍJECÍ PUŠKY

COMPARISON OF THE EFFECT OF THE TWO-MASS AND HYDRAULIC BUFFERS ON THE IMPACT OF THE SELF-LOADING RIFLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Talanda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Jakub Talanda
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vančura, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Srovnání vlivu dvoumotového a hydraulického bufferu na zpětný ráz samonabíjecí pušky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velikost a průběh zpětného rázu při výstřelu je jeden z faktorů ovlivňující rychlost a přesnost střelby, což jsou hlavní kritéria úspěchu ve sportovní dynamické střelbě. Jednou z možností jak řídit velikost a průběh zpětného rázu je použití různých typů bufferů.

Na trhu existuje několik různých konstrukčních řešení u kterých však není objektivně znám jejich přímý vliv na kvalitu a komfort střelby.

Cíle bakalářské práce:

Kompletní popis funkce samonabíjecí pušky AR15.

Měření zpětného rázu pušky osazené různými typy bufferů.

Zpracování dat ve vhodném software.

Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

FAKTOR, Z. Střelné zbraně: Konstrukce a funkce. Praha: Magnet-Press, 1995. 230 s. ISBN 80-85847-46-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou vlivu dvouhmotového a hydraulického bufferu na zpětný ráz samonabíjecí pušky. Popisuje princip funkce samonabíjecí pušky typu AR-15 a obou zmíněných bufferů a analyzuje příčiny zpětného rázu samonabíjecích zbraní. Dále obsahuje krátký výčet poznatků zjištěných při již provedených studiích na téma vzájemného působení střelce a pušky. Praktická část práce se zabývá měřením silového působení mezi puškou a střelcem pomocí jednoosého siloměru a srovnáním zjištěných výsledků pro oba typy bufferů.

KLÍČOVÁ SLOVA

puška, samonabíjecí, útočná, AR-15, buffer, dvouhmotový, hydraulický, zpětný ráz

ABSTRACT

The focus of this thesis are the effects of dual-body and hydraulic recoil buffers on measured recoil of an AR-15 type self-loading rifle. The first part explains the working principles of the rifle and both mentioned buffer designs and points out the sources of the recoil effect. A brief summary of contemporary knowledge and already conducted research into the problem follows. The second part describes an experiment in which the recoil force was measured using a force sensor placed between the rifle butt and shooter's shoulder. At the end, outcomes of this research are discussed and results obtained for both buffer designs are compared.

KEYWORDS

rifle, automatic, self-loading, assault, AR-15, recoil, buffer, dual-body, two-mass, hydraulic

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TALANDA, J. *Srovnání vlivu dvoumotového a hydraulického bufferu na zpětný ráz samonabíjecí pušky*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117203>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 49 s. Vedoucí diplomové práce Jan Vančura



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Jakub Talanda

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci poděkovat především vedoucímu práce, panu Vančurovi, za jeho ochotu, vstřícnost a velké množství času, které mi byl ochoten věnovat a bez něhož by tato práce těžko mohla vzniknout. Dále bych rád vyjádřil díky své rodině a přátelům, kteří mě po celé tři roky podporovali ve studiu.

OBSAH

Úvod	9
1 Představení pušky V-AR	10
1.1 Funkce bufferu	12
2 Zpětný ráz jako dynamický děj	14
2.1 Vnější dynamický rozbor	14
2.2 Výstřel z palné zbraně	14
2.3 Funkční cyklus zbraně	16
2.4 Vnitřní dynamický rozbor	18
2.5 Energetická bilance systému	20
2.6 Silová bilance během cyklu zbraně	22
3 Způsoby měření zpětného rázu	25
3.1 Hallův pokus	25
3.2 Komplexní analýza Taraszewského a Ewertowského	26
3.3 Benzkoferova dynamická analýza	27
4 Zvolený způsob měření	28
4.1 Popis zvoleného způsobu	28
4.2 Postup měření a použité vybavení	30
4.3 Výsledky měření	31
4.4 Vyhodnocení měření	39
5 Alternativní způsoby zmírnění zpětného rázu	40
5.1 Pneumatický vratný mechanismus	40
5.2 Úst'ové brzdy a kompenzátory	41
5.3 Úprava geometrie zbraně	42
5.4 Použití jiného střeliva	42
5.5 Protizávaží	43
5.6 Jednodušší způsoby	43
Závěr	44
Použité informační zdroje	45
Seznam použitých zkratk a symbolů	47

ÚVOD

Při výstřelu z palné zbraně dochází k uvolnění velkého množství energie uložené v náboji. Jeho hlavním účelem je předání kinetické energie střele. Vedlejším důsledkem vystřelení projektilu a pohybu vnitřního mechanismu zbraně je vznik celé řady sil, takzvaného zpětného rázu, který způsobuje nežádoucí pohyb celé zbraně. Tento pohyb ztěžuje správné zamíření pro následující výstřely a má tedy negativní vliv na přesnost střelby v dávkách či po sobě rychle jdoucích jednotlivých ranách. Za účelem zvýšení přesnosti rychlé střelby automatických zbraní a zlepšení komfortu střelce je tedy vhodné tento zpětný ráz nějakým způsobem eliminovat nebo snížit.

Existuje více možností zmírnění zpětného rázu pušky a jedním z nich je instalace součásti zvané buffer. Cílem této práce je objektivně srovnat dva v dnešní době oblíbené typy bufferů, dvouhmotový a hydraulický, a posoudit jejich dopad na zpětný ráz zkoušené zbraně.

1 PŘEDSTAVENÍ PUŠKY V-AR



Obr. 1 Puška V-AR [5]

V-AR je samonabíjecí puška z nabídky českého výrobce Pavla Vosátky. Zbraň konstrukčně vychází z modelu AR-15, což je v současné době jedna z nejpoužívanějších platform útočných a samonabíjecích pušek [4].

Zbraň má mechanicky uzamčený otočný závorník, odemykaný tlakem plynů odebíraných při výstřelu z hlavně, který na nosič závorníku přenáší píst s krátkým rozsahem pohybu uložený nad hlavní [4]. Použitím pístového mechanismu se některé modely platformy AR-15 jako právě V-AR nebo Heckler & Koch MR556 liší od původní koncepce, ve které funkci pístu zastává nosič závorníku a plyn z hlavně je k němu přiváděn dlouhým kanálkem [7].

Určující vlastností samonabíjecích zbraní je, že po výstřelu jejich vnitřní mechanismus odstraní z nábojové komory prázdnou nábojnici a nabije nový náboj pro další výstřel. Součástí, která uzavírá zadní vstup do hlavně a nábojové komory a provádí tyto úkony, říkáme závěr. Tento model má z konstrukčních důvodů závěr dělený na dvě části – závorník a nosič závorníku. U zbraní s odběrem plynů je k hlavní připojena komůrka, plynový násadec, do kterého je při výstřelu odebráno malé množství plynů vzniklých při hoření střeliviny. Tlak těchto plynů prostřednictvím pístu odsune nosič závorníku, ten odemkne závorník a celá závěrová skupina se pohybuje dozadu. Při pohybu vzad dochází k vytažení a vyhození prázdné nábojnice, závěrová skupina se následně silou vratné pružiny pohybuje vpřed, nabíjí nový náboj a uzavírá jej v nábojové komoře. Systém je ilustrován na Obr. 2. Energetická a silová bilance celého systému musí být navržena tak, aby spolehlivě fungoval v proměnlivých podmínkách.

Puška používá ráži .223 Remington, široce rozšířenou mezi sportovními střelci i ozbrojenými složkami, pro svou dobrou přesnost, relativně nízký zpětný ráz [3] a ve vojenské modifikaci zvané 5.56 NATO i pro značný ranivý účinek na živý organismus [3].



Obr. 2 Princip funkce pušek typu AR-15 s pístovým systémem [7], upraveno

- 1 – náboj v nábojové komoře
- 2 – závorník
- 3 – nosič závorníku
- 4 – plynový násadec
- 5 – píst
- 6 – spoušťový a bicí mechanismus
- 7 – buffer
- 8 – vratná pružina



Obr. 3 Náboj .223 Remington výrobce MEN [16]

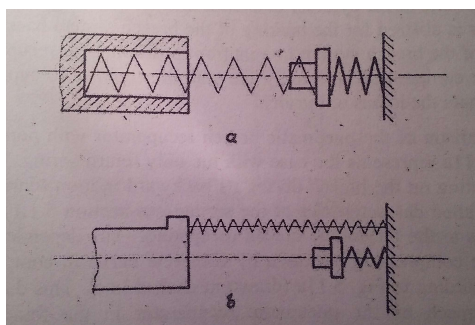
Vybraná technická data zbraně [5]:

Typ: puška samonabíjecí
 Ráže: .223 Remington
 Délka hlavně: 12.5"/317 mm
 Kapacita zásobníku: 10/20/30 nábojů
 Celková délka: 700/780 mm¹
 Hmotnost: 3,2 kg

¹ hodnoty pro minimální a maximální vysunutí délkově nastavitelné pažby

1.1 FUNKCE BUFFERU

Buffer je označení pro součást nacházející se mezi nosičem závorníku a vratnou pružinou, která se během výstřelu pohybuje spolu se závěrem. Závorník, nosič závorníku a buffer můžeme souhrnně označit pojmem závěrová skupina (angl. *bolt carrier group*). Buffer tedy přispívá svou hmotou k setrvačnosti závěrové skupiny (ZS) a je nositelem části její kinetické energie a hybnosti. Jeho použití má za cíl zabránit tvrdému nárazu ZS do pouzdra zbraně v případě úplného stlačení vratné pružiny, při kterém by došlo ke ztrátě energie a zpomalení cyklu [2]. V některých systémech je použito i druhé, pružiny (viz Obr. 4), nicméně typ AR-15 má standardně pružinu pouze jednu, jako na Obr. 2.

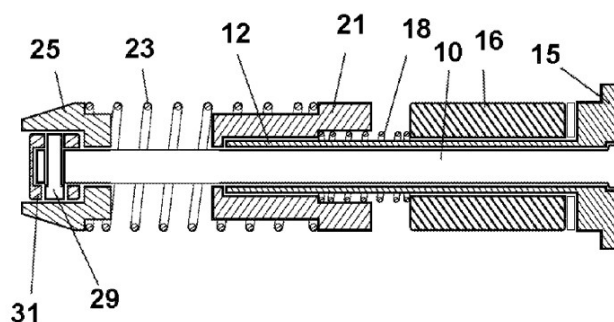


Obr. 4 Některé alternativy usprádaní závěru a bufferu [2]

Změnou mechanických parametrů jako je hmotnost bufferu nebo tuhost vratné pružiny můžeme tedy ovlivnit chování systému zbraně, jak je popsáno dále v kap. 2.4. Spolu s plynovým systémem jsou právě buffer a vratná pružina (jakožto relativně levné a snadno vyměnitelné komponenty) častým předmětem jak domácích, tak odborných úprav, s cílem dosáhnout vysoké spolehlivosti nebo přívětivého uživatelského chování [6].

1.1.1 DVOUHMOVÝ BUFFER

Dvouhmotový (a obecně vícehmotový) buffer sestává z více malých tělísek a pružin. V případě tvrdého nárazu bufferu na rám zbraně tedy narazí nejdříve nosné těleso, ostatní tělíska se setrvačně budou pohybovat dále a jejich pohyb ještě zpomalí pružina. Vícehmotový buffer tedy rozloží jeden velký náraz závěrové skupiny na několik menších a energii tohoto nárazu částečně absorbuje pružinami.



Obr. 5 Řez trojhmotovým bufferem [8]

2 ZPĚTNÝ RÁZ JAKO DYNAMICKÝ DĚJ

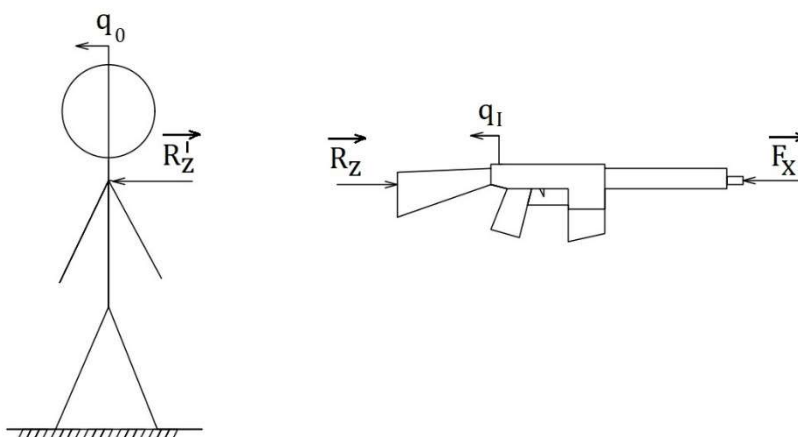
Zpětný ráz je soubor reaktivních sil působících na pušku během a po výstřelu. Cílem této kapitoly je rozlišit a popsat jednotlivé síly, které zpětný ráz způsobují, a posoudit, jak může tyto síly ovlivnit použití jednotlivých typů bufferů.

2.1 VNĚJŠÍ DYNAMICKÝ ROZBOR

Začněme rozbořem silového působení mezi puškou a střelcem. Na pušku v této chvíli pohlížíme jako na černou skříňku, tuhé těleso bez pohyblivých vnitřních částí, vliv jejichž pohybu na soustavu vyjádříme jako působení vnější síly. Tuto sílu zahrneme do obecné síly F_x , která je součtem všech sil způsobujících zpětný ráz a pohyb pušky vzad. Sem patří již zmíněný vliv funkce vnitřního mechanismu, reaktivní síla tlaku hořící střeliviny, která uvádí do pohybu střelu a dále tlaková síla od výšlehu prachových plynů na ústí hlavně. Síla F_x tedy z principu není časově konstantní, jak bude rozebráno dále. Experimentálně bylo prokázáno, že rovněž síla reakce R_z není časově konstantní [11],[12]. Pro pušku tedy stanovíme rovnici:

$$m_z \ddot{q}_I = F_x - R_z \quad (1)$$

Kdy m_z je celková hmotnost zbraně, q_I zobecněná souřadnice polohy rámu pušky a q_0 zobecněná souřadnice ramene střelce.



Obr. 9 Vnější dynamický rozbor problému

2.2 VÝSTŘEL Z PALNÉ ZBRANĚ

Pro pochopení okolností spojených se vznikem zpětného rázu se nyní podíváme na proces výstřelu z palné zbraně.

Při výstřelu dochází k uvolnění chemické energie střeliviny (též prachové náplně) a její následné přeměně na mechanickou energii střely a zbraně, ohřev celé soustavy a na energii prachových plynů vzniklých hořením. Mechanická účinnost procesu je cca 30% [1].

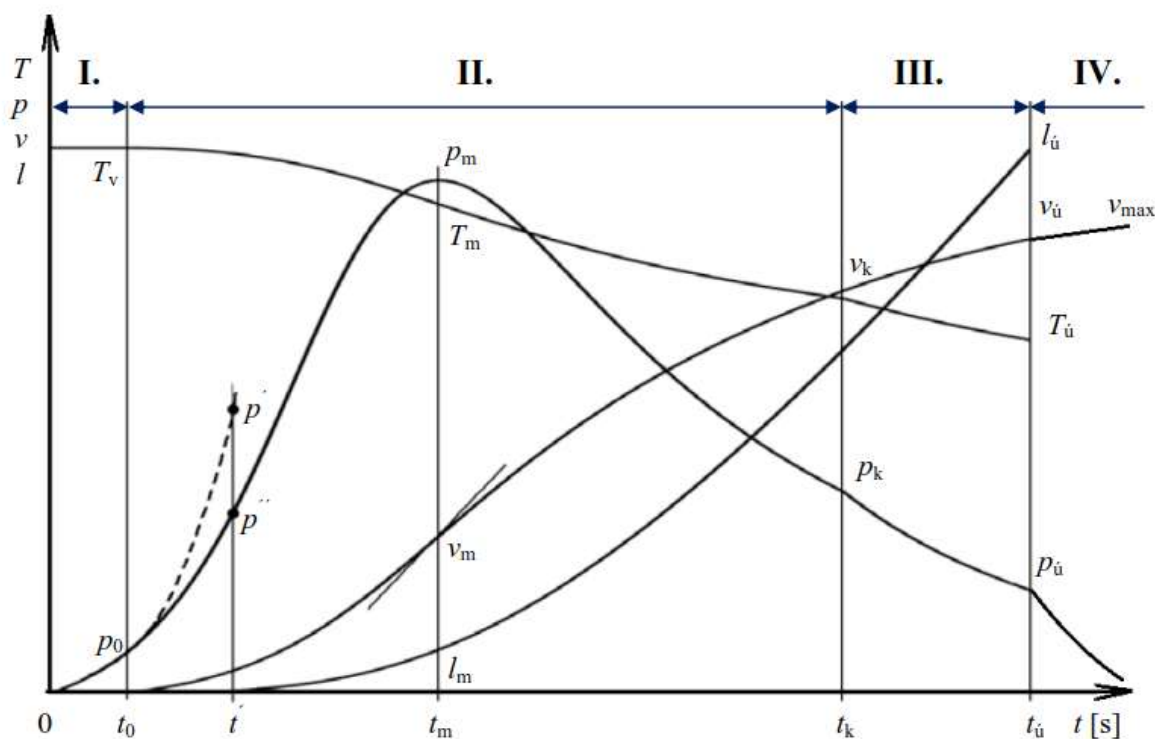
Výstřel můžeme rozdělit to těchto časových úseků[1]:

I. perioda – zápalka zažehne prachovou náplň, ta začíná hořet a roste tlak uvnitř nábojnice; střela se však ještě nezačala pohybovat

II. perioda – střela se začne tlakem prachových plynů pohybovat v okamžiku t_0 , tlak a objem plynu i rychlost střely rostou až do chvíle dosažení maxima tlaku (t_m), tlak poté klesá a v čase t_k dohoří střelivina úplně

III. perioda – prachová náplň již zcela dohořela, tlak plynů dále klesá, stále však urychluje střelu, úsek končí okamžikem, kdy střela opustí hlaveň (t_u)

IV. perioda – začíná opuštěním střely hlavně a končí ve chvíli (t_a , v obrázku není vyznačena), kdy se střela vzdálí natolik, že už prachové plyny, nyní volně unikající do prostoru, nemají další vliv na její rychlost. Typicky se tak stane ve vzdálenosti 20-40 ráží od ústí hlavně[1], poklesne na tlak cca 0,2 MPa[3]. Tuto fázi není vhodné podceňovat, neboť právě zde dosáhne střela nejvyšší rychlosti po celé své trajektorii a tlakové působení na ústí hlavně má nezanedbatelný silový vliv, jak bude rozebráno dále.



Obr. 10 Časová závislost vybraných veličin posuzovaných při výstřelu [1]

Obr. 10 popisuje časovou závislost tlaku p a teploty T plynů v hlavni, rychlosti v a dráhy l střely ve zmíněných čtyřech úsecích.

Na střelu tedy působí síla tlaková síla výstřelu F_D [3]:

$$F_D = S_D \cdot p_D \quad (2)$$

Kdy S_D je plocha zadní stěny (dna) střely a p_D okamžitý tlak prachových plynů. Od této síly však musíme odečíst třecí sílu mezi střelou a hlavní F_T [3]:

$$F_T = \nabla m_q \cdot \ddot{x} \quad (3)$$

Kdy m_q je hmotnost střely, \ddot{x} její okamžité zrychlení a ∇ balistický součinitel proporcionality, pro celoplášťové (FMJ) střely $\nabla = 0,03$.

Odečtením těchto složek získáme tedy sílu F_H , která svým působením udělí střele impuls I_q [3]:

$$I_q = \int_0^{t_d} F_H dt \quad (4)$$

Uplatňuje se zde 3. Newtonův pohybový zákon a zákon zachování hybnosti - síly působící na kulku a na zbraň se rovnají. Puška, respektive její všechny části v součtu, a střela (se zohledněním hmotnosti prachové náplně) tedy nabydou stejné hybnosti.

Můžeme tedy říci [3]:

$$W \cdot \left(m_z + \frac{1}{2} m_\omega \right) = (v - W) \cdot \left(m_q + \frac{1}{2} m_\omega \right) \quad (5)$$

Kdy W je rychlost pušky, v relativní rychlost střely vůči pušce, m_z hmotnost pušky a m_ω hmotnost střeliviny.

Ve čtvrté fázi výstřelu na pušku působí též tlak plynů opouštějících hlavěň, jehož vliv můžeme zahrnout do rovnice hybnosti [3]:

$$W_r = \frac{m_q + \beta m_\omega}{m_z} \cdot v_0 \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1275}{v_0} \quad (7)$$

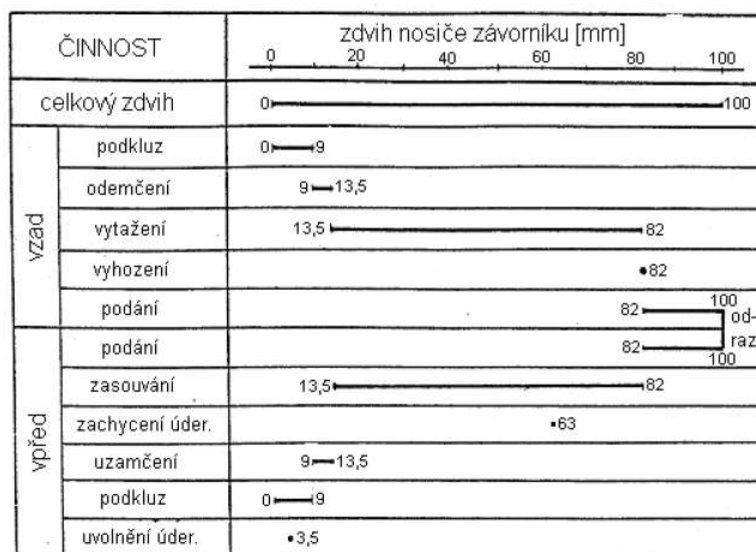
Kdy W_r je rychost pušky po započtení vlivu prachových plynů na ústí hlavěň, v_0 úst'ová rychlost střely a β součinitel suplementárního efektu prachových plynů.

Vztah (7) platí přibližně a pro běžné úst'ové rychlosti střel v rozsahu 600-900 m/s, kdy hodnota 1275 m/s je experimentálně zjištěná průměrná rychlost unikajících plynů [3]. Taky nesmíme zapomínat, že výše uvedená rovnice hybnosti pohlíží na zbraň jako na celistvé těleso bez pohyblivých vnitřních součástí, což pro naše použití není dostačující. Tímto problémem se budeme dále ve vnitřním dynamickém rozboru pušky.

2.3 FUNKČNÍ CYKLUS ZBRANĚ

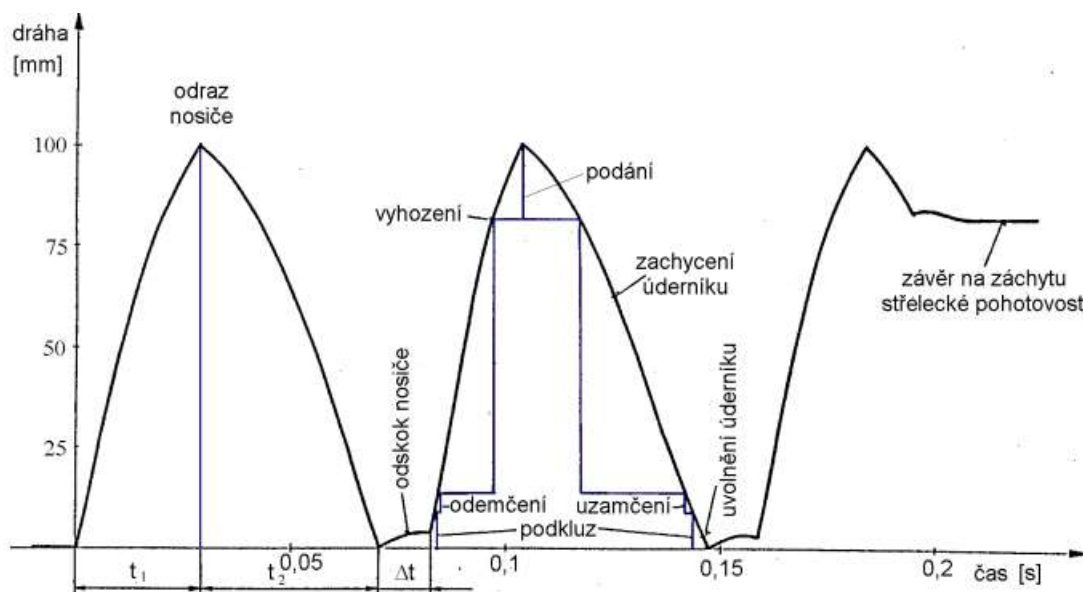
U samonabíjecí pušky dochází po každém výstřelu k nabití dalšího náboje automaticky využitím energie výstřelu. Tento proces nazýváme též funkční cyklus. Pro popis chování mechanismu během cyklu nám slouží tzv. cyklogram (též kinematicko-dynamický diagram).

Cyklogram ukazuje trvání jednotlivých procesů cyklu v závislosti na dráze (poloze) nosiče závorníku během jeho pohybu vpřed i vzad [1].



Obr. 11 Cyklogram automatické zbraně poháněné plyny odebíranými z hlavní [1]

Pokud cyklogram doplníme funkčním diagramem, který uvádí časovou závislost polohy nosiče závorníku, můžeme nyní určit též dobu trvání jednotlivých dějů cyklu². Díky tomu jsme schopni získat přesný časový přehled o dějích probíhajících během funkčního cyklu zbraně a tyto poznatky dále využít pro dynamický rozbor mechanismu.



Obr. 12 Funkční diagram automatické zbraně [1]

Cyklogram lze pro každou zbraň určit měřením, funkční diagram měřením nebo výpočtem [1].

² výraz podkluz označuje časový úsek, ve kterém se nosič závorníku již začal pohybovat, ale ještě nedošlo k odemčení závorníku

Funkční cyklus tedy probíhá v tomto sledu [1]:

1. Výstřel
2. Odemčení závorníku
3. Pohyb závěrové skupiny vzad, vytažení a vyhození nábojnice, napnutí bicího mechanismu, stlačení vratné pružiny
4. Odraz závěru v zadní poloze od rámu zbraně
5. Pohyb závěrové skupiny vpřed, podání a zasunutí nového náboje
6. Doraz a uzamčení závorníku v přední poloze

2.4 VNITŘNÍ DYNAMICKÝ ROZBOR

Obr. 13 popisuje uspořádání vnitřních dílů pušky, podle něhož byl vnitřní dynamický rozbor sestaven.



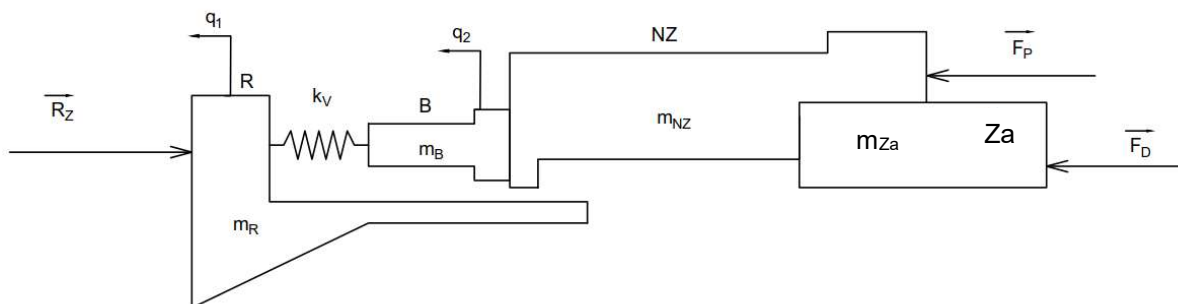
Obr. 13 Vnitřní součásti pušky V-AR

Součásti na obrázku jsou:

1. Horní část rámu
2. Spodní část rámu
3. Závorník Za
4. Nosič závorníku NZ
5. Dvouhmotový buffer B
6. Hydraulický buffer B
7. Vratná pružina k_v
8. Šachta zásobníku
9. Vodicí trubka závěrové skupiny a vratné pružiny (*buffer tube*)
10. Pažba
11. Kladivo

Obě části rámu, trubka a pažba jsou při střelbě nepohyblivě spojeny dohromady, a proto je dále uvažujeme jako jedno těleso, rám R .

Odpovídající dynamický rozbor sestavy je vyobrazen na Obr. 14. V soustavě působí časově proměnlivé vnější síly, a to F_D – tlaková síla hořící střeliviny v hlavni, F_p – tlaková síla na píst v plynovém kanálku odemykající závěr a R_z – reaktivní síla vyjadřující setrvačnost a odpor těla střelce, které působí proti pohybu pušky. Hmoty bufferu B , nosiče závorníku NZ a závorníku Za se chovají jako jedno tuhé těleso, mezi rámem zbraně R a závěrovou skupinou je vratná pružina o tuhosti k_v a rám uvažujeme jako pohyblivé těleso. Do úvahy není zahrnut vliv bicího mechanismu (kladivo), podávací ústrojí (zásobník s náboji) a síly působící mechanické ztráty (např. síly třecí).



Obr. 14 Vnitřní dynamický rozbor problému

Obrázku odpovídají tyto dvě rovnice:

$$m_R \cdot \ddot{q}_I = k_v \cdot (q_{II} - q_I) - R_z \quad (8)$$

$$(m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot \ddot{q}_{II} = F_D + F_p - k_v \cdot (q_{II} - q_I) \quad (9)$$

Velikost síly R_z předem neznáme a při měření se ji pokusíme určit, pro sílu F_D platí rovnice (2) a pro sílu F_p můžeme říci [2]:

$$F_p = S_p \cdot (p_p - p_{at}) \quad (10)$$

Kdy S_p je plocha čela pístu, p_p tlak v plynovém válci a p_{at} atmosférický tlak

Okamžitý tlak v hlavni a v plynovém válci jsou dvě rozdílné veličiny a jejich proměnlivá výše je důsledek toku plynu z hlavně do válce a následně zpět [2]. Část plynu ze systému unikne skrze netěsnost mezi pístem a válcem, což může být v některých případech záměr [2].

Síla R_z bude v čase přítomná stále, síla F_D vymizí s poklesem tlaku v hlavni a F_p bude působit do okamžiku oddělení pohybu pístu a nosiče závorníku. Dokud bude závorník uzamčený, dodá síla F_D celé sestavě impuls I_1 , po jeho odemčení síly F_D a F_p udělí závěrové skupině impuls I_2 a ta se bude poté pohybovat vzad, stlačovat vratnou pružinu a předávat svou hybnost rámu.

Stanovíme tedy rovnice:

$$I_1 = (m_R + m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot \dot{q}_I = \int_{t_0}^{t_{od}} F_D dt \quad (11)$$

$$I_2 = (m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot (\dot{q}_{II} - \dot{q}_I) = \int_{t_{od}}^{t_{ú}} F_D + F_p - k_v \cdot (q_{II} - q_I) dt \quad (12)$$

Kdy t_{od} budiž okamžik odemčení závorníku.

Rovnice (11,12) můžeme dosadit do rovnice (6):

$$W_r \cdot m_z = (m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot \dot{q}_{II} + m_R \cdot \dot{q}_I = I_1 + I_2 = (m_q + \beta m_\omega) \cdot v_{\dot{u}} \quad (13)$$

Je vhodné mít na paměti, že $W_R \neq \dot{q}_I$.

V této kapitole jsme pohlíželi na problematiku z hlediska zákona zachování hybnosti. V následující kapitole se na ni podíváme optikou zákona zachování energie. Analogie pro dvouhmotový a hydraulický buffer bude rozebrána rovněž tam.

2.5 ENERGETICKÁ BILANCE SYSTÉMU

Když je závěrová skupina uvedena do pohybu, je jí udělena určitá kinetická energie. Jak závěr stlačuje vratnou pružinu, mění se jeho pohybová energie na energii pružiny. Pakliže pružina zastaví pohyb ZS dříve, než narazí do rámu, absorbuje celou její energii (mínus drobné ztráty a kinetická energie, kterou mechanismus předá pohybujícímu se rámu pušky a střelci), skrze kterou následně závěr uvede do pohybu vpřed. Celý pohyb je plynulý a na rám pušky tedy působí nepříliš velká síla stlačené pružiny.

Pokud pružina pohyb ZS sama o sobě zastavit nedokáže, nastane tvrdý náraz a mezi ZS a rámem dojde k velice rychlému předání hybnosti a prudké změně jejich rychlosti. Je zde tedy přítomno vysoké zrychlení a jemu odpovídající vysoká síla. Kdybychom pro zjednodušení uvažovali ZS jako tuhé těleso a rám zbraně jako prostou pružinu popsanou její tuhostí, pak pro maximální sílu při nárazu můžeme odvodit vztah:

$$F_{Emax} = \sqrt{2 \cdot E_{ZS} \cdot k_R} = (\dot{q}_{II} - \dot{q}_I) \cdot \sqrt{(m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot k_R} \quad (14)$$

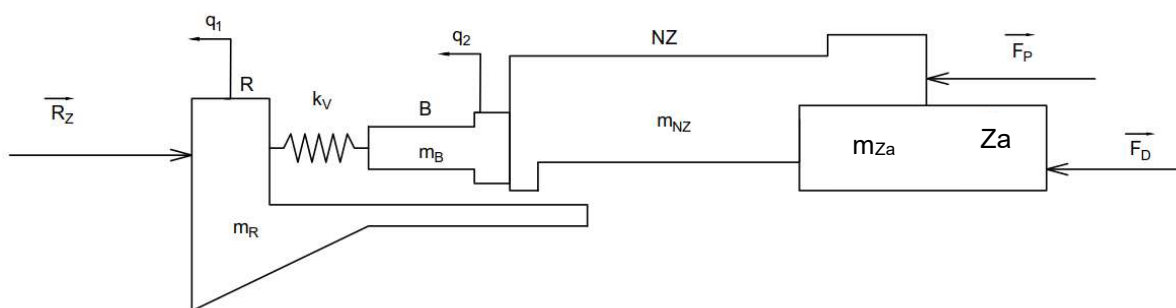
Kde F_{Emax} je maximum síly F_E působící při nárazu, E_{ZS} kinetická energie závěrové skupiny a k_R mechanická tuhost rámu zbraně, která vychází z modulu pružnosti materiálu a geometrie rámu.

Tato rovnice pochopitelně není přesná, neboť zanedbává deformaci bufferu a pohyb rámu, nicméně z ní logicky vyplývá, že pokud chceme omezit sílu tohoto nárazu, je vhodné rychlost a energii pohybující se závěrové skupiny před nárazem minimalizovat.

Zabránit tomuto nárazu je právě úkolem bufferu [2].

2.5.1 ZÁKON ZACHOVÁNÍ ENERGIE PRO JEDNODUCHÝ BUFFER

Běžný buffer pro pušky AR-15 se chová jako přídavné závaží, které pohlcuje kinetickou energii zvýšenou hmotností. Platí zde i již zmíněný zákon zachování hybnosti, a pakliže je závislost hybnosti na rychlosti lineární a kinetické energie kvadratická, bude mít těžší buffer při stejné hybnosti nižší kinetickou energii.



Obr. 15 Dynamická sestava pro běžný buffer

Zákon zachování energie (ZZE) pro systém s jednoduchým bufferem můžeme vyjádřit takto:

$$E_{ZS} + E_R = E'_{ZS} + E'_R + E_{kv} + R_E \quad (15)$$

$$E_{ZS} = \frac{1}{2} \cdot (m_{Za} + m_{NZ} + m_B) \cdot \dot{q}_{II}^2 \quad (16)$$

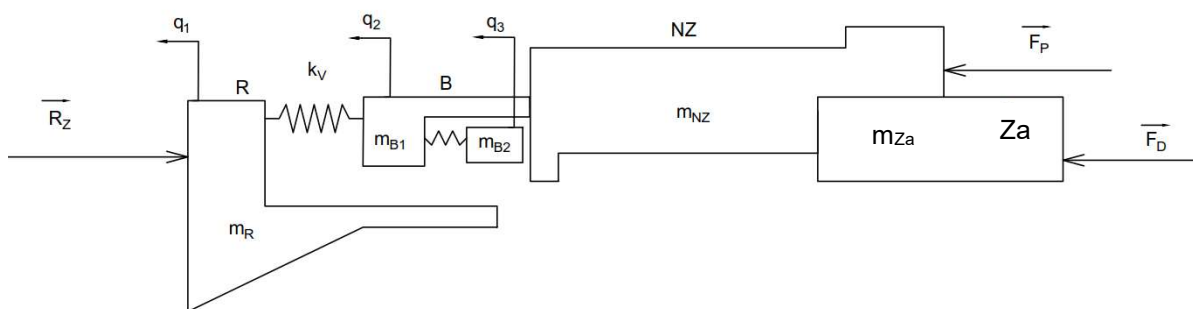
$$E_R = \frac{1}{2} \cdot m_R \cdot \dot{q}_I^2 \quad (17)$$

$$\dot{q}_{II}' = \dot{q}_I' \quad (18)$$

$$E_{kv} = \frac{1}{2} \cdot k_v \cdot (q_{II} - q_I)^2 \quad (19)$$

Kde E_{ZS} je kinetická energie závěrové skupiny, E_R kinetická energie rámu, E_{kv} potenciální energie vratné pružiny a R zbývající (ztrátová) energie nárazu. Veličiny označené čárkou odpovídají stavu po srážce.

2.5.2 ZÁKON ZACHOVÁNÍ ENERGIE PRO DVOUHNOTOVÝ BUFFER



Obr. 16 Dynamická sestava pro dvouhmotový buffer

Vícehmotový buffer může část pohybové energie ZS přeměnit na potenciální energii stlačených pružin bufferu. Pro soustavu s ním lze ZZE popsat rovnicemi (20-23):

$$E_{ZS} + E_R = E'_{ZS} + E'_R + E_{kv} + E_{kB} + R_E \quad (20)$$

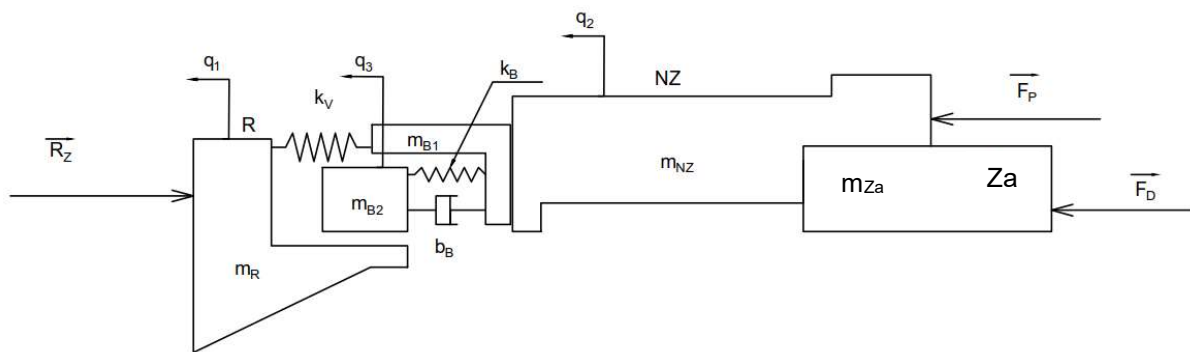
$$E_{ZS} = \frac{1}{2} \cdot [(m_{Za} + m_{NZ} + m_{B1} + m_{B2}) \cdot \dot{q}_{II}]^2 \quad (21)$$

$$\dot{q}_{II} = \dot{q}'_I = \dot{q}'_{III} \quad (22)$$

$$E_{kB} = \frac{1}{2} \cdot k_B \cdot (q_{III} - q_{II})^2 \quad (23)$$

Kde E_{kB} je potenciální energie pružiny bufferu.

2.5.3 ZÁKON ZACHOVÁNÍ ENERGIE PRO SOUSTAVU S HYDRAULICKÝM BUFFEREM



Obr. 17 Dynamická sestava pro hydraulický buffer

Hydraulický buffer přemění část kinetické energie ZS na disipační energii v tlumiči (a též energii stlačené vnitřní pružiny). ZZE má pro tento případ obdobný tvar jako pro dvoumotový buffer, s drobnými odlišnostmi:

$$E_{ZS} + E_R = E'_{ZS} + E'_R + E_{kv} + E_{kB} + E_{dB} + E_R \quad (24)$$

$$E_{dB} = \frac{1}{2} \cdot b_B \cdot [(q_{II} - q_I) - (q'_{II} - q'_{I})]^2 \quad (25)$$

Kde E_{dB} je disipační energie tlumiče.

2.6 SILOVÁ BILANCE BĚHEM CYKLU ZBRANĚ

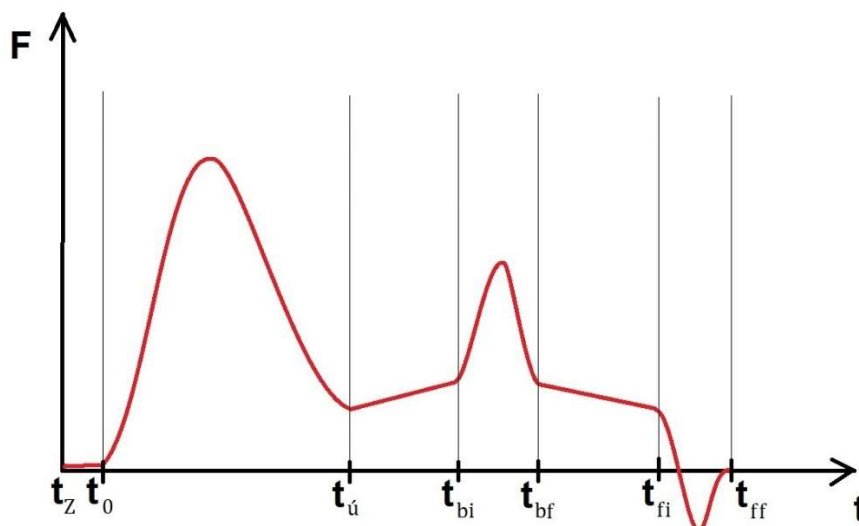
Nyní jsme tedy schopni popsat očekávaný časový průběh síly od výstřelu F_X , uvedené v kap. 3.1:

$$F_X \approx F_D = p_D \cdot S_D \quad \text{pro } t \in (t_0; t_u) \quad (26)$$

$$F_X \approx k_v \cdot (q_{II} - q_I) \quad \text{pro } t \in (t_u; t_{bi}) \cup (t_{bf}; t_{fi}) \quad (27)$$

$$F_X \approx k_v \cdot (q_{II} - q_I) + F_E \quad \text{pro } t \in (t_{bi}; t_{bf}) \quad (28)$$

$$F_X \approx k_v \cdot (q_{II} - q_I) - F_E \quad \text{pro } t \in (t_{fi}; t_{ff}) \quad (29)$$

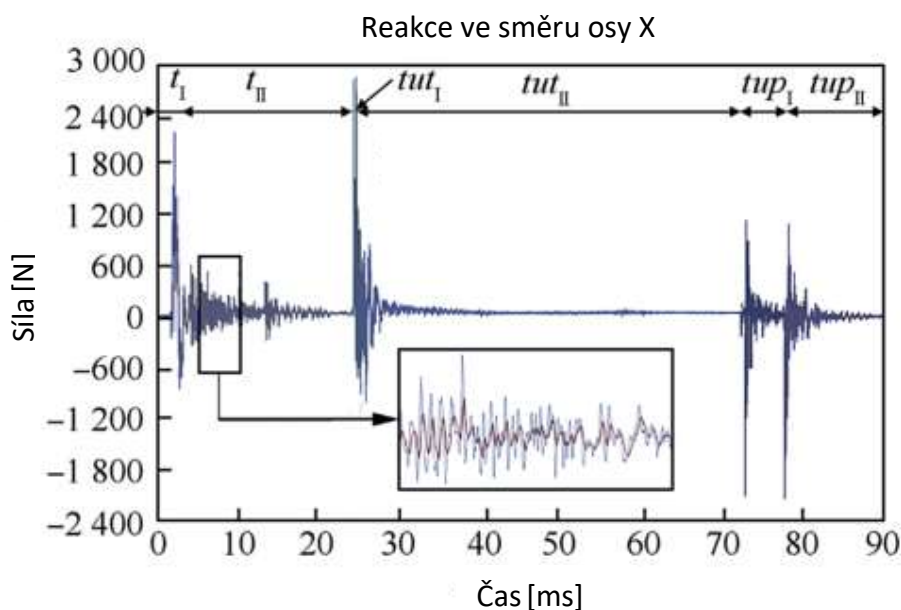


Obr. 18 Předpokládaný časový průběh síly F_X

Kdy v intervalu $(t_0; t_u)$ v hlavní hoří střelivina a urychluje střelu, v intervalu $(t_u; t_{bi})$ se závěrová skupina pohybuje vzad a stlačuje vratnou pružinu a v intervalu $(t_{bf}; t_{fi})$ se ZS pohybuje vpřed a vratnou pružinu uvolňuje. Interval $(t_{bi}; t_{bf})$ odpovídá období nárazu ZS v zadní poloze a interval $(t_{fi}; t_{ff})$ úseku nárazu ZS v přední poloze. Čas t_z odpovídá okamžiku iniciace zápalky.

Síla F_X ovšem není primárním bodem našeho zájmu. Působí totiž na zbraň, nikoli na střelce (Obr. 9), na kterého působí síla R_Z . Experimentálně změřit přímo hodnotu síly F_X by navíc bylo z technického hlediska poněkud složité a s velkou pravděpodobností by si tento úkol vyžádal zásah do konstrukce pušky. Naopak změřit sílu R_Z je relativně snadné, jak bude popsáno v kap. 3 a 4.1.

Námi teoreticky předpovězený průběh můžeme porovnat s experimentálním měřením síly podobné R_Z senzory v pažbě pušky, provedeném v pokusu [12] popsaném v kap. 3.2:



Obr. 19 Zjištěný průběh síly zpětného rázu v pokusu [12], upraveno

Jistá podobnost mezi oběma grafy je patrná – je zde vidět několik krátkých a výrazných impulsů. Pakliže zákon zachování hybnosti platí, můžeme očekávat, že se jedná o reakce na jednotlivé impulsy od síly F_x , pochopitelně s jistým zpožděním a zkreslené, v důsledku setrvačnosti, tuhosti a tlumení zbraně a jejich součástí, jakož i ramene střelce.

Ostatně sám autor zmíněného výzkumu přisuzuje jednotlivým impulzům následující významy[12]:

- Síla, jejímž zdrojem je hoření prachových plynů, v oblastech t_I a t_{II}
- Náraz závěrové skupiny v zadní poloze v oblastech t_{uI} a t_{uII}
- Náraz závěrové skupiny v přední poloze v oblastech t_{upI} a t_{upII}

Autor experimentu ještě každý časový úsek rozděluje na dvě části, jak lze vidět na Obr. 19.

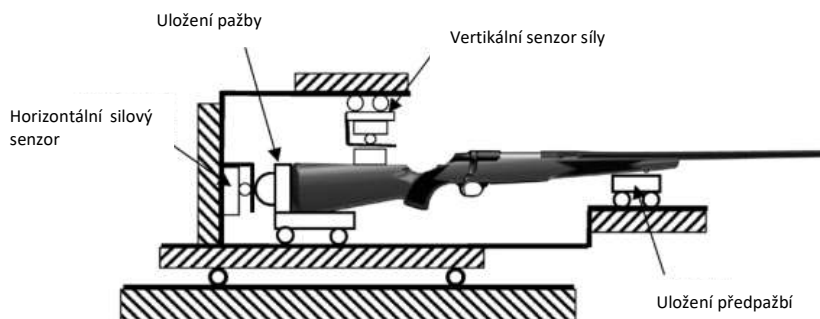
Tento předpoklad je ovšem nutno ověřit měřením nebo simulací. Celý problém by zajisté bylo možné vymodelovat metodou konečných prvků, simulace by ovšem byla bezesporu velmi složitá, navíc spoustu vstupních hodnot by bylo obtížné určit nebo změřit a tento výzkum by sám o sobě vydal na celou další bakalářskou práci. V rámci této práce bude tedy zjištění požadovaných výsledků dosaženo měřením.

3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

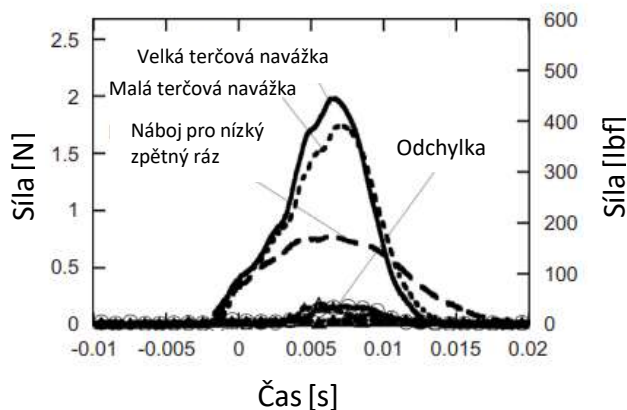
Existuje více způsobů, jak popsat a změřit zpětný ráz palné zbraně, ačkoli není známo, že by některý postup, ba ani měřený parametr, byl všeobecně uznán jako univerzálně platný [11]. Jelikož se jedná o úlohu z oblasti dynamiky těles, můžeme u pozorované soustavy sledovat buďto polohu těles v závislosti na čase (a tedy i rychlost a zrychlení) nebo jejich vzájemné silové působení, případně vypočítat jednu veličinu pomocí druhé. Určujícími veličinami mohou být celková dráha pohybu zbraně, maximální vzájemná síla působící mezi zbraní a střelcem, energie zbraně předaná střelci a jiné. Uvedme si pár příkladů již zdokumentovaných experimentů na toto téma:

3.1 HALLŮV POKUS

Matthew J. Hall z Texaské univerzity sestrojil přípravek, jehož cílem je porovnat a kvantifikovat míru pocíteného zpětného rázu pro různé modely brokovnic při použití různého střeliva, geometrie pažbení, hmotnosti zbraně a jiných přímo ovlivnitelných parametrů. Hallův experiment je založen na měření časového průběhu síly, kterou puška působí na přípravek, pomocí elektronických siloměrů. Zařízení samotné je voziček, který má svým chováním simulovat chování těla střelce (konkrétně setrvačnost trupu a tuhost ramene), neboť právě mechanický odpor uložení zbraně má velký vliv na vzájemné silové působení mezi zbraní a střelcem [11]. Experiment se zaměřuje hlavně na oblast výstřelu samotného, vliv pohybu závěru zmiňuje pouze okrajově.



Obr. 20 Přípravek použitý k měření sil při zpětném rázu [11], přeloženo

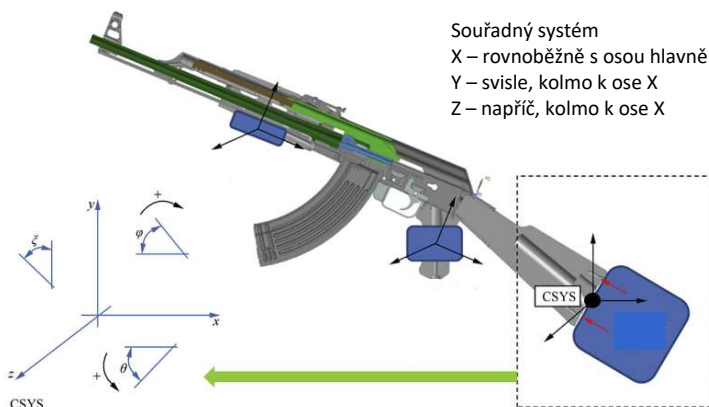


Obr. 21 Časový průběh síly naměřený při tomto pokusu s různými typy střeliva [11], přeloženo

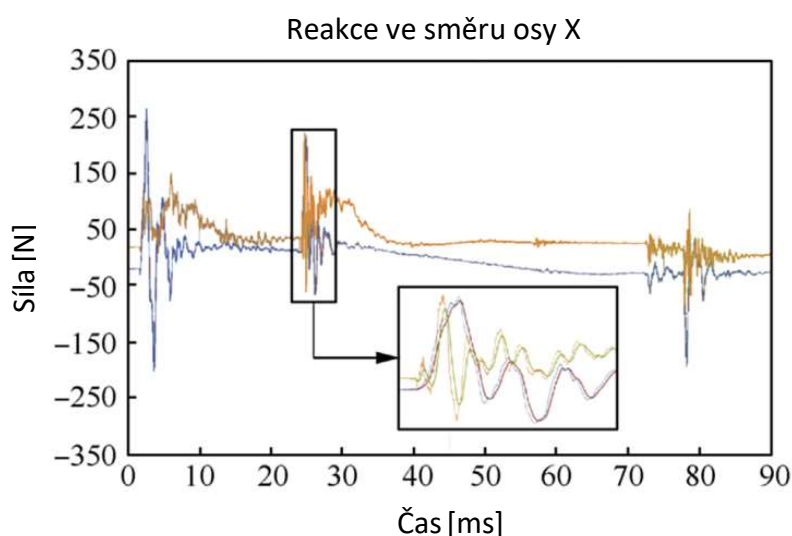
3.2 KOMPLEXNÍ ANALÝZA TARASZEWSKÉHO A EWERTOWSKÉHO

V tomto výzkumu [12] si Michał Taraszewski, M.ScEng, a Janusz Ewertowski, PhD., D.ScEng z Varšavské technické univerzity dali za cíl provést komplexní analýzu silového působení mezi puškou a střelcem. Do všech míst úchopu pušky AKM, tj. do pažby, pistolové rukojeti a předpažbí umístili siloměry a změřili složky sil ve třech na sebe kolmých osách. Pomocí laserů připevněných ke zbrani a vysokorychlostní kamery snímali též pohyb pušky. Autoři zde poukazují na nedostatky předchozích výzkumů, zanedbávajících silové působení skrze pistolovou rukojeť a předpažbí a v jiných směrech, než rovnoběžně s osou hlavně (pro ilustraci, směrem vzad/vpřed dosahuje nejvyšší síla naměřená u pažby hodnoty přes 2kN, ve svislém směru v součtu 225N u pistolové rukojeti a předpažbí). Během měření se jim též podařilo rozlišit jednotlivé časové úseky děje zpětného rázu u samonabíjecí pušky, zmiňované v kap. 3.6, a to:

- Oblast působení tlaku plynů při výstřelu
- Oblast pohybu závěrového mechanismu vzad
- Oblast pohybu závěrového mechanismu vpřed



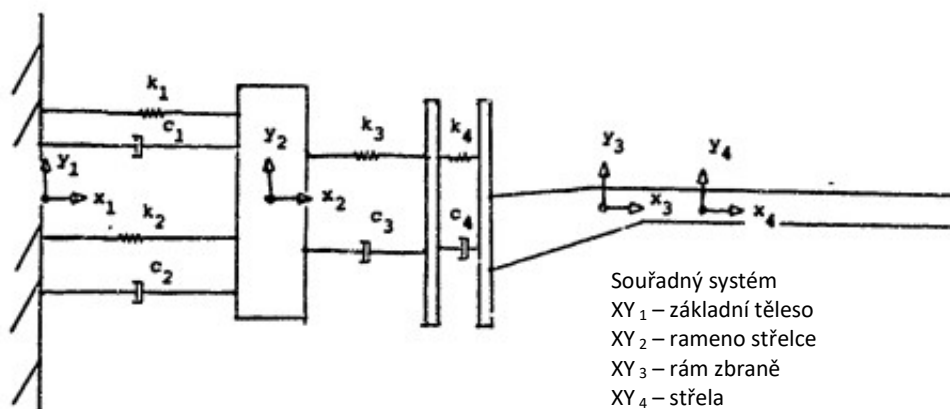
Obr. 22 Body umístění siloměrů a osy měření v pokusu [12], upraveno



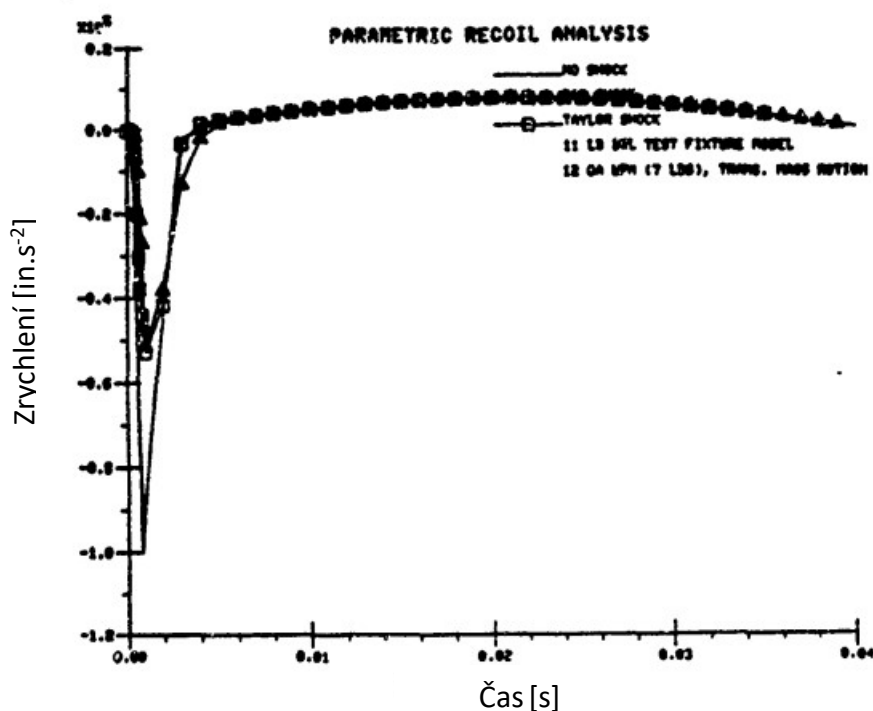
Obr. 23 Časový průběh síly naměřené senzory v předpažbí (hnědá) a pistolové rukojeti (modrá) [12], upraveno

3.3 BENZKOFEROVA DYNAMICKÁ ANALÝZA

Philip D. Benzkofer, M.S. v rámci svého výzkumu pro armádu USA vytvořil přípravek pro měření zpětného rázu pěchotních zbraní a k němu odpovídající počítačový model. Ke konstrukci použil dynamické prvky jako pružiny, nelineární tlumiče a hmotná tělesa. Model shledává celkem zdařilým, ačkoli připouští jisté nepřesnosti. Jeho model popisuje kinematické parametry - polohu, rychlost a zrychlení zbraně a ramene v modelu simulujícím chování lidského těla [13]. Jako referenční byla vybrána brokovnice ráže 12. Na Obr. 25 je vidět prudké zrychlení a následné zpomalení ramene střelce v krátkém intervalu v důsledku impulsu od výstřelu.



Obr. 24 Matematicko – fyzikální model soustavy puška-střelec [13], upraveno



Obr. 25 Křivka zrychlení ramene zjištěná při experimentu [13], upraveno

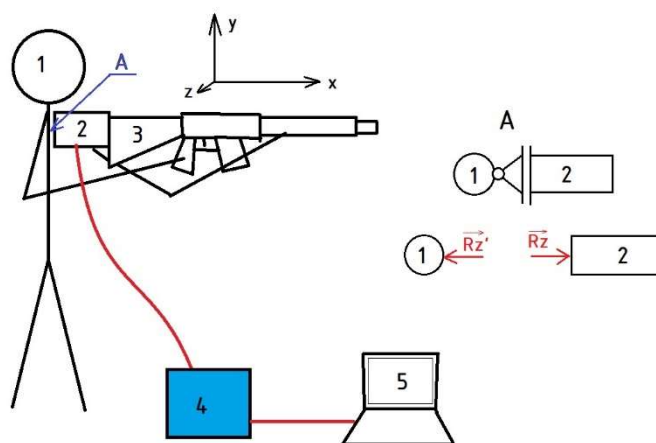
4 ZVOLENÝ ZPŮSOB MĚŘENÍ

Cílem této práce je porovnat hodnoty naměřené pro dvě různé instalované součásti v rámci jednoho měření a nikoli stanovit nějaký všeobecně platný parametr výše zpětného rázu porovnatelný s jinými experimenty. Není tedy nezbytně nutné napodobovat některý ze způsobů měření popsanych v kapitole 3. V zájmu opakovatelnosti našeho pokusu a dalšího výzkumu by ovšem bylo vhodné zvolit jednoduchý, srozumitelný, dostupný a univerzální postup.

Při posuzování zpětného rázu výstřelu tedy můžeme měřit silové působení mezi puškou a střelcem, dále polohu (dráhu), rychlost a zrychlení pušky a případně i zdvih mušky a ústí hlavně [3]. Sílu je možno měřit elektronickým siloměrem, pohyb vysokorychlostní kamerou [11],[12].

Použití vysokorychlostní kamery je náročné na čas, vybavení, zkušební prostory a kvalitu a přesnost provedení měření. Nakonec bylo vybráno řešení s použitím pouze siloměru, které je relativně snadné na provedení a přitom má pro tento účel dostatečnou vypovídající hodnotu.

4.1 POPIS ZVOLENÉHO ZPŮSOBU



Obr. 26 Měřicí sestava

Součásti měřicí sestavy jsou:

1. Střelec
2. Tenzometrický siloměr, šroubem připojen k pažbě pušky
3. Zbraň
4. Výpočetní jednotka
5. Osobní počítač

A – obecná vazba mezi siloměrem a ramenem střelce. Siloměr je o rameno volně opřen a je tudíž schopen přenášet tlakové (avšak nikoli tahové) působení síly R_z .

Siloměr měří vzájemné silové působení pažby pušky a ramene střelce v reálném čase. Signál je zpracováván výpočetní jednotkou, která jej dále předává do stolního počítače. Díky tomuto způsobu je možno nejen změřit absolutní hodnotu síly R_z , ale zjistit i její časový průběh $R_z(t)$. Navíc se jedná o relativně jednoduchou metodu a měření lze snadno zopakovat pro účel dalšího výzkumu, je možné jej provést se skutečným člověkem a není třeba vytvářet složité modely a přípravky, jako v experimentech [11] a [13].

Způsob má ovšem i své nevýhody:

1. Systém měří pouze složku síly působící ve směru osy hlavně (osa X). Ostatní směrové složky nejsou zjištěny, ačkoli rozhodně nejsou zanedbatelné [12]. Rovněž není zjištěn pohyb zbraně ve směrech Y a Z a tím pádem ani zdvih ústí hlavně.
2. Je měřena pouze síla přenášená pažbou. Ostatní síly přenášené pistolovou rukojetí a předpažbím jsou rovněž zanedbány. V odkazovaném experimentu [12] tvoří součet sil přenášených předpažbím a rukojetí přibližně 15% celkové síly ve směru osy X , je to tedy podstatná složka celkového silového působení.
3. Systém nedokáže odlišit vliv střelce na sílu zpětného rázu. Naměřená síla se totiž může lišit pro různé střelce [11].
4. Senzor síly sám o sobě má nezanedbatelnou hmotnost. Svojí hmotou tedy může ovlivnit setrvačné parametry sestavy.
5. Vzhledem ke svému uchycení nedokáže senzor efektivně měřit zápornou (tahovou) hodnotu R_Z . Na tuto skutečnost bude poukázáno dále.
6. Za účelem nalezení skutečného silového maxima je zapotřebí použít vysokou frekvenci měření.

Navzdory výše uvedeným nedostatkům lze měření považovat za dostatečně vypovídající pro určený cíl. Záměrem této práce je totiž srovnat chování dvou bufferů, a pokud při měření dojde k nějakému zkreslení (a že žádné měření není zcela přesné), dá se předpokládat, že ovlivní oba výsledky pro stejně a výstupem bude viditelný rozdíl (pokud ovšem nebude nulový).

4.1.1 MĚŘENÍ S POUŽITÍM AKCELEROMETRU

Pro měření se původně počítalo s použitím akcelerometru instalovaném na rámu zbraně. Díky tomuto způsobu by bylo možno zjistit kromě zrychlení i rychlost a polohu rámu zbraně v průběhu cyklu. Akcelerometr by se tak dal použít jako alternativa k rychloběžné kameře. Při zkušebním měření se však objevily následující potíže:

1. Zrychlení rámu pušky během výstřelu se ukázalo jako velmi vysoké s hodnotami v řádu stovek G . Měření tedy vyžaduje akcelerometr s vysokým rozsahem měřitelných hodnot.
2. Ačkoli se podařilo sehnat piezoelektrický akcelerometr s rozsahem měření 500 G , naměřená data byla nepoužitelná a neodpovídala zjištěním žádnému z odkazovaných experimentů.

U piezoelektrických akcelerometrů je známo, že nejsou vzhledem ke svému funkčnímu principu schopny měřit změny zrychlení s frekvencí nižší než 0,1 Hz [19]. Délka celého funkčního cyklu (cca 80 ms) je ovšem kratší než perioda odpovídající této frekvenci (100 ms). Kvůli komplikacím s akcelerometrem bylo od jeho použití nakonec zcela upuštěno a měření bylo provedeno pouze se siloměrem.

4.2 POSTUP MĚŘENÍ A POUŽITÉ VYBAVENÍ

Měření bylo provedeno pro celkem 40 výstřelů, s jedním střelcem a dvěma typy střeliva, a to v následujícím pořadí za uvedených podmínek:

1. Třikrát pět výstřelů pro dvoumotový buffer se střelivem S&B
2. Pět výstřelů pro dvoumotový buffer se střelivem MEN
3. Třikrát pět výstřelů pro hydraulický buffer se střelivem S&B
4. Pět výstřelů pro hydraulický buffer se střelivem MEN

Vlastnosti použitého střeliva jsou uvedeny v tabulce. Pro statistickou výpovědní hodnotu při hodnocení chování bufferů slouží střelivo Sellier & Bellot, střelivo MEN bylo použito spíše pro srovnání různých nábojů.

Tabulka 1 Parametry střeliva použitého při měření [15], [16]

Výrobce	Typ	hmotnost střely [g]	v_0 [m/s]	E_0 [J]	H_0 [kg.m.s ⁻¹]
Sellier a Bellot	FMJ 55 gr.	3,6	1006	1822	3,62 ³
MEN	AP 62 gr.	4,0	900	1620 ¹	3,60 ¹



Obr. 27 Náboj výrobce MEN (vlevo) a Sellier & Bellot (vpravo)

Při měření byly použity tovární dvoumotový buffer V-AR (Obr. 6) a hydraulický buffer Crosshair (Obr. 8). K bufferům se bohužel nepodařilo dohledat jakékoli oficiální technické parametry od výrobců. Byla změřena jejich hmotnost, která činí 166g pro dvoumotový a 99g pro hydraulický.

³ hodnoty v katalogu neuvedené, byly dopočítány z hmotnosti a rychlosti střely



Obr. 28 Siloměr instalovaný do pažby pušky

K měření byly použity tenzometrický siloměr HBM S9M/20kN a víceúčelový měřicí systém *imc CRONOSflex* z itineráře školy a dále studentská licence software *imc FAMOS*, ve kterém byly posléze i zpracovány výsledky. Všechny výsledky byly získány při měřicí frekvenci 100 kHz. Měření bylo provedeno na střelnici Trigger Service v Brně 23. dubna 2019.



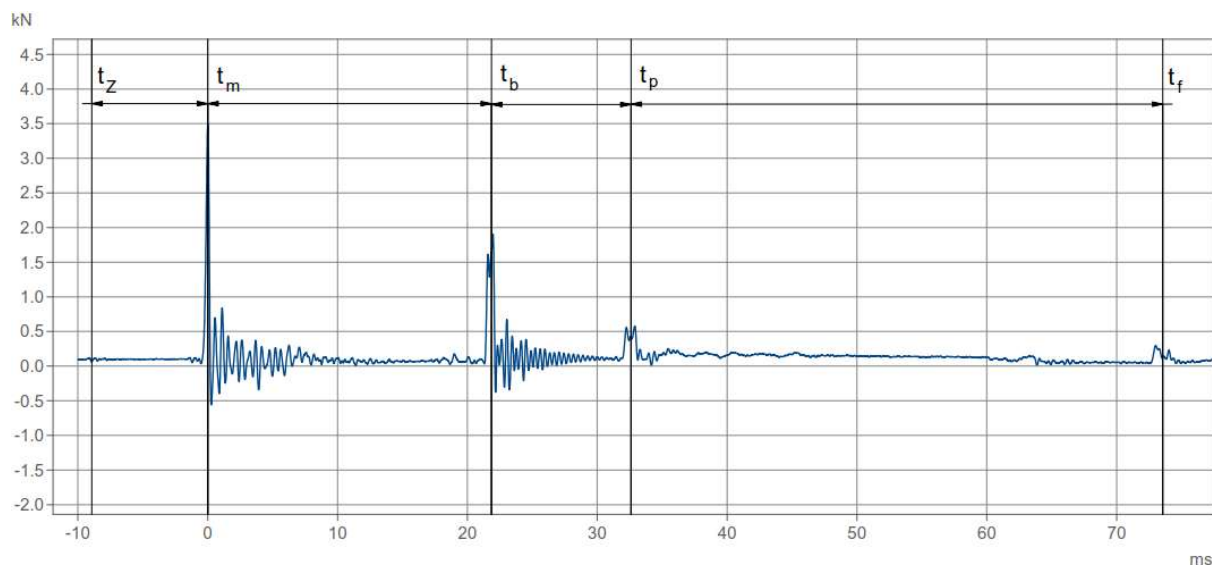
Obr. 29 Víceúčelové měřicí zařízení *imc CRONOSflex*[17]

4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Z naměřeného signálu jsme schopni zjistit průběh síly R_Z během funkčního cyklu pušky, dále hlavní bod této práce, a to měřitelné rozdíly mezi použitými buffery a dále též rozdíly způsobené použitím jiného typu střeliva.

4.3.1 PRŮBĚH CYKLU ZBRANĚ

Okamžitá reaktivní síla během cyklu zbraně má průběh ilustrovaný na Obr. 30. Jako modelový příklad byl zvolen náhodný výstřel, průměr naměřených hodnot nebylo možno pro tento účel použít z důvodů uvedených dále.



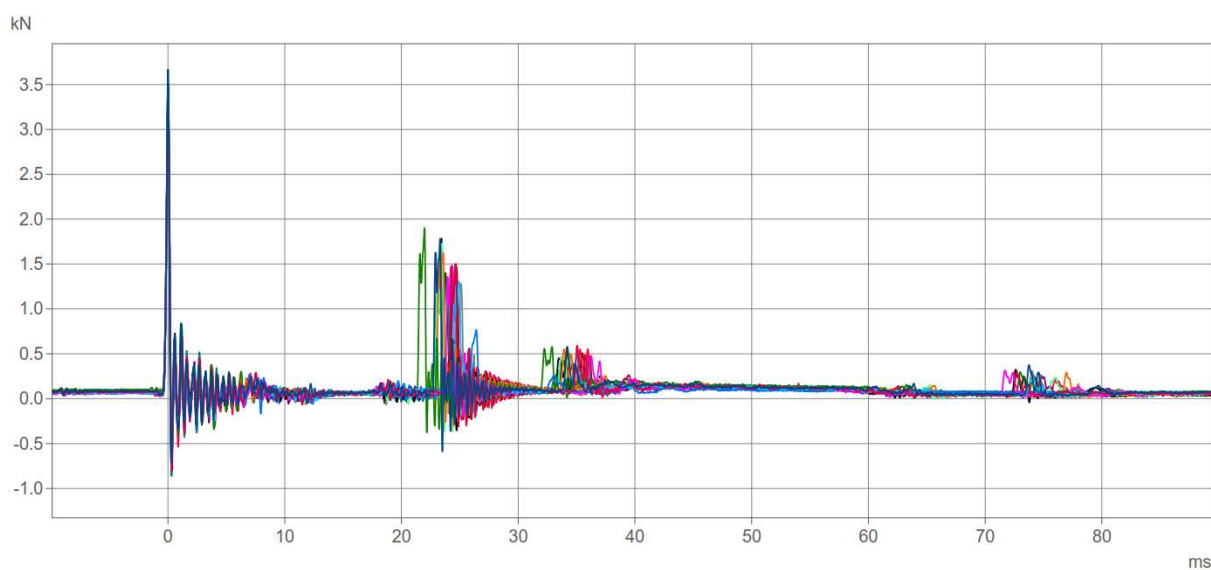
Obr. 30 Silové působení mezi puškou a střelcem během funkčního cyklu

Z grafu jsou patrné tyto okamžiky a časová rozpětí:

- Dopad kladiva t_z
- Samotný výstřel t_m
- Odraz závěrové skupiny v zadní poloze t_b , místo hlavního zájmu
- Podání nového náboje t_p
- Doraz závěru v přední poloze t_f

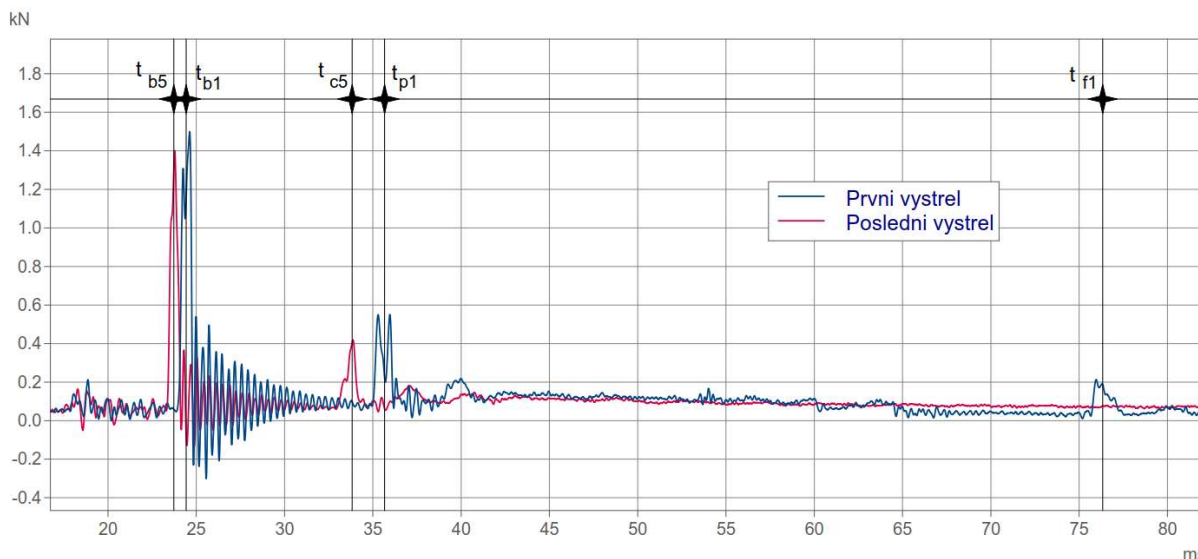
Tento sled událostí se shoduje s literaturou [1] a podobný průběh byl zaznamenán i v experimentu [12], viz Obr. 19.

Obr. 31 Ukazuje srovnání patnácti po sobě jdoucích výstřelů s dvoumotovým bufferem a střelivem Sellier & Bellot. Z grafu je patrná míra konzistence charakteristik výstřelů.



Obr. 31 Výstřely 1-15

Obr. 32 ukazuje srovnání prvního a posledního výstřelu v sérii. U posledního náboje chybí okamžik podání dalšího náboje t_{p5} a náraz závěru v přední poloze t_{f5} , místo nichž je vidět zachycení závěru t_{c5} za účelem přebití zásobníku.



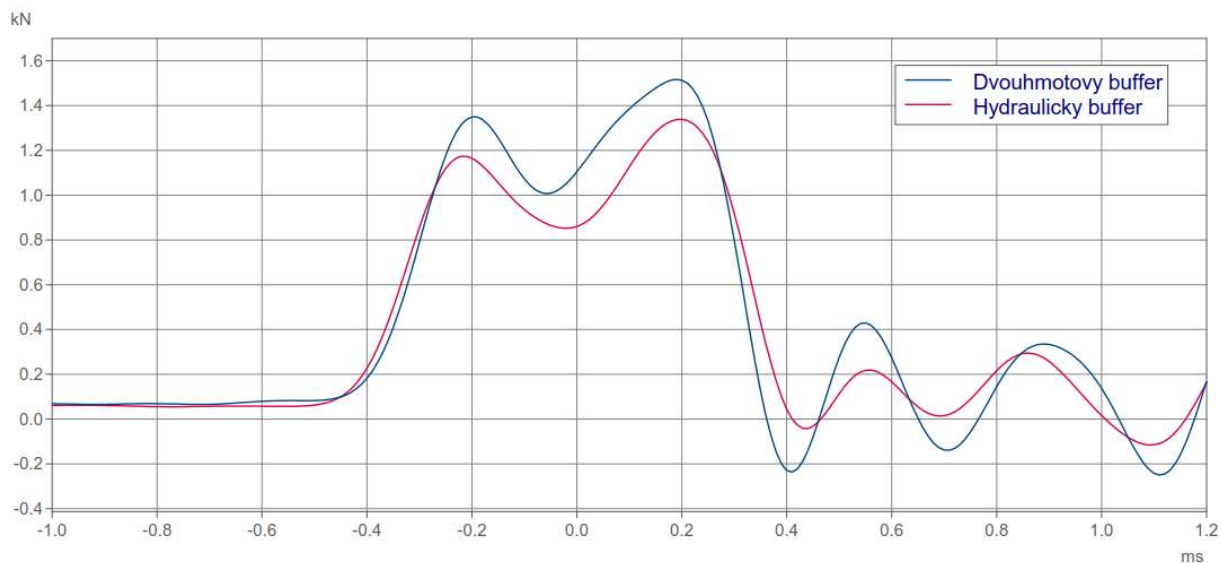
Obr. 32 Srovnání prvního a posledního náboje v zásobníku

Na grafech je též vidět relativně nízká síla v okamžiku t_f ve srovnání s obdobnou hodnotou na Obr. 19. Tento jev může být způsoben buďto nižší kinetickou energií závěrové skupiny před okamžikem t_f v našem pokusu, nebo nedostatkem způsobu měření, kdy senzor není schopen efektivně změřit zápornou hodnotu síly. Vzhledem k tomu, že ZS se během druhé části cyklu pohybuje směrem vpřed, dá se očekávat, že síla v okamžiku t_f bude spíše záporná, což lze vidět i na Obr. 19.

4.3.2 ROZDÍLY MEZI BUFFERY

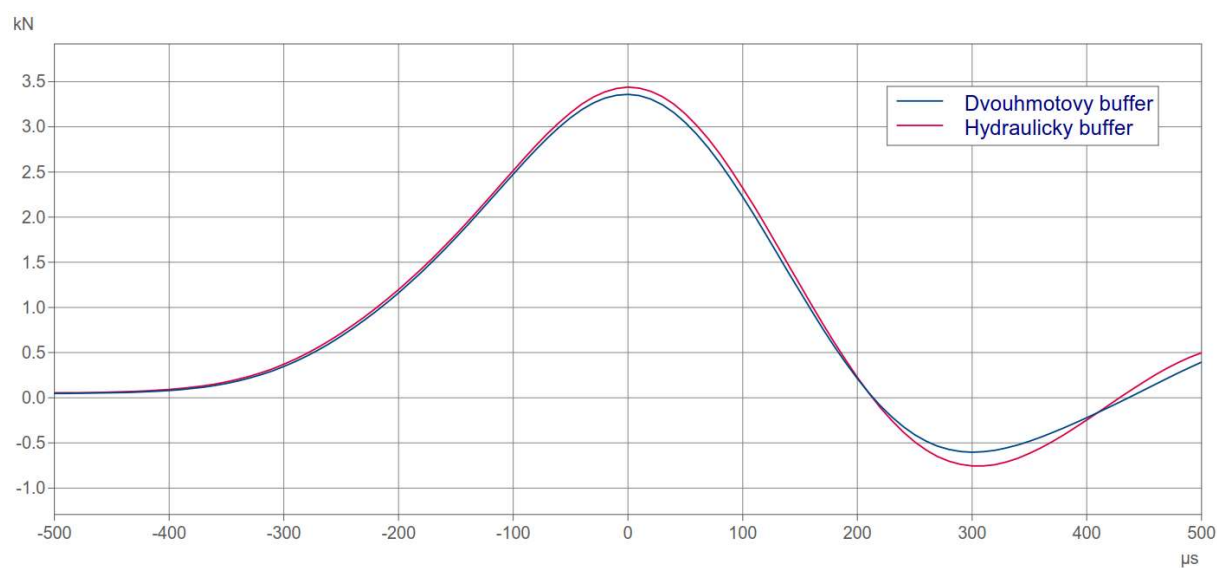
K sestavení následujících grafů byly použity průměry naměřených hodnot. Kvůli nekonzistenci rychlosti funkčního cyklu nebylo možné vytvořit jeden průměr časových průběhů, ale bylo nutné zprůměrovat zvláště hodnoty časově zarovnané podle okamžiku výstřelu, nebo podle okamžiku odrazu závěrové skupiny.

Obr. 33 ukazuje srovnání sil v okamžiku odrazu. Je zde viditelný rozdíl mezi oběma buffery:



Obr. 33 Srovnání dvouhmotového a hydraulického bufferu v okamžiku odrazu závěrové skupiny ($t_b=0$)

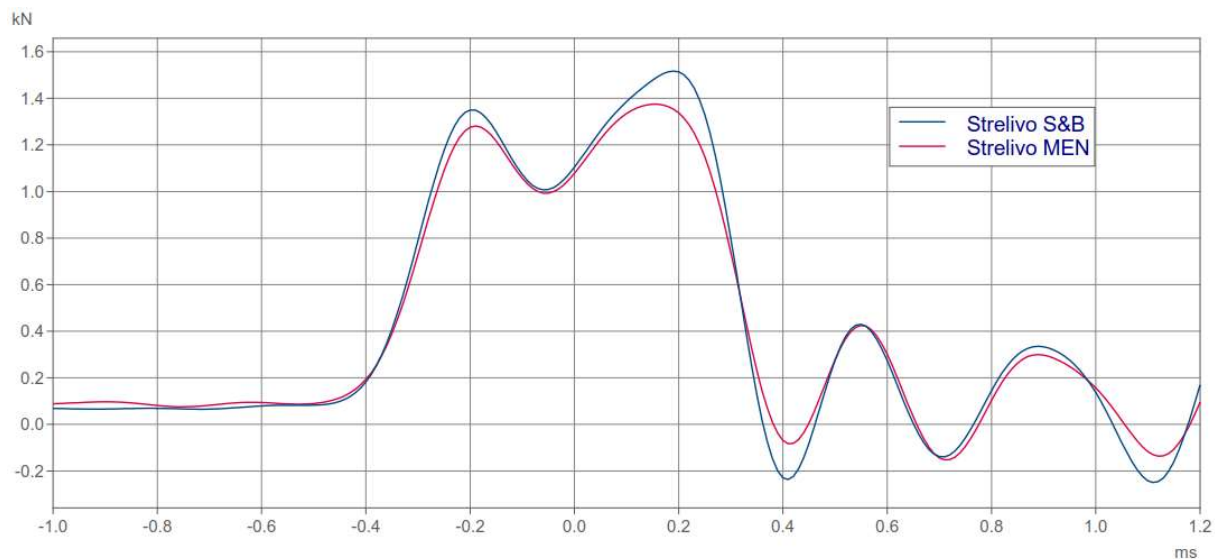
Obr. 34 ukazuje srovnání sil v okamžiku výstřelu. Opět je zde viditelný rozdíl, avšak menší. Porovnáním přesných hodnot se zabývá kap. 4.3.4.



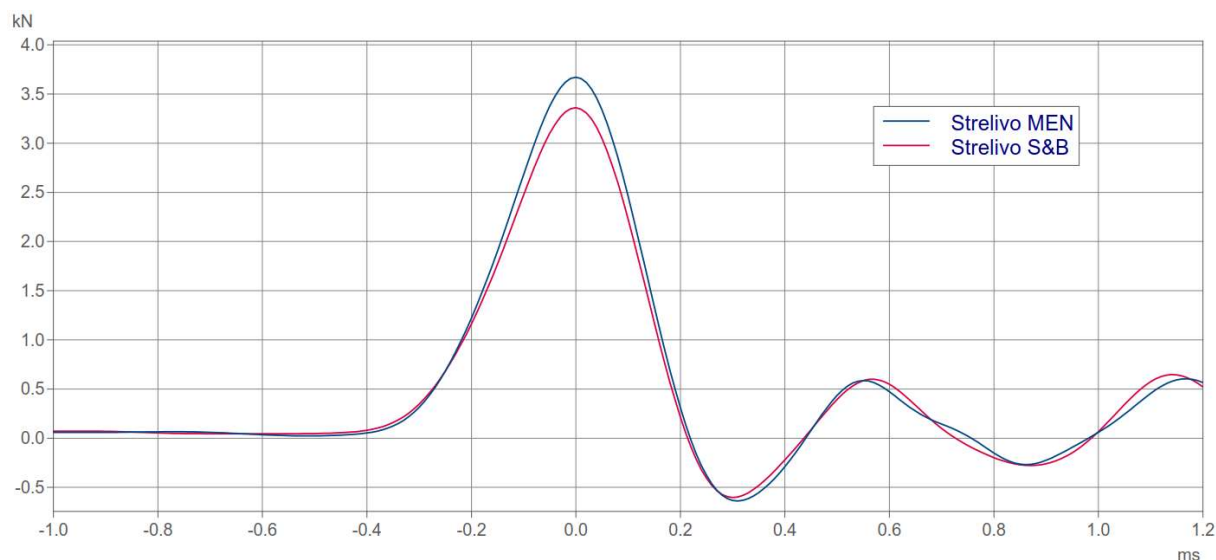
Obr. 34 Srovnání dvouhmotového a hydraulického bufferu v okamžiku výstřelu

4.3.3 ROZDÍLY PODLE TYPU STŘELIVA

Srovnávat různé typy střeliva nebylo hlavním cílem práce, střelivo značky MEN bylo vyzkoušeno spíše pro doplnění. S pěti výstřely pro každý buffer mají tedy jeho hodnoty nižší statistickou důvěryhodnost, než u nábojů Sellier & Bellot.



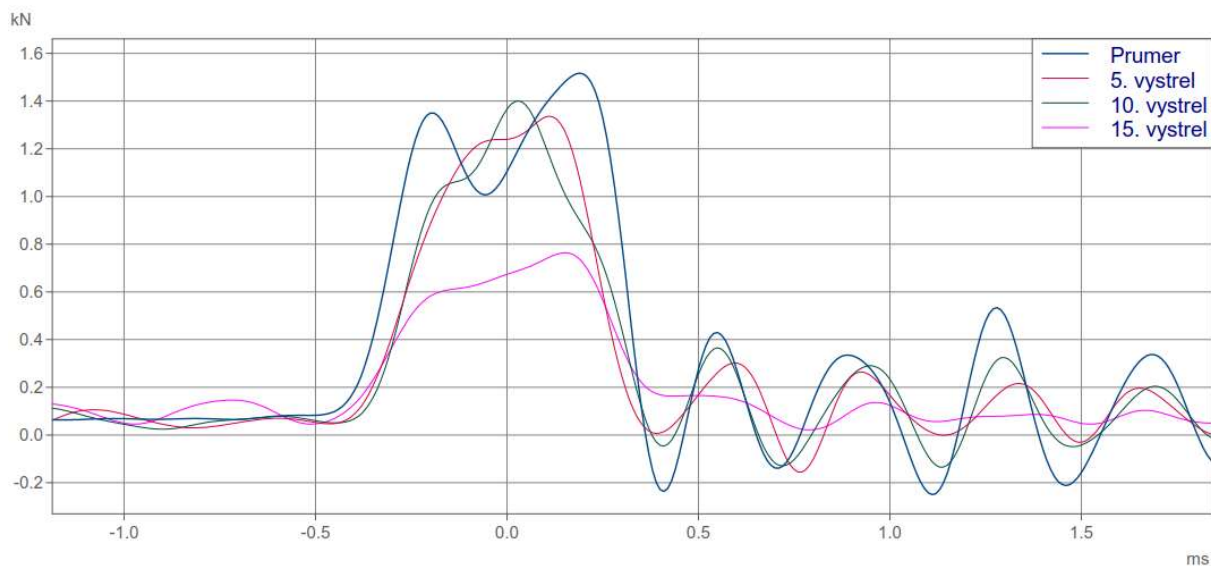
Obr. 35 Srovnání různých typů střeliva pro okamžik odrazu závěrové skupiny ($t_b=0$)



Obr. 36 Srovnání různých typů střeliva pro okamžik výstřelu

4.3.4 SHRNUTÍ MĚŘENÍ

Tabulka 2 obsahuje úplné naměřené hodnoty. Dva výstřely (č. 15 a 21) byly vyřazeny ze statistického souboru na základě pravidla 3σ , jeden (č. 1) dále ručně pro příliš vysokou odchylku σT (dosahující takřka 10% měřené hodnoty). Výstřely č. 5, 10 a 15 byly vyřazeny pro výrazně odlišný tvar křivky (Obr. 37). Jako směrodatné se dále berou průměrné hodnoty ze souboru po vyřazení těchto hodnot.



Obr. 37 Výstřely vyřazené pro odlišný tvar křivky

Význam jednotlivých veličin:

T – doba od výstřelu do nárazu ZS v zadní poloze; $T = (t_i - t_b)$

I_m – impuls síly během výstřelu

I_b – impuls síly během odrazu ZS v zadní poloze

P_m – ekvivalentní síla v průběhu výstřelu

P_b – ekvivalentní síla v průběhu odrazu ZS v zadní poloze

T_b – čas trvání bufferového impulsu

σ – směrodatná odchylka příslušné veličiny

Průměr – aritmetický průměr příslušné veličiny

Průměr 3σ – aritmetický průměr příslušné veličiny po vyřazení výstřelů mimo rozsah 3σ

Tabulka 3 srovnává průměrné hodnoty sledovaných veličin, a to jak z hlediska absolutních, tak i relativních čísel. Pro relativní srovnání jsou hodnoty naměřené s dvoumotovým bufferem brány jako 100%.

Tabulka 2 Naměřená data

Dvoumotový buffer, střelivo Sellier & Bellot										
Číslo výstřelu	T	σT	I_m	I_b	σI_b	P_m	P_b	σP_b	T_b	σT_b
	[ms]	[ms]	[Ns]	[Ns]	[Ns]	[N]	[N]	[N]	[s]	[s]
1	0.02177	0.00226	0.7365	0.8905	0.1847	2818.0	1530.0	335.43	0.000582	0.000009
2	0.02338	0.00065	0.7713	0.8111	0.1053	2558.0	1395.0	200.43	0.000582	0.000009
3	0.02326	0.00077	0.7620	0.7834	0.0776	2746.0	1287.0	92.427	0.000609	0.000018
4	0.02323	0.00080	0.7833	0.7719	0.0661	2818.0	1284.0	89.427	0.000601	0.000010
5	0.02382	0.00021	0.7806	0.5525	0.1533	2680.0	1126.0	68.573	0.000491	0.000100
6	0.02444	0.00041	0.7448	0.7300	0.0242	2754.0	1235.0	40.427	0.000591	0.000000
7	0.02453	0.00050	0.7406	0.7335	0.0277	2683.0	1173.0	21.573	0.000625	0.000034
8	0.02492	0.00089	0.7619	0.6630	0.0428	2708.0	1033.0	161.57	0.000642	0.000051
9	0.02457	0.00054	0.7733	0.6637	0.0421	2841.0	1064.0	130.57	0.000624	0.000033
10	0.02374	0.00029	0.7941	0.5475	0.1583	2794.0	1089.0	105.57	0.000503	0.000088
11	0.02310	0.00093	0.7880	0.8525	0.1467	2972.0	1454.0	259.43	0.000586	0.000004
12	0.02447	0.00044	0.8127	0.7608	0.0550	2471.0	1254.0	59.427	0.000607	0.000016
13	0.02477	0.00074	0.8038	0.6779	0.0279	2692.0	1104.0	90.573	0.000614	0.000023
14	0.02415	0.00012	0.7608	0.7757	0.0699	2643.0	1261.0	66.427	0.000615	0.000024
15	0.02625	0.00222	0.7938	0.3726	0.3332	2556.0	629.6	564.97	0.000592	0.000001
Průměr	0.02403	0.00078	0.7738	0.7058	0.1010	2715.6	1194.6	152.46	0.000591	0.000028
Odchylka	0.00078	-	0.0186	0.1010	-	97.8	152.5	-	0.000028	-
3 σ	0.00235	-	0.0558	0.3030	-	293.5	457.4	-	0.000084	-
Průměr 3 σ	0.02407	0.00062	0.7730	0.7476	0.0623	2716.9	1231.3	110.2	0.000609	0.000020

Dvoumotový buffer, střelivo MEN										
Číslo výstřelu	T	σT	I_m	I_b	σI_b	P_m	P_b	σP_b	T_b	σT_b
	[ms]	[ms]	[Ns]	[Ns]	[Ns]	[N]	[N]	[N]	[s]	[s]
16	0.02389	0.00049	0.8340	0.7578	0.0897	3138.0	1260.0	138.3	0.000601	0.000007
17	0.02477	0.00039	0.8404	0.6650	0.0031	2949.0	1081.0	40.7	0.000615	0.000021
18	0.02421	0.00017	0.8281	0.7673	0.0992	2976.0	1266.0	144.3	0.000606	0.000012
19	0.02472	0.00034	0.8659	0.6179	0.0502	2808.0	1021.0	100.7	0.000605	0.000011
20	0.02431	0.00007	0.8546	0.5326	0.1355	2934.0	980.7	141.0	0.000543	0.000051
Průměr	0.02438	0.00029	0.8446	0.6681	0.0755	2961.0	1121.7	113.0	0.000594	0.000020
Odchylka	0.00029	-	0.0125	0.0755	-	76.8	113.0	-	0.000020	-
3 σ	0.00088	-	0.0376	0.2266	-	230.4	339.0	-	0.000061	-
Průměr 3 σ	0.02440	0.00035	0.8421	0.7020	0.0606	2967.8	1157.0	106.0	0.000607	0.000013

Hydraulický buffer, střelivo Sellier & Bellot										
Číslo výstřelu	T	σT	I_m	I_b	σI_b	P_m	P_b	σP_b	T_b	σT_b
	[ms]	[ms]	[Ns]	[Ns]	[Ns]	[N]	[N]	[N]	[s]	[s]
21	0.02068	0.00191	0.8013	0.8695	0.1706	3090.0	1484.0	403.3	0.000586	0.000065
22	0.02250	0.00009	0.8425	0.7280	0.0291	2833.0	1105.0	24.3	0.000659	0.000009
23	0.02269	0.00010	0.8082	0.6810	0.0179	2775.0	1073.0	7.7	0.000635	0.000016
24	0.02293	0.00034	0.8177	0.7103	0.0114	2700.0	1069.0	11.7	0.000664	0.000014
25	0.02225	0.00034	0.7908	0.6994	0.0005	2838.0	1051.0	29.7	0.000666	0.000015
26	0.02344	0.00085	0.7679	0.5763	0.1226	2885.0	836.9	243.8	0.000689	0.000038
27	0.02356	0.00097	0.7693	0.6342	0.0647	2668.0	946.6	134.1	0.00067	0.000020
28	0.02315	0.00056	0.7684	0.6370	0.0619	2746.0	948.6	132.1	0.000672	0.000021
29	0.02378	0.00119	0.7734	0.5710	0.1279	2744.0	866.2	214.5	0.000659	0.000009
30	0.02300	0.00041	0.7629	0.6610	0.0379	2671.0	995.9	84.8	0.000664	0.000013
31	0.02102	0.00157	0.8052	0.8442	0.1453	3097.0	1367.0	286.3	0.000617	0.000033
32	0.02144	0.00115	0.8215	0.7741	0.0752	2741.0	1239.0	158.3	0.000625	0.000025
33	0.02207	0.00052	0.8252	0.7404	0.0415	2785.0	1163.0	82.3	0.000637	0.000014
34	0.02323	0.00064	0.8154	0.6819	0.0170	2584.0	1010.0	70.7	0.000675	0.000025
35	0.02310	0.00051	0.7823	0.6745	0.0244	2849.0	1056.0	24.7	0.000639	0.000012
Průměr	0.02259	0.00074	0.7968	0.6989	0.0632	2800.4	1080.7	127.2	0.000650	0.000022
Odchylka	0.00074	-	0.0217	0.0632	-	105.3	127.2	-	0.000022	-
3 σ	0.00223	-	0.0650	0.1896	-	315.8	381.7	-	0.000066	-
Průměr 3 σ	0.02273	0.00066	0.7965	0.6867	0.0555	2779.7	1051.9	107.5	0.000655	0.000019

Hydraulický buffer, střelivo MEN										
Číslo výstřelu	T	σT	I_m	I_b	σI_b	P_m	P_b	σP_b	T_b	σT_b
	[ms]	[ms]	[Ns]	[Ns]	[Ns]	[N]	[N]	[N]	[s]	[s]
36	0.02359	0.00018	0.8355	0.6808	0.0374	3125.0	1004.0	58.6	0.000678	0.000003
37	0.02378	0.00001	0.8526	0.6097	0.0337	3170.0	874.9	70.5	0.000697	0.000016
38	0.02346	0.00031	0.8568	0.6541	0.0107	3010.0	953.7	8.3	0.000686	0.000005
39	0.02449	0.00072	0.8674	0.6232	0.0202	2792.0	923.4	22.0	0.000675	0.000006
40	0.02352	0.00025	0.8164	0.6491	0.0057	2998.0	971.0	25.6	0.000669	0.000012
Průměr	0.02377	0.00029	0.8457	0.6434	0.0215	3019.0	945.4	37.0	0.000681	0.000008
Odchylka	0.00029	-	0.0158	0.0215	-	102.8	37.0	-	0.000008	-
3 σ	0.00088	-	0.0475	0.0646	-	308.4	111.0	-	0.000025	-
Průměr 3 σ	0.02377	0.00029	0.8457	0.64338	0.0215	3019.0	945.4	37.0	0.000681	0.000008

Tabulka 3 Srovnání sledovaných veličin u obou bufferů v absolutních a relativních číslech

	Dvoumotový buffer						
	T [ms]	I_m [Ns]	I_b [Ns]	$I_m + I_b$ [Ns]	P_m [N]	P_b [N]	T_b [s]
S&B	0.0241	0.773	0.748	1.521	2716.909	1231.3	0.000609
MEN	0.0244	0.842	0.702	1.544	2967.75	1157.0	0.000607
S&B	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
MEN	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

	Hydraulický buffer						
	T [ms]	I_m [Ns]	I_b [Ns]	$I_m + I_b$ [Ns]	P_m [N]	P_b [N]	T_b [s]
S&B	0.0227	0.796	0.687	1.483	2779.714	1051.943	0.000655
MEN	0.0238	0.846	0.643	1.489	3019.000	945.4	0.000681
S&B	94%	103%	92%	98%	102%	85%	108%
MEN	97%	100%	92%	96%	102%	82%	112%

4.4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Na základě získaných výsledků můžeme pozitivně říci některá tvrzení:

1. Hydraulický buffer výrazně snižuje ekvivalentní sílu pro časový úsek odrazu závěrové skupiny v zadní poloze, a to o 15-18% dle typu střeliva. Impuls této síly snižuje v porovnání o 8% pro oba typy střeliva.
2. Hydraulický buffer rovněž prodlužuje trvání odrazu ZS v zadní poloze o 8-12%.
3. Hydraulický buffer snižuje dobu pohybu závěrové skupiny do zadní polohy v rozsahu 3-6%.
4. Hydraulický buffer zvyšuje ekvivalentní sílu výstřelu o 2%, a rovněž zvyšuje impuls této síly o 0-3%.
5. Celkový silový impuls ve chvíli výstřelu a odrazu závěrové skupiny se pro oba buffery tolik neliší. Hydraulický buffer součet těchto impulsů snižuje o 2-4%. Nutno podotknout, že tato úvaha je zatížena podstatnou nepřesností, protože ignoruje silový impuls předaný mimo tyto dva vytyčené časové úseky. Nicméně malý rozdíl celkového impulsu je očekávatelný – podle zákona zachování hybnosti by měl zůstat zachován.

Důležitou součástí jakéhokoli verdiktu ohledně výsledků měření je skutečnost, že měření bylo provedeno pro dva konkrétní modely bufferů. Srovnání má tedy vypovídající hodnotu pro případ těchto dvou určitých modelů, ale pro technické koncepce jako takové se spíše jedná o vodítko či doporučení, jaké výsledky lze očekávat a kterým směrem by se mohl ubírat další výzkum v této oblasti.

Chování obou bufferů je přímo závislé na dynamických parametrech uvedených v kap. 2.4 a jejich vyladěním bude možné dosáhnout odlišných výsledků, než jaké bylo zjištěno v tomto experimentu.

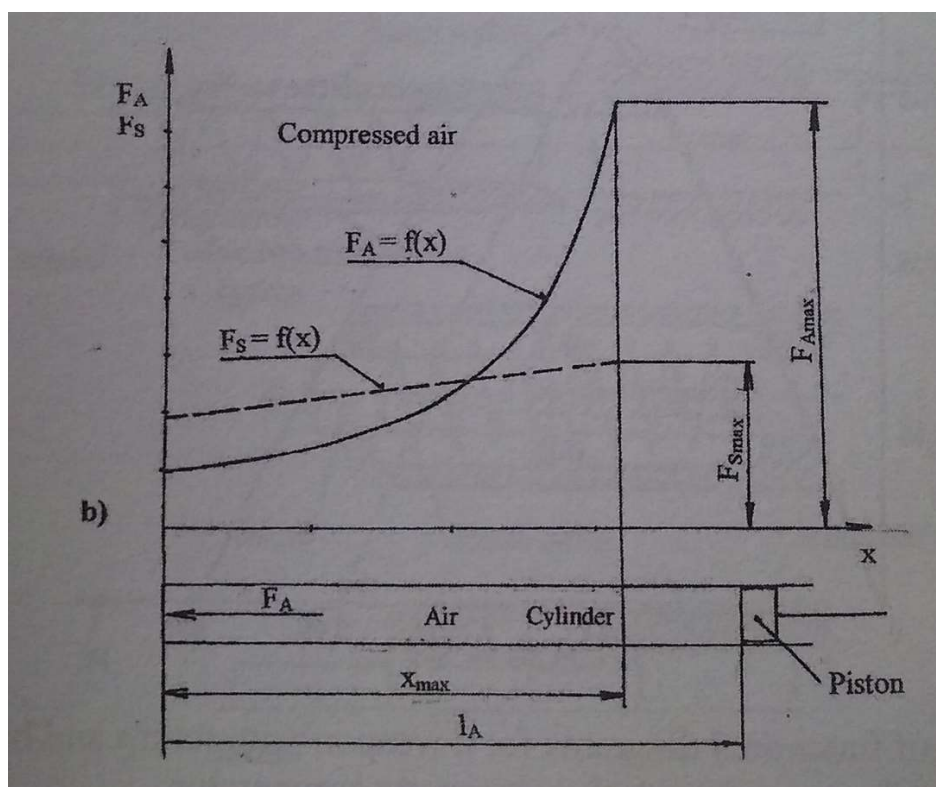
5 ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY ZMÍRNĚNÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

Tato práce se primárně zaměřuje na buffery jakožto prostředek zmírnění zpětného rázu. Ty ovšem nejsou zdaleka jediným možným technickým řešením. Tato kapitola obsahuje krátký výčet ostatních používaných prostředků pro doplnění uceleného pohledu na problematiku.

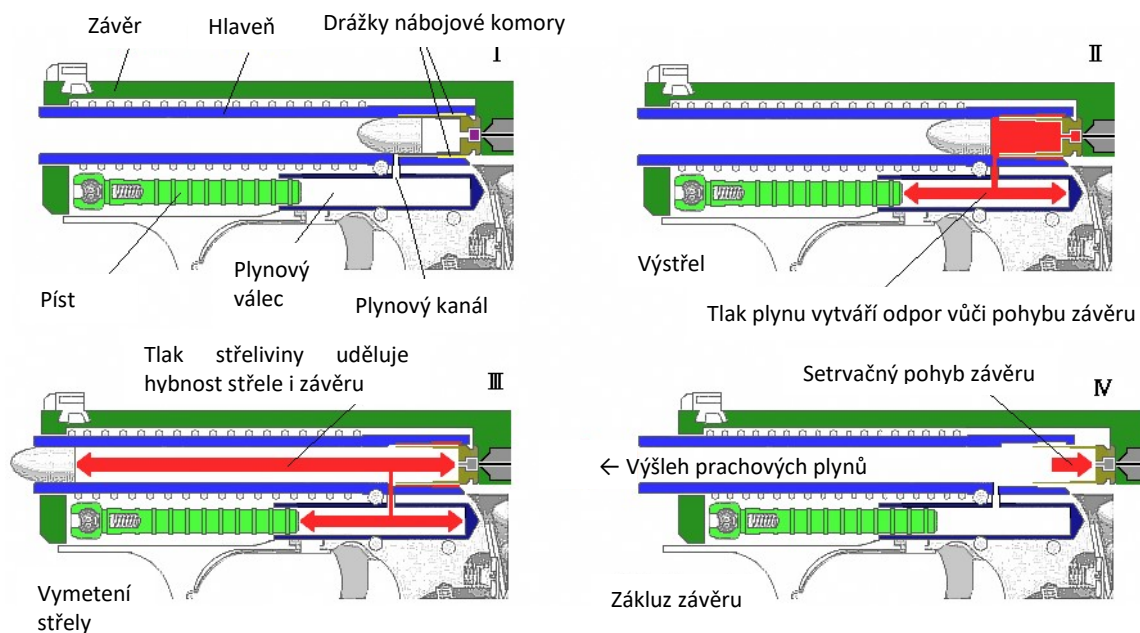
5.1 PNEUMATICKÝ VRATNÝ MECHANISMUS

Vratnou pružinu můžeme nahradit pístem a válcem naplněným plynem. Stlačovaný plyn působí silou proti pohybu závěru obdobně jako pružina s tím rozdílem, že závislost odporové síly na stlačení není lineární, nýbrž exponenciální. Dobře navržený pneumatický mechanismus může nahradit buffer i vratnou pružinu zároveň [2].

Obdobný princip používá i samonabíjecí pistole Heckler & Koch P7, zde jsou prachové plyny odebírány do plynového válce pod hlavní, kde brzdí pohyb závěru pomocí pístu připevněného k závěru (tzv. Barnitzkeho systém) 46[18]. Díky tomuto řešení pistole rovněž nepotřebuje mechanické uzamčení závěru, jak je u jiných zbraní ráže 9mm Luger obvyklé.



Obr. 38 Srovnání lineární charakteristiky pružiny F_S a nelineární charakteristiky pneumatického mechanismu F_A [2]. Osa x popisuje stlačení pružiny/pístu, osa y potřebnou sílu



Obr. 39 Mechanismus pistole Heckler & Koch P7 [18], upraveno

5.2 ÚSTŮVÉ BRZDY A KOMPENZÁTORY

Úst'ová brzda je zařízení instalované na ústí hlavně zbraně, jehož účelem je přesměrovat tok plynů opouštějících při výstřelu hlavě vzad. Jejich tlaková síla tak působí vpřed proti směru působení ostatních sil výstřelu a snižuje energii zpětného rázu v běžném případě o 25-30% [3].

Kompenzátor podobně jako úst'ová brzda využívá tlak plynů na ústí hlavně, jejich silou však působí dolů – nesnižuje tedy zpětný ráz samotný, nýbrž zdvih ústí hlavně, který můžeme považovat za nežádoucí účinek zpětného rázu [3].

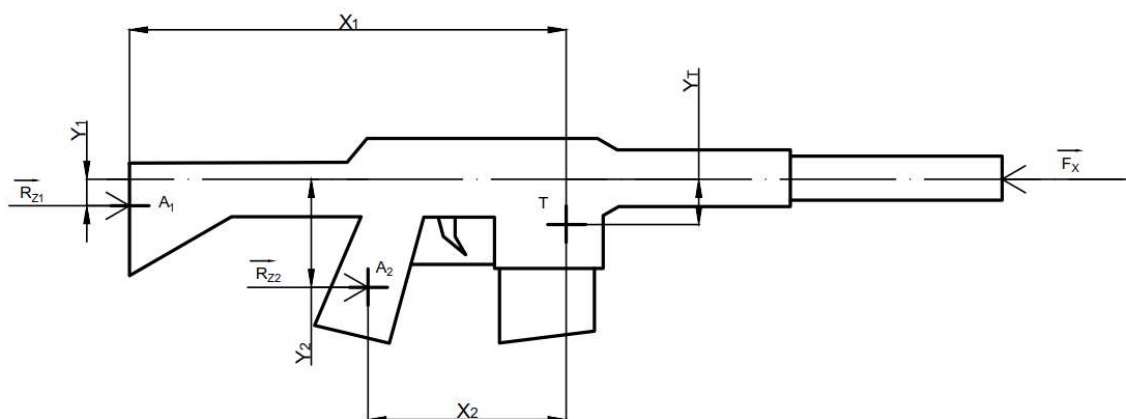
Konkrétní puška použitá při tomto měření má úst'ovou brzdu instalovanou již z výroby, viz Obr. 40.



Obr. 40 Puška V-AR pužitá při měření. Za pozornost stojí úst'ová brzda a pažba v ose hlavně

5.3 ÚPRAVA GEOMETRIE ZBRANĚ

Úpravou geometrie zbraně můžeme snížit zdvih hlavně a mušky. Při zdvihu totiž dochází k rotaci celé zbraně působením momentu, který vyvolává síla F_x vůči bodům úchopu zbraně a též jejímu těžišti. Posunutím těžiště zbraně a bodů úchopů na nositelku síly F_x (přibližně do osy hlavně) je tedy možné snížit zdvihový moment a tím pádem i zdvih samotný [3].



Obr. 41 Poloha opěrných bodů a těžiště pušky[3], převzato a upraveno

U pušek typu AR-15 je nosná trubka pažby souosá s hlavní, jak lze vidět na Obr. 40.

5.4 POUŽITÍ JINÉHO STŘELIVA

Pakliže pro dvojici puška-střela platí zákon zachování hybnosti, můžeme logicky impuls výstřelu snížit použitím střeliva s nižší hybností střely. Následující Tabulka 4 ukazuje srovnání vybraných nábojů nabízených pro pušku V-AR [4] a používaných i v jiných samonabíjecích a útočných puškách. Údaje jsou čerpány z nabídky českého výrobce Sellier & Bellot [15]:

Tabulka 4 Srovnání různých ráží dostupných pro pušky V-AR

Ráže	Hmotnost střely [g]	Ústřední rychlost [m/s]	Ústřední energie [J]	Ústřední hybnost střely ⁴ [kg.m/s]
223 Remington	3,6	1006	1822	3,62
6,8 Rem. SPC	7,1	779	2154	5,53
300 AAC Blackout	8,0	660	1742	5,28
308 Winchester	8,0	905	3276	7,24
7,62x39	8,0	738	2179	5,90

Jak lze vidět, hybnost střely náboje .223 Remington je suverénně nejnižší ze všech uvedených, přičemž si ovšem zachovává dostatečnou energii. Koncepce nízké hmotnosti a vysoké rychlosti je pro tuto ráži charakteristická a náboj je díky ní znám pro svůj nízký zpětný ráz (stejně jako

⁴ hodnoty v katalogu neuvedené, byly dopočítány z hmotnosti a rychlosti střely

podobný ruský náboj 5,45x39) [3]. Můžeme proto tedy jen spekulovat, jak dalece se tímto směrem dá ještě posunout, aniž by došlo k dramatickému ovlivnění jiných, balisticky důležitých, vlastností náboje.

5.5 PROTIZÁVAŽÍ

Ruská puška AK-107/108 používá k eliminaci zpětného rázu systém dvou hmot, pohybujících se proti sobě. Jednou je závěrová skupina, druhou jakési „závaží“ umístěné nad hlavní před plynovým nástavcem. Toto závaží se během cyklu pohybuje vpřed a jeho hybnost tedy kompenzuje vliv pohybu závěru [14]. Toto řešení již bylo historicky použito u více zbraní, avšak větší úspěch na trhu nezaznamenalo.



Obr. 42 Princip funkce pušky AK-107/108 [14]. ZS je vyznačena šedou barvou, protizávaží žlutou

5.6 JEDNODUŠŠÍ ZPŮSOBY

Zpětný ráz zbraně je též možno utlumit např. vložením kusu měkkého deformovatelného materiálu mezi pažbu a rameno střelce, který si na sebe může obléct kožich, kamizolu s podšíváním ramenem nebo jiný kus oděvu. Toto řešení však nesouvisí přímo s konstrukcí nebo funkcí zbraně, a proto je zde uvedeno jen pro doplnění obecného přehledu.

ZÁVĚR

Při střelbě z pušky dochází ke zpětnému rázu – pohybu zbraně ve směru opačném k pohybu střely, jakožto důsledku zákona akce a reakce. Tento efekt se projeví sice až poté, kdy střela opustí hlaveň pušky a nemá tedy vliv na přesnost tohoto výstřelu, nicméně vyžaduje, aby střelec pro další výstřel zamířil znovu nebo zamíření opravil. Zpětný ráz tedy snižuje rychlost přesné střelby u samonabíjecích zbraní, potažmo zhoršuje přesnost střelby dávkou u zbraní samočinných.

U automatických zbraní se zpětný ráz projevuje jako proces skládající se z několika časových úseků, neboť zde kromě samotného vystřelení projektilu hraje roli i pohyb vnitřního mechanismu zbraně, který bezprostředně po výstřelu odstraní prázdnou nábojnici a nabije další náboj, čímž zbraň připraví k dalšímu výstřelu.

Během svého pohybu narazí závěr zbraně do zadní části rámu a předá mu část své mechanické energie. Tento děj je velice rychlý a dochází při něm ke skokovému nárůstu působící síly. Schopností bufferu je omezit právě tuto sílu pohlcením energie pohybujícího se závěru. Existuje více způsobů, jak toho docílit, například pomocí pružin nebo tlumičů. Dvoumotový buffer sestává ze dvou tělísek spojených pružinou a kinetickou energii absorbuje právě do této pružiny. Součástí hydraulického bufferu je kromě pružiny i tlumič, který přeměňuje energii kinetickou na disipační.

Cílem této práce bylo srovnat schopnosti zmírnit účinky zpětného rázu pro dva konkrétní modely dvoumotového a hydraulického bufferu, instalovaných na pušce V-AR. Posuzovanými kritérii byla síla vznikající při výstřelu a ve chvíli odrazu závěru v zadní poloze a dále impulzy těchto sil. Síly byly měřeny prostřednictvím elektronického siloměru umístěného mezi pažbu pušky a rameno střelce. Na základě měření bylo zjištěno, že:

1. Hydraulický buffer oproti dvoumotovému výrazně snižuje ekvivalentní sílu působící v době odrazu závěru v zadní poloze, v tomto konkrétním případě o 15-18% podle typu použitého střeliva. Hodnotu impulsu síly při odrazu snížil o 8%. Dobu trvání tohoto impulsu prodloužil o 8-12%.
2. Hydraulický buffer má mírný vliv na rychlost pohybu závěru, doba pohybu do zadní polohy byla při jeho použití o 3-6% kratší. Naopak celková délka cyklu byla u hydraulického bufferu vyšší.
3. U hydraulického bufferu byla zjištěna o 2% vyšší ekvivalentní síla při výstřelu, jejíž impuls byl o 0-3% větší. Vzhledem k nízkému zjištěnému rozdílu však můžeme spekulovat o významu tohoto pozorování.

Závěrem práce tedy je, že hydraulický buffer má určitý potenciál a jeho použití se dá považovat za opodstatněné. Pro plné posouzení jeho přínosu by bylo vhodné pokračovat v dalším výzkumu, kterým by mohla být komplexní analýza pohybu a chování pušky během střelby se zřetelem na zdvih ústí hlavně, který čistě na základě tohoto pokusu není možné posoudit. Dalším krokem v této oblasti by bylo vytvořit matematický model celého problému a objasnit vliv vlastních parametrů bufferů na chování pušky při střelbě.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JANKOVÝCH, R. *Hlavňové zbraně a střelivo*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. 115 s. ISBN 978-80-260-2384-5
- [2] POPELÍNSKÝ, L. *Small arms & artillery guns. Part II, Design of small arms mechanisms*. První vydání. Brno: Univerzita obrany, 2011. ISBN 9788072317844
- [3] FIŠER, Miloslav a Lubomír POPELÍNSKÝ. *Small arms*. Ed. 1st. Brno: University of Defence, 2007. ISBN 978-80-7231-475-1
- [4] V-AR - V-AR rifle. Produkty - V-AR rifle [online]. Copyright © 2010 V-AR [cit. 07.04.2019]. Dostupné z: <http://www.v-ar.cz/cz/produkty/v-ar.html>
- [5] *Návod k použití sportovní kulovnice samonabíjecí V-AR*. Praha: Pavel Vosátka, 2014. 17 s. Dostupné také z: http://www.v-ar.cz/download/User_manual_VAR.pdf
- [6] Tuning the AR-15 Gas System [Less Recoil, Duty, & Suppressed] - Pew Pew Tactical. *Pew Pew Tactical - Level Up Your Gun Knowledge* [online]. Copyright © 2019 Pew Pew Media, Inc. All rights reserved. [cit. 07.04.2019]. Dostupné z: <https://www.pewpewtactical.com/tuning-ar15-gas-system/>
- [7] MR556A1 - Heckler & Koch. *Home - Heckler & Koch* [online]. Dostupné z: <https://hk-usa.com/hk-models/mr556a1/>
- [8] DIMITRIOS MANTAS. *Buffer Assembly*. US Patent, 9,080,823 B1. 2015-07-14.
- [9] ENIDINE, INC. *Hydraulic Bolt Buffer For Firearm*. US Patent, 7,131,367 B1. 2006-11-07.
- [10] Crosshair Recoil Buffer AR-15 Carbine | Gamp Sports. *Gamp Sports - Specialty Sports Gear* [online]. Copyright © 2018 Gamp Sports. All rights reserved. [cit. 07.04.2019]. Dostupné z: <https://gampsports.com/product/crosshair-recoil-buffer-ar-15-carbine/>
- [11] HALL, Matthew J. Measuring felt recoil of sporting arms. *International Journal of Impact Engineering*. 2008, 35(6), 540-548. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X07000619>
- [12] TARASZEWSKI, Michał a Januzs EWERTOWSKI. Complex experimental analysis of rifle-shooter interaction. *Defence Technology*. 2017, 13(5), 346-352. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914716301635>
- [13] BENZKOFER, Philip D. Dynamic Analysis of Shoulder Fired Weapons. In: *Proceedings of the U.S. Army Symposium on Gun Dynamics (7th), Held in Newport, Rhode Island on 11-13 May 1993*. Army Armament Research, Development and Engineering Center, 1993. 22 s. Dostupné také z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p009073.pdf>
- [14] AK-107/108 - *Modern Firearms*. [online]. Copyright © 1999 [cit. 07.04.2019]. Dostupné z: <https://modernfirearms.net/en/assault-rifles/russia-assault-rifles/ak-107108-eng/>

- [15] *Katalog produktů 2018*. Sellier & Bellot, vydání 2018/3. Dostupné také z: <http://vlado.cz/sb-katalog/SB%202018%20-%20eVerze%20CS.pdf>
- [16] *Produktkatalog*. Metallwerk Elisenhütte GmbH, 2019. Dostupné také z: https://www.men-defencetec.de/wp-content/uploads/2019/03/Katalog_022019.pdf
- [17] imc CRONOSflex - räumlich verteilbares Messsystem. *imc Test & Measurement GmbH - produktiv messen* [online]. Copyright © 2019 [cit. 19.05.2019]. Dostupné z: <https://www.imc-tm.de/produkte/messtechnik-hardware/imc-cronosflex/ueberblick/>
- [18] Heckler & Koch P7 – *Wikipedia*. [online]. [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Heckler_%26_Koch_P7
- [19] Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické | *Automatizace.HW.cz*. *Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci* [online]. Copyright © 1997 [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

B		Buffer
E_0	[J]	Úst'ová kinetická energie střely
E_{dB}	[J]	Disipační energie tlumiče bufferu
E_{kB}	[J]	Energie pružiny bufferu
E_{kv}	[J]	Energie vratné pružiny
E_R	[J]	Kinetická energie rámu zbraně
E_{ZS}	[J]	Kinetická energie závěrové skupiny
F_D	[N]	Síla výstřelu
F_E	[N]	Síla srážky závěrové skupiny a rámu zbraně
F_{Emax}	[N]	Maximum síly srážky závěrové skupiny a rámu zbraně
F_H	[N]	Upravená síla výstřelu
F_p	[N]	Síla tlaku plynů působících na píst
F_T	[N]	Třecí síla mezi střelou a hlavní
F_X	[N]	Zobecněná síla zpětného rázu
H_0	[kg.m.s ⁻¹]	Úst'ová hybnost střely
I_1	[N.s]	Impuls síly udělený celé zbrani
I_2	[N.s]	Impuls síly udělený závěrové skupině
I_b	[N.s]	Impuls síly během odrazu ZS v zadní poloze
I_m	[N.s]	Impuls síly během výstřelu
I_q	[N.s]	Impuls udělený střele
k_R	[N.m ⁻¹]	Tuhost rámu zbraně
k_v	[N.m ⁻¹]	Tuhost vratné pružiny
m_B	[kg]	Hmotnost bufferu
m_{B1}	[kg]	Hmotnost základního tělesa bufferu
m_{B2}	[kg]	Hmotnost pohyblivého tělesa bufferu
m_{NZ}	[kg]	Hmotnost nosiče závorníku
m_q	[kg]	Hmotnost střely
m_R	[kg]	Hmotnost rámu zbraně
m_Z	[kg]	Hmotnost celé zbraně
m_{Za}	[kg]	Hmotnost závorníku
m_ω	[kg]	Hmotnost prachové náplně náboje

NZ		Nosič závorníku
p_{at}	[Pa]	Atmosférický tlak
P_b	[N]	Ekvivalentní síla v průběhu odrazu ZS v zadní poloze
p_D	[Pa]	Tlak v hlavní zbraně
P_m	[N]	Ekvivalentní síla v průběhu výstřelu
p_p	[Pa]	Tlak prachových plynů na píst
q_0	[m]	Souřadnice polohy ramene střelce
q_I	[m]	Souřadnice polohy rámu zbraně
q_{II}	[m]	Souřadnice polohy závěru a základního tělesa bufferu
q_{III}	[m]	Souřadnice polohy pohyblivého tělesa bufferu
R		Rám zbraně
R_E	[J]	Energetická ztráta při srážce
R_Z	[N]	Reaktivní síla od ramene střelce
S&B		Sellier & Bellot
S_D	[m ²]	Průřez střely
S_p	[m ²]	Plocha čela pístu
T	[s]	Časový interval mezi výstřelem a odrazem ZS v zadní poloze
t_0	[s]	Začátek procesu výstřelu
t_b	[s]	Čas odrazu závěrové skupiny v zadní poloze
t_{b1}	[s]	Čas odrazu závěrové skupiny v zadní poloze u prvního náboje
t_{b5}	[s]	Čas odrazu závěrové skupiny v zadní poloze u pátého náboje
t_{bf}	[s]	Konec procesu odrazu ZS v zadní poloze
t_{bi}	[s]	Začátek procesu odrazu ZS v zadní poloze
t_{c5}	[s]	Čas zachycení závěru u posledního náboje v zásobníku
t_d	[s]	Okamžik výrazného vzdálení se střely od ústí hlavně
t_f	[s]	Čas dorazu závěru v přední poloze
t_{f1}	[s]	Čas dorazu závěru v přední poloze u prvního náboje
t_{ff}	[s]	Konec procesu dorazu a uzamčení závěru v přední poloze
t_{fi}	[s]	Začátek procesu dorazu a uzamčení závěru v přední poloze
t_I	[s]	První část etapy působení prachových plynů v pokusu [12]
t_{II}	[s]	Druhá část etapy působení prachových plynů v pokusu [12]
t_m	[s]	Okamžik maxima tlaku v hlavní a síly výstřelu
t_{od}	[s]	Okamžik odemčení závorníku

t_p	[s]	Čas podání náboje ze zásobníku
t_{pI}	[s]	Čas podání náboje ze zásobníku během prvního cyklu
t_u	[s]	Konec procesu výstřelu
t_{upI}	[s]	První část etapy nárazu ZS v přední poloze v pokusu [12]
t_{upII}	[s]	Druhá část etapy nárazu ZS v přední poloze v pokusu [12]
t_{utI}	[s]	První část etapy nárazu ZS v zadní poloze v pokusu [12]
t_{utII}	[s]	Druhá část etapy nárazu ZS v zadní poloze v pokusu [12]
t_Z	[s]	Okamžik iniciace zápalky
v	[m.s ⁻¹]	Relativní rychlost střely vůči pušce
v_0	[m.s ⁻¹]	Úst'ová rychlost střely
W	[m.s ⁻¹]	Rychlost pohybu pušky jakožto nedělitelného tělesa
W_r	[m.s ⁻¹]	Rychlost pohybu pušky po započtení vlivu prachových plynů
x	[m]	Relativní souřadnice polohy střely vůči hlavni
Za		Závorník
ZS		Závěrová skupina
ZZE		Zákon zachování energie
β	[-]	Součinitel suplementárního efektu prachových plynů
∇	[-]	Balistický součinitel proporcionality