

Marcin BAJKOWSKI<sup>1</sup>, Jacek Mateusz BAJKOWSKI<sup>2</sup>, Marek RADOMSKI<sup>3</sup>

## STANOWISKO BADAWCZO-DYDAKTYCZNE DO BADANIA WPLYWU RÓWNOLEGŁEGO UKŁADU STEROWANYCH TŁUMIKÓW MAGNETOREOLOGICZNYCH NA ODRZUT ZESPOŁU RUCHOMEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono stanowisko badawczo-dydaktyczne przeznaczone do identyfikacji podstawowych parametrów charakteryzujących zjawisko odrzutu broni kalibru 12,7 x 99 mm. Stanowisko umożliwia także badanie charakterystyki układu równoległych tłumików magnetoreologicznych zamontowanych w podstawie uniwersalnej broni. W pracy zaprezentowano metodykę badań obejmującą eksperymentalne i teoretyczne metody identyfikacji siły wymuszającej odrzut broni. W badaniach dotyczących analizy przebiegu zjawiska odrzutu wykorzystano układ broni wielkokalibrowej, który pozwala na oddawanie strzałów w warunkach laboratoryjnych, wykorzystując nabój przejściowy o zmniejszonym ładunku miotającym. Badania eksperymentalne przeprowadzono także dla systemu wystrzeliwania granatów nasadkowych. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość zbudowania uniwersalnej podstawy dla broni kalibru 12,7 x 99 mm. Mogą one stanowić także podstawę do sformułowania założeń projektowych dla układu sterowanych tłumików z cieczą magnetoreologiczną, dedykowanych do specjalnych zastosowań.

**Słowa kluczowe:** odrzut, podstawa uniwersalna, tłumienie, tłumik magnetoreologiczny

## THE EXPERIMENTAL-DIDACTIC STAND FOR THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE PARALLEL SET OF MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS ON THE RECOIL OF THE SLIDING UNIT

**Summary.** In this paper, the laboratory stand, dedicated for research and didactic purposes is presented. The stand allows investigating the parameters which characterizes the recoil effect in the 12,7 x 99 mm caliber arm. It is also possible to study the dependencies in the system with the parallel magnetorheological dampers, which are placed in the universal basis for weapon. The methodology of the research, as well as the experimental data and theoretical discussions concerning the components of the recoil force are provided. The part of the research devoted to the recoil effect was performed in a large-caliber arm configuration, which allows to fire shots in a laboratory conditions utilizing training bullets with reduced propellant charge. The experimental studies were also carried out for the rifle grenades. The

<sup>1</sup> Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, e-mail: granada@pompy.pl.

<sup>2</sup> Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, e-mail: jm.bajkowski@gmail.com.

<sup>3</sup> Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, e-mail: mr@wip.pw.edu.pl.

results indicate the possibility of building a universal basis for 12,7 mm x 99 caliber weapons and can provide useful information for formulating the design assumptions for the controlled dampers with magnetorheological fluid, designed for special purposes.

**Keywords:** recoil, basis, thrust, damping, magnetorheological damper

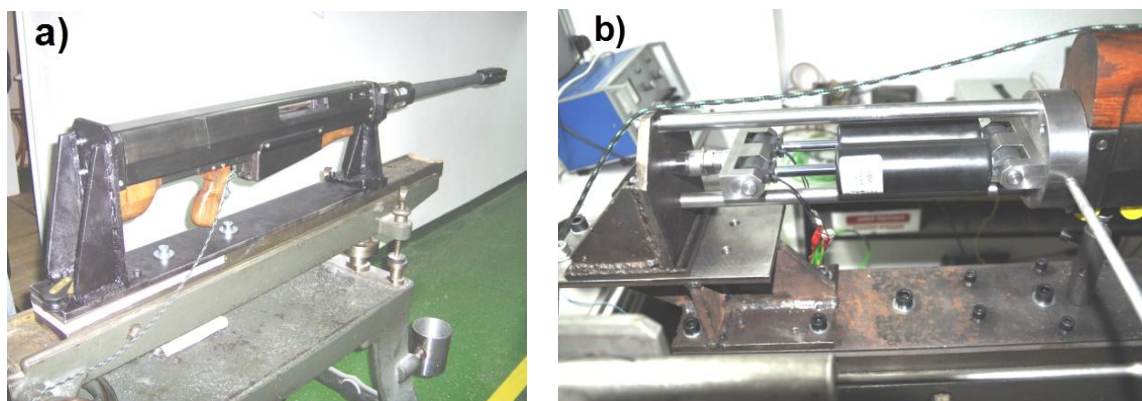
## 1. WPROWADZENIE

Na potrzeby budowy stanowiska badawczo-dydaktycznego wykonano prototypy tłumików magnetoreologicznych (MR), w których zastosowaną cieczą roboczą była ciecz firmy BASF, oznaczona jako Basetic 5030 [6]. Celem badania była ocena efektywności działania zaprojektowanych, prototypowych tłumików MR, przeznaczonych do tłumienia siły odrzutu działającej na zespół ruchomy wielkokalibrowej broni 12,7 mm. Przeprowadzono także szczegółową analizę parametrów konstrukcyjnych wykorzystanych tłumików MR, uwzględniając wpływ wielkości szczeliny przepływowej oraz prądu sterowania cewką tłumika na odpowiedź badanego układu [7, 8].

Na stanowisku użyto specjalnego zestawu oprzyrządowania, pozwalającego na wystrzeliwanie granatów nasadkowych ze zredukowaną ilością ładunku miotającego do 3,5 g w pomieszczeniu o charakterze dydaktycznym (strzelnica laboratoryjna). Na podstawie analiz z zakresu balistyki wewnętrznej [3], dla układu wyposażonego w zestaw do wystrzeliwania granatów nasadkowych, oraz po porównaniu wielkości towarzyszących wystrzeliwaniu granatów z wielkościami charakteryzującymi strzały ze standardowej amunicji 12,7 mm, dobrano wielkości granatu i naważki prochowej. Kryterium doboru było uzyskanie energii wystrzału umożliwiającej prawidłowe działanie wszystkich zespołów obiektu specjalnego, z zachowaniem cyklu samopowtarzalnego, zapewniającego prawidłową pracę mechaniki broni.

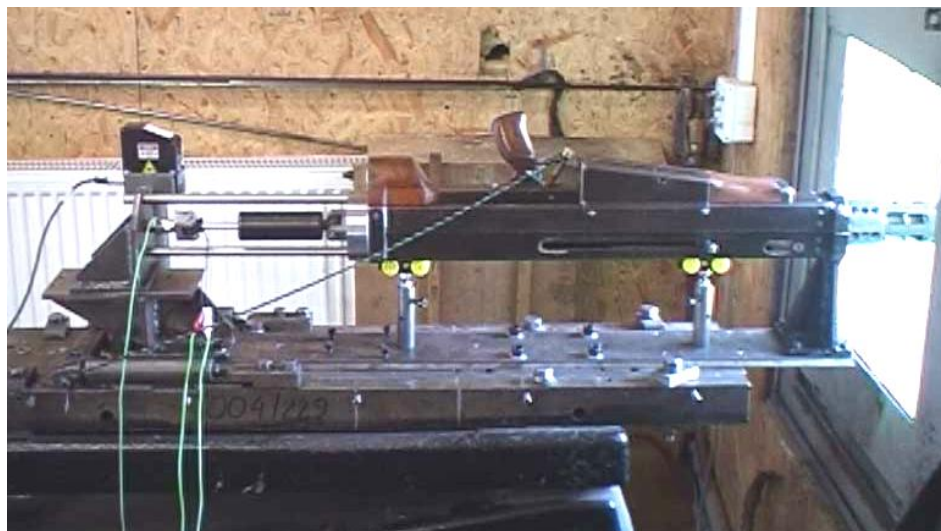
## 2. STANOWISKO BADAWCZO-DYDAKTYCZNE

Zastosowana konstrukcja specjalna jest modelem badawczym karabinu kalibru 12,7 x 99 mm (rys. 1a). Została ona zaprojektowana i w całości wykonana w Instytucie Mechaniki i Poligrafii Politechniki Warszawskiej.



Rys. 1. Obiekt specjalny 12,7 x 99 mm (a) oraz równoległy układ sterowanych tłumików MR (b)  
Fig. 1. Special object 12,7 x 99 mm (a) and the set of parallel MR dampers (b)

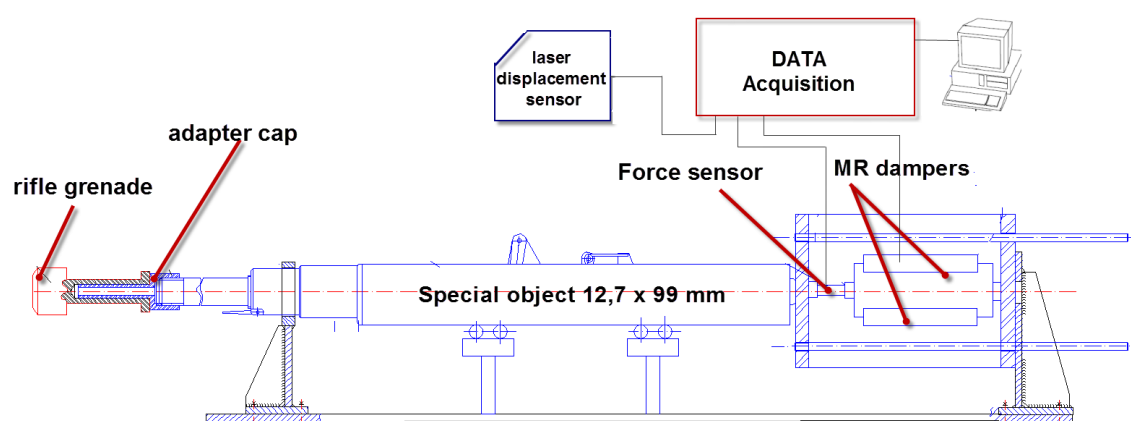
Stanowisko wyposażone jest w układ tłumików magnetoreologicznych o zmiennej sile hamującej siłę pchnięcia (rys. 1b). Zdjęcie stanowiska testowanego w warunkach poligonowych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Konstrukcja specjalna 12,7 x 99 mm, wyposażona w tłumiki MR, podczas strzelania amunicją bojową na poligonowym stanowisku strzeleckim  
 Fig. 2. Special object 12,7 x 99 mm with MR dampers, during tests with combat bullets at the shooting range

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów (rys. 3):

- obiektu specjalnego 12,7 mm wraz z nabojami,
- zespołu dwóch tłumików magnetoreologicznych,
- laserowego czujnika przemieszczenia,
- piezoelektrycznego czujnika do pomiaru sił i przemieszczeń,
- czujnika prędkości wylotowej pocisku,
- podstawy mocującej elementy pomiarowe.



Rys. 3. Schemat stanowiska z konstrukcją specjalną 12,7 x 99 mm  
 Fig. 3. Scheme of the laboratory stand with special object 12,7 x 99 mm

W związku z ograniczeniami dotyczącymi bezpieczeństwa, nałożonymi na prace badawcze przeprowadzane w warunkach strzelnicy laboratoryjnej, zdecydowano się na wykorzystanie komory redukcyjnej (rys. 4a), zmniejszającej kaliber komory nabojojowej

z 12,7 x 99 mm do 7,62 x 54 mm (rys. 4b). Po zmniejszeniu komory nabojeowej wykonana została seria pomiarów siły pchnięcia z zastosowaniem układu specjalnie zaprojektowanego granatu nasadkowego (rys. 5a), montowanego na wylocie lufy za pomocą nasadki (rys. 5b) do wystrzeliwania. Badania przeprowadzane były przy wykorzystaniu amunicji treningowej o nieznacznie zwiększonym ładunku (do 3,5 g). Badania z użyciem granatu nasadkowego mają na celu symulację odrzutu broni, wymuszającą działanie automatyki broni w układzie krótkiego odrzutu lufy.



Rys. 4. Komora redukcyjna (a) oraz wykorzystana amunicja 7,62 x 54 mm (b)  
Fig. 4. Reduction chamber (a) and the used 7,62 x 54 mm ammo (b)



Rys. 5. Użyty granat nasadkowy (a) oraz montowana na wylocie lufy nasadka (b)  
Fig. 5. Rifle grenade (a) and the adapter cap (b)

## 2.1. Obliczenie prędkości początkowej wystrzeliwanego granatu nasadkowego

W rozpatrywanym układzie strzelania odbywają się przy wykorzystaniu amunicji treningowej 7,62 x 54 mm o zwiększonej naważce prochowej do 3,5 g, z zamontowanym na wylocie lufy układem granatu nasadkowego. Z racji tego, że nabój nie zawiera pocisku (ślepy nabój), za wyrzucenie granatu nasadkowego odpowiada energia związana z prędkością rozprężających się gazów powstałych podczas spalania ładunku miotającego.

Na podstawie obliczonej prędkości wylatujących gazów oraz korzystając ze wzorów na prędkość w ruchu jednostajnie przyspieszonym i z II zasady dynamiki, możemy obliczyć siłę, z jaką gazy prochowe wyrzucą granat nasadkowy. Zależność ta przyjmuje postać (1):

$$F = \frac{m_{gz} \cdot V}{t} = 39886 \text{ N}, \quad (1)$$

gdzie:

$m_{gz} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$  – masa gazów,

$V = 5982,87 \text{ m/s}$  – prędkość przemieszczających się gazów prochowych,

$t = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  – czas przemieszczania się gazów prochowych.

Z uwagi na to, że zmiana pędu równa się popędowi (2):

$$m_g \cdot V_{0g} = F \cdot t, \quad (2)$$

gdzie:

$m_g = 0,830$  kg – masa granatu,

$V_{0g}$  – prędkość granatu,

$t_t = 0,008$  s – czas wyjścia granatu z układu,

możliwe jest obliczenie prędkości początkowej wystrzeliwanego granatu nasadkowego z zależności (3):

$$V_{0g} = \frac{F \cdot t_t}{m_g} = 38,44 \frac{m}{s} \quad (3)$$

## 2.2. Szacowanie energii odrzutu swobodnego

Po uwzględnieniu współczynnika powylotowego działania gazów prochowych, wzory na energię odrzutu okresów pierwszego i drugiego przyjmują postać:

$$E_I = \frac{(m + 0,5 \cdot \omega)^2}{2Q_b} \cdot V_{0g}^2 \quad (4)$$

$$E_{II} = \frac{(m + \beta \cdot \omega)^2}{2Q_b} \cdot V_{0g}^2, \quad (5)$$

gdzie:

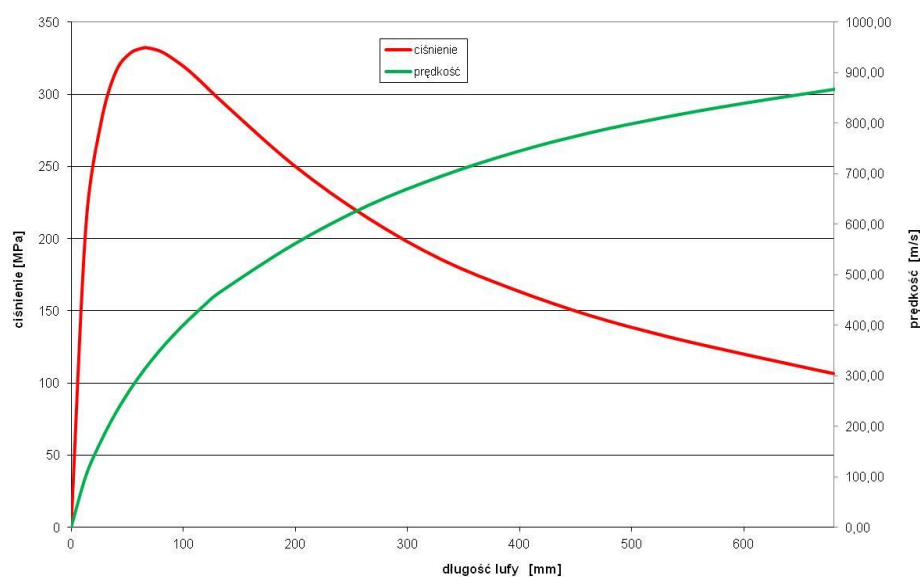
$\omega$  – masa ładunku prochowego,

$Q_b$  – całkowita masa zespołu odrzutowego,

$\beta$  – współczynnik intensywności gazów prochowych,

$m$  – masa wystrzeliwanego obiektu.

Po uwzględnieniu danych zawartych w tablicach GAU [4, 5] przeprowadzono interpolację wyników, otrzymując przebiegi.



Rys. 6. Wykres przebiegu ciśnienia oraz prędkości gazów wylotowych w funkcji długości lufy dla standardowego naboju 12,7 x 99 mm z pociskiem M33 BALL

Fig. 6. Pressure and velocity of the exhaust gasses as a function of the barrel length, for standard ammo 12,7 x 99 mm with M33 BALL bullet

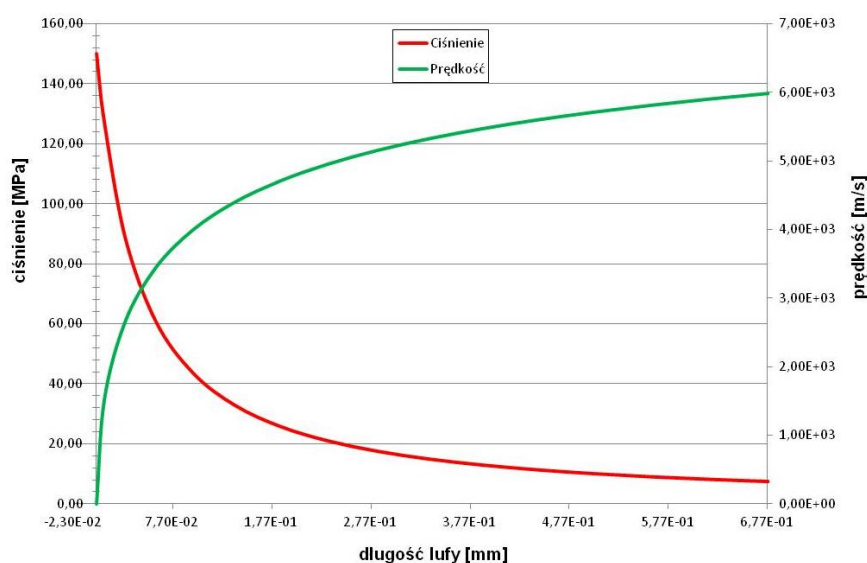
W tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry użytej broni oraz użytego pocisku.

Tabela 1  
Parametry użytej broni oraz zastosowanego pocisku

Ciśnienie wylotowe	$p_w$	106,71 MPa
Pole przekroju poprzecznego lufy	$S$	130,64 mm <sup>2</sup>
Długość całkowita lufy	$L$	779,81 mm
Całkowita masa zespołu odrzutowego	$Q_b$	26057,15 g
Długość części gwintowanej lufy	$L_{gw.}$	647,7 mm
Masa ładunku prochowego	$\omega$	15,335 g
Współczynnik intensywności gazów prochowych	$\beta$	1,5
Masa pocisku	$m_p$	41,81 g

Uzyskane wyniki energii odrzutu dla strzału nabojem 12,7 x 99 mm z pociskiem M33 BALL wynosiły odpowiednio  $E_I = 33,93$  J oraz  $E_{II} = 58,23$  J.

Po uwzględnieniu obliczeń dla ładunku zredukowanego otrzymano przebiegi ciśnienia i prędkości w funkcji długości lufy.



Rys. 7. Wykres przebiegu ciśnienia oraz prędkości gazów wylotowych w funkcji długości lufy dla naboju 7,62 x 54R o powiększonej naważce prochowej do 3,5 g

Fig. 7. Pressure and velocity of the exhaust gases as a function of the barrel length, for standard ammo 7,62 x 54R with increased charge to 3,5 g

Uzyskane wyniki energii odrzutu przy wystrzeliwaniu granatu nasadkowego wynosiły odpowiednio  $E_I = 19,31$  J oraz  $E_{II} = 20,02$  J.

W tabeli 2 zebrano wielkości, jakie charakteryzują zredukowany ładunek miotający.

Tabela 2

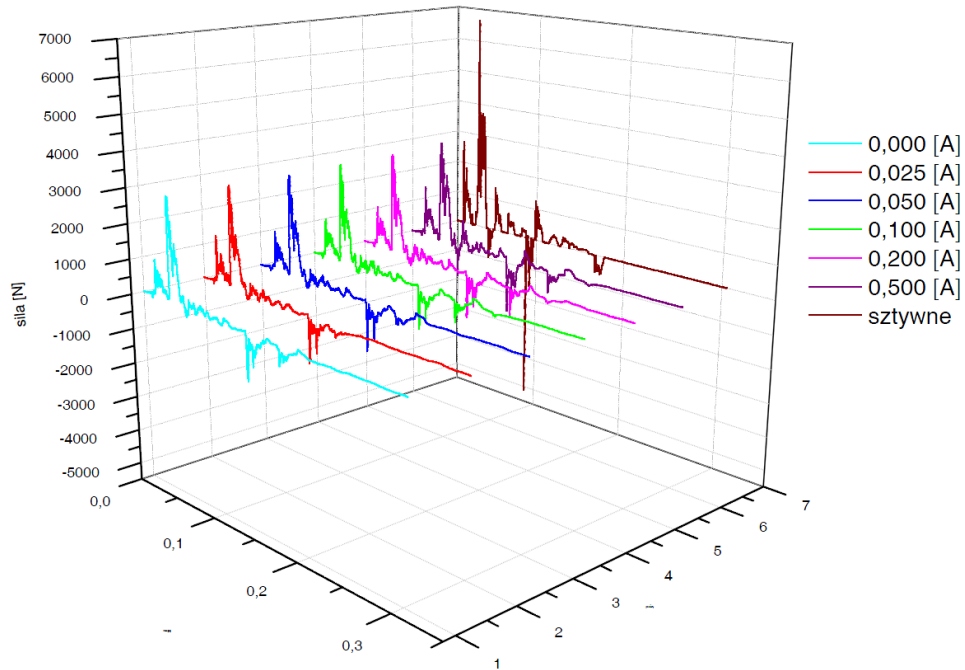
Wielkości charakterystyczne zredukowanego ładunku miotającego

Współczynniki w prawie spalania prochu	$u_1$	$9,4 \cdot 10^{-10} \text{ m/s/Pa}^{u_1}$
	$n_i$	1,0
Grubość warstwy palnej	$e_1$	$8,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Charakterystyki kształtu ziarna prochowego	$\chi$	1,11
	$\lambda$	$-5,61 \cdot 10^{-2}$
	$\mu$	0
Stała gazowa	R	$3,0 \cdot 10^2 \text{ J/kg/K}$
Temperatura wybuchu	$T_1$	$5,62 \cdot 10^3 \text{ K}$
Kowolumen	$\alpha$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Wykładnik adiabaty	k	1,11
Gęstość prochu	$\rho$	$1,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Pow. przekroju lufy	s	$1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
Wsp. prac drugorzędnych	$\varphi$	1,22
Masa prochu	$\omega$	$3,50 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
Objętość komory ładunkowej	$W_o$	$8,63 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
Długość drogi pocisku w lufie	$l_w$	$6,3 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
Ciśnienie wcisku	$p_o$	$1,5 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
Krok całkowania	h	$1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

### 3. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

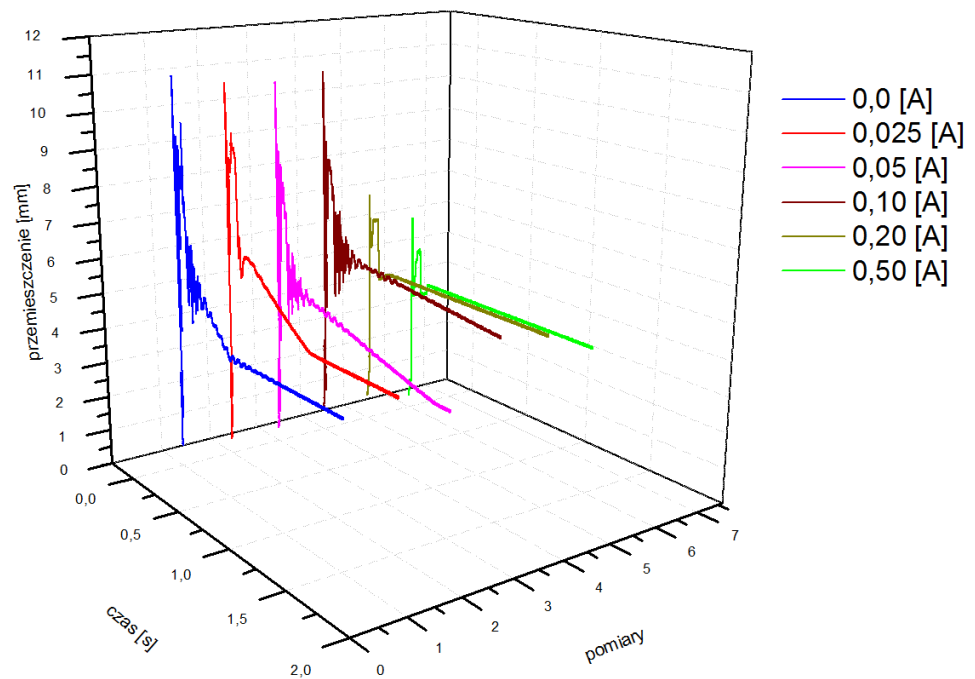
Stanowisko wyposażone jest w laserowy czujnik przemieszczenia, czujnik siły KISTLER 9321A oraz układ dwóch równolegle ustawionych tłumików magnetoreologicznych o wysokości szczeliny 0,3 mm, umocowanych w zespole stabilizującym wraz z przewodnikami osiującymi układ. Celem zapewnienia sztywności podparcia układu użyto podpór z rolkami łożyskowanymi oraz zestawu wkładek teflonowych, zapewniających zmniejszenie wpływu siły tarcia na otrzymywane pomiary.

Głównym celem eksperymentu jest zbadanie działania układu tłumików MR podczas pracy obiektu specjalnego. Doświadczalnie mierzone są siły i przemieszczenia obiektu 12,7 mm podczas pracy w układzie z dwoma tłumikami MR. Dla poszczególnych pomiarów zmieniano wartość natężenia prądu, jaki płynie przez uzwojenie cewki tłumika MR. Na rys. 8 zaprezentowano wyniki otrzymane dla 7 serii pomiarowych.



Rys. 8. Siła pchnięcia w funkcji czasu dla różnych wartości prądu sterowania cewki tłumika  
 Fig. 8. Thrust force over time for different coil current of the damper

Poniżej zaprezentowano wykres ilustrujący wyniki pomiaru przemieszczenia ruchomego elementu podstawy dla 6 serii pomiarowych uzyskanych przy różnych wartościach prądu sterowania.



Rys. 9. Przemieszczenie w funkcji czasu dla różnych wartości prądu  
 Fig. 9. Displacement over time for different coil current



#### 4. PODSUMOWANIE

Wyniki uzyskane dzięki prezentowanemu stanowisku badawczo-dydaktycznemu jednoznacznie pokazują, że zastosowanie w układzie karabinu wielkokalibrowego z krótkim odrzutem lufy układu sterowanych tłumików magnetoreologicznych może w istotny sposób wpływać na zmniejszenie wartości siły pchnięcia oddziałującej na podstawę. Pozwala również ograniczyć przemieszczenie ruchomego elementu podstawy. To stwierdzenie dotyczy obu eksploatacyjnych przypadków broni, tzn. gdy realizowane są strzały pojedyncze amunicją bojową oraz strzały z granatu nasadkowego.

Możliwe jest sformułowanie i rozwiązanie kilku zadań optymalizacyjnych, które doprowadzą do wyznaczenia takich przebiegów prądu sterującego parametrami tłumika, które zapewnią najlepszy, z eksploatacyjnego punktu widzenia, przebieg siły pchnięcia przy jednocześnie najmniejszym przemieszczeniu broni oraz jak najszybszy powrót tłoczyska tłumika do położenia pierwotnego, zarówno dla strzałów pojedynczych, jak i strzałów w serii.

Wykonana analiza zjawiska odrzutu podczas strzelania z broni kalibru 12,7 x 99 mm pozwala zidentyfikować podstawowe parametry charakteryzujące badane zjawisko:

- przebiegi siły wymuszającej  $F(t)$  dla analizowanych ładunków prochowych,
- wartości stałych charakteryzujących oporopowrotnik (sztywność sprężyny  $k$  oraz stałą tłumienia  $c$ ),
- przebiegi siły reakcji łoża dolnego dla analizowanych ładunków prochowych.

Badania wrażliwości przyjętego modelu matematycznego na zmiany parametrów charakteryzujących oporopowrotnik ujawniły możliwość sterowania wielkością dyssypowanej energii podczas strzału. Ponadto, zauważono, że przy strzelaniu ogniem ciągłym duże znaczenie mają wartości siły niezbędnej do powrotu broni w jej pierwotne położenie, w czasie wynikającym z szybkostrzelności broni. Wartości tej siły mają decydujący wpływ na wartości siły reakcji łoża dolnego. Otrzymane wyniki pozwalają również stwierdzić, że możliwa jest optymalizacja charakterystyki oporopowrotnika, w której funkcją celu będzie zminimalizowanie maksymalnej wartości siły reakcji łoża dolnego.

Należy zaznaczyć, że parametry oporopowrotnika powinny spełniać również typowe zalecenia dla amortyzatorów przeznaczonych do tłumienia drgań [1, 2], które wyraża zależność (6):

$$\frac{v}{\omega} = v \sqrt{\frac{M}{k}} > \sqrt{2}, \quad (6)$$

gdzie:

- $v$  – częstotliwość siły wymuszającej,
- $\omega$  – częstotliwość drgań własnych układu,
- $M$  – masa broni,
- $k$  – stała sprężyny oporopowrotnika.

Opracowana metodyka badań zjawiska odrzutu broni palnej, obejmująca doświadczalne, teoretyczne i teoretyczno-doświadczalne metody identyfikacji siły wymuszającej odrzut broni, może być zastosowana z powodzeniem dla innych wzorów uzbrojenia.

#### Bibliografia

1. Kaliski S. (red.): Drgania i fale. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1966.
2. Osiński Z.: Teoria drgań. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978.

3. Szapiro J.: Balistyka zewnętrzna. Wydawnictwo MON, Warszawa 1956.
4. Tabele balistyki wewnętrznej, część I – ciśnienia. Wydawnictwo WAT, Warszawa 1957.
5. Tabele balistyki wewnętrznej, część II – szybkości. Wydawnictwo WAT, Warszawa 1957.
6. <http://ebookbrowse.com/brand-basonetic-brochure-magnetorheological-fluid-basonetic-5030-english-pdf-d273778489>.
7. Pang L., Kamath G.M., Wereley N.M.: Dynamic Characterization and Analysis of Magnetorheological Damper Behavior. The 5<sup>th</sup> SPIE Symposium on Smart Materials and Structures, Passive Damping and Isolation, 1998, p. 3325-3327.
8. Spencer Jr. B.F., Dyke S.J., Sain M.K., Carlson J.D.: Journal of Engineering Mechanics 123 (3), 1997, p. 230-238.