



Dynamika układu mechanicznego: strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna

Marcin BAJKOWSKI*, Janusz KANIEWSKI, Marek RADOMSKI

*Institut Mechaniki i Poligrafii, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa*

** autor korespondencyjny, e-mail: granada@pompy.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 27.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 07.11.2014

DOI: 10.5604/20815891.1149755

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny pozwalający symulować komputerowo ruch układu strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna we wstępnej fazie jego ruchu, gdy świadome reakcje strzelca na wymuszenia siłowe nie występują. Zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń dla strzelca o masie 78 kg i wzroście 185 cm, który strzela ogniem pojedynczym z karabinka M16 lub gładkolufowej broni myśliwskiej kal. 12/70. Otrzymane wyniki wskazują na istotne znaczenie wyszkolenia strzelca, a szczególnie czasu zwłoki świadomej jego reakcji na bodźce siłowe oraz na korzyści z zastosowania amortyzatora z cieczą magnetoreologiczną, o zmiennej w czasie charakterystyce tłumienia.

Słowa kluczowe: mechanika, biomechanika, odrzut broni, tłumik magnetoreologiczny

1. WSTĘP

Zagadnienia odrzutu oraz wzajemnego oddziaływania strzelec – broń palna były od dawna przedmiotem badań [1-8], co wynika z faktu, że reakcje fizyczne i odczucia psychiczne strzelającego mają istotny wpływ na funkcjonalność

Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas X Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Ryn, 15-18 września 2014 r.

omawianego układu, w tym celność [3, 9]. Problematyka ta nabiera szczególnego znaczenia w przypadku strzelania z broni charakteryzującej się dużą energią odrzutu, jak np. granatniki, karabiny snajperskie dużych kalibrów, rusznice przeciwpancerne, gładkolufowa broń myśliwska. Występujące wówczas niekorzystne oddziaływanie broni na strzelca zmniejsza się poprzez zainstalowanie w broni różnego typu amortyzatorów odrzutu, hamulców wylotowych, jak również wprowadzenie przepisów ograniczających użytkowanie broni. Przykładem tych ostatnich są wytyczne zamieszczone w amerykańskiej instrukcji: „Test Operations Procedure” (TOP) 3-2-504 (1977), w której podano bezpieczne limity dzienne dla liczby oddanych strzałów przez strzelca podczas badań (tabela 1). W tym miejscu należy zaznaczyć, że nie są to ograniczenia dla żołnierza na polu walki, a jedynie standardy wynikające z bezpieczeństwa i higieny pracy.

Tabela 1. Limity dzienne oddanych strzałów przez strzelca, strzelającego z broni ramiennej, wg instrukcji TOP 3-2-504

Table 1. Daily limits of number of shots fired from shoulder supported weapon, according to TOP 3-2-504 instructions

Obliczona energia odrzutu swobodnego [J]	Limit dzienny oddanych strzałów przez strzelca
mniej niż 20,3	bez ograniczeń
od 20,3 do 40,7	200
od 40,7 do 61,0	100
od 61,0 do 81,4	20
więcej niż 81,4	strzelanie niedozwolone

W procesie projektowania amortyzatora odrzutu podstawowe znaczenie ma prawidłowy dobór podstawowych charakterystyk technicznych tego urządzenia, który zapewni osiągnięcie zakładanego efektu. W tym celu bardzo przydatnym narzędziem jest model matematyczny opisujący dynamikę układu mechanicznego: strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna, który umożliwia symulację komputerową zjawiska. W literaturze można znaleźć wiele propozycji rozwiązania tego problemu z wykorzystaniem osiągnięć biomechaniki ruchu człowieka. Ogólnie są to modele o parametrach skupionych, w których ciała sztywne (poszczególne części układu) są połączone więzami. Wzajemne oddziaływania siłowe poszczególnych części układu modelowane są za pomocą elementów sprężystych (sprężyn) i dyssypacyjnych (tłumików wiskotycznych), które są łączone równolegle, szeregowo i szeregowo-równolegle, tworząc modele: Voigta, Maxwella, Zernera itd. W niektórych modelach uwzględniane są jeszcze sprzężenia zwrotne ciała człowieka (mięśni) na wymuszany ruch, przy czym mogą one wynikać z instynktownych i wytrenowanych zachowań, jak również świadomych decyzji strzelca.

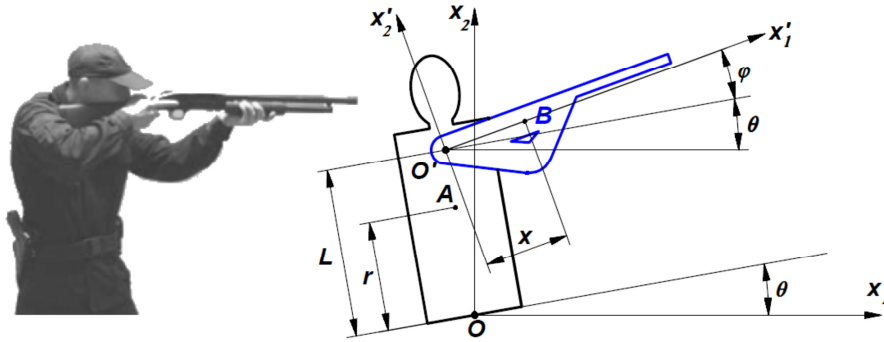
Ponadto na układ oddziałują: ziemskie pole grawitacyjne, reakcje podłoża i siła odrzutu oraz ewentualnie siła wymuszająca ruch automatyki, gdy broń jest samoczynna. Liczba stopni swobody tych modeli waha się od jednego [3] do kilkuset [10]. Poza modelami deterministycznymi pojawiają się także modele stochastyczne [11], w których uwzględnia się losowy rozrzut parametrów modelu i sił wymuszających.

W dalszej części zostanie przedstawiona modyfikacja płaskiego modelu, o trzech stopniach swobody, który zaproponowali Hutchings i Rahe w pracy [6]. Uznano bowiem, że we wstępnej fazie projektowania amortyzatora odrzutu adaptacja tego modelu będzie odwzorowywała zachowanie się układu mechanicznego: strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna z dokładnością wystarczającą do zastosowań praktycznych.

2. SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA

Jak już wspomniano, punktem wyjścia był model zaproponowany w pracy [6], w którym pominięto wpływ świadomych siłowych reakcji strzelca na wymuszenia. Autorzy uzasadnili to faktem, że zwłoka, z jaką te reakcje się pojawiają, jest znacznie większa (0,1 do 0,45 s) od czasu trwania wystrzału (kilka milisekund) i ich wpływ na dynamikę systemu obserwowany jest dopiero po dłuższym czasie. Ponadto swój model zweryfikowali doświadczalnie za pomocą szybkiej fotografii cyfrowej, dzięki czemu mogli również ograniczyć liczbę stopni swobody układu poprzez pominięcie w modelu kończyn dolnych strzelca. Działanie amortyzatora odrzutu polega na zmniejszeniu niekorzystnego oddziaływania broni na strzelca, a co za tym idzie – jego wpływ na dynamikę układu powinien być również największy w czasie, gdy reakcje siłowe strzelca jeszcze nie występują. Model przeznaczony do symulacji komputerowej układu strzelec – amortyzator – broń, który pozwoli oceniać prawidłowość doboru charakterystyk technicznych amortyzatora, może zatem obejmować jedynie początkową fazę ruchu, w której świadome reakcje siłowe strzelca nie występują.

Model Hutchingsa i Rahe'a opisuje układ mechaniczny strzelec – broń, dla przypadku strzelania w pozycji stojącej wysokiej (rys. 1). Układ ten składa się z dwóch ciał sztywnych. Ciało *A* obejmuje korpus, szyję i głowę strzelca i może się obracać jedynie wokół nieruchomego przegubu w punkcie *O*, w którym znajduje się początek inercjalnego układu odniesienia $Ox_1x_2x_3$. Współrzędną uogólnioną opisującą w pełni ruch tego ciała jest kąt θ .



Rys. 1. Schemat układu mechanicznego: strzelec – broń palna,
 A, B – środki mas ciał sztywnych A oraz B (obraz strzelca zaczerpnięto z [12])

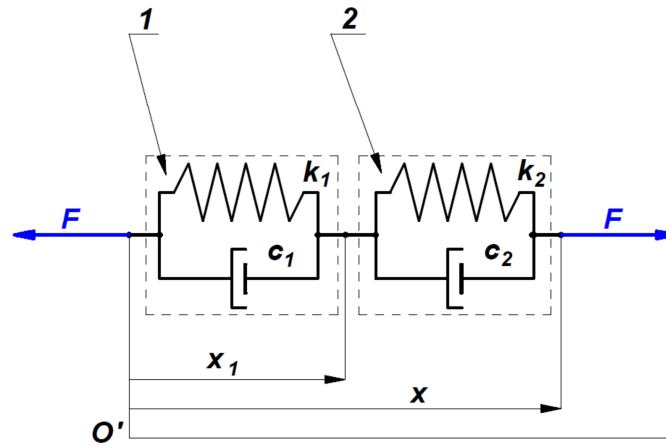
Fig. 1. Mechanical configuration of the system: shooter-weapon,
 A, B – centres of mass of rigid bodies (photo of the shooter taken from [12])

W skład ciała B wchodzi obydwie ręce strzelca (ramiona, przedramiona i dłonie) oraz broń. Ciało to jest połączone z ciałem A przegubem w punkcie O' , w którym znajduje się początek ruchomego układu odniesienia $O'x'_1x'_2x'_3$. W układzie tym ciało B może przemieszczać się jedynie wzdłuż osi Ox'_1 , co opisuje współrzędna uogólniona x . Układ odniesienia $O'x'_1x'_2x'_3$ może obracać się jedynie względem ciała A . Ruch ten opisuje współrzędna uogólniona φ . Wzajemne oddziaływanie ciał A i B w przegubie O' oraz oddziaływanie ciała A z dolną częścią ciała strzelca w przegubie O uwzględniono poprzez wprowadzenie elementów Voigta. Ponadto w przegubie O' umieszczono dodatkowo jeszcze jeden element Voigta, odwzorowujący wzajemne oddziaływanie barku strzelca i broni w ruchu postępowym opisywanym współrzędną uogólnioną x .

Modyfikacja opisanego modelu polegała na szeregowym dołączeniu dodatkowego elementu Voigta, który uwzględniał oddziaływanie amortyzatora odrzutu w kierunku osi $O'x'_1$, jak to ilustruje rysunek 2.

Ze względu na małą masę amortyzatora w stosunku do mas ciał A i B , uwzględniono jej wpływ na ruch układu poprzez dodanie jej do ciała B .

Szeregowe połączenie elementów Voigta charakteryzuje się tym, że w każdym elemencie występuje taka sama siła F , a suma strzałek ugięcia poszczególnych elementów jest równa strzałce ugięcia całego zestawu.



Rys. 2. Schemat zmodyfikowanego modelu oddziaływania barku strzelca i broni w ruchu postępowym, opisywanym współrzędną uogólnioną x : 1 – element Voigta istniejący w modyfikowanym modelu, 2 – dodatkowy element Voigta uwzględniający oddziaływanie amortyzatora odrzutu, k_1, k_2 – sztywności sprężyn, c_1, c_2 – współczynniki tłumienia wiskotycznego

Fig. 2. Modified model of the shooters shoulder and weapon interaction in a linear motion, described by generalized coordinate x : 1 – Voigt element in the modified model, 2 – additional Voigt model describing influence of the recoil damper, k_1, k_2 – stiffness of the springs, c_1, c_2 – viscous damping coefficients

Można więc napisać, że:

$$F = k_1(x_1 - x_{10}) + c_1\dot{x}_1 = k_2(x - x_0 - x_1 + x_{10}) + c_2(\dot{x} - \dot{x}_1) \quad (1)$$

gdzie:

- k_1, k_2 – sztywności sprężyn,
- c_1, c_2 – współczynniki tłumienia wiskotycznego,
- x_0, x_{10} – położenia początkowe elementów Voigta (gdy $F = 0$).

Równanie (1) jest w istocie równaniem więzów kinematycznych analizowanego układu mechanicznego.

3. RÓWNANIA RUCHU MODELU

Uwzględnienie równania (1) w modelu Hutchingsa i Rahe'a i powtórne wyprowadzenie równań ruchu za pomocą równań Lagrange'a drugiego rodzaju prowadzi do następującego układu równań różniczkowych zwyczajnych opisujących dynamikę układu mechanicznego, o trzech stopniach swobody: strzelec – amortyzator odrzutu – broń:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{c_1 + c_2} [k_2(x - x_1 - x_0 + x_{10}) - k_1(x_1 - x_{10}) + c_2 \dot{x}] \quad (2)$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{1}{D} (b_{11}f_x + b_{12}f_\theta + b_{13}f_\varphi) \quad (3)$$

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \frac{1}{D} (b_{12}f_x + b_{22}f_\theta + b_{23}f_\varphi) \quad (4)$$

$$\frac{d\dot{\varphi}}{dt} = \frac{1}{D} (b_{13}f_x + b_{23}f_\theta + b_{33}f_\varphi) \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \quad (7)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} \quad (8)$$

gdzie:

$$k_1 = \begin{cases} k_{xw} & \text{dla } x_1 \geq x_s \\ k_{xs} & \text{dla } x_1 < x_s \end{cases} \quad (9)$$

$$D = m_B (I_A + m_A r^2) (I_B + m_B x^2) + I_B m_B^2 L^2 \sin^2 \varphi \quad (10)$$

$$b_{11} = (I_A + m_A r^2 + m_B L^2) I_B + m_B x^2 (I_A + m_A r^2 + m_B L^2 \cos^2 \varphi) \quad (11)$$

$$b_{12} = (I_B + m_B x^2) m_B L \cos \varphi \quad (12)$$

$$b_{13} = -[I_B + m_B (x + L \sin \varphi) x] m_B L \cos \varphi \quad (13)$$

$$b_{22} = m_B (I_B + m_B x^2) \quad (14)$$

$$b_{23} = -m_B [I_B + m_B x (x + L \sin \varphi)] \quad (15)$$

$$b_{33} = m_B [I_A + m_A r^2 + I_B m_B (x + L \sin \varphi)^2] \quad (16)$$

$$f_x = -F_z(t) - R_p + m_B x (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 + m_B \dot{\theta}^2 L \sin \varphi + \quad (17)$$

$$-m_B g [\sin(\theta + \varphi) - \sin(\theta_0 + \varphi_0)]$$

$$f_\theta = LR_p \cos \varphi + M_p - 2m_B \dot{x} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) (x + L \sin \varphi) + \quad (18)$$

$$-m_B L x \dot{\varphi} (2\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \cos \varphi - c_\theta \dot{\theta} - k_\theta (\theta - \theta_0) +$$

$$+ (m_A r + m_B L) g (\sin \theta - \sin \theta_0) +$$

$$-m_B g x [\cos(\theta + \varphi) - \cos(\theta_0 + \varphi_0)]$$

$$f_\varphi = \delta F(t) - 2m_B x \dot{x} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + m_B L x \dot{\theta}^2 \cos \varphi + \quad (19)$$

$$-M_p - m_B g x [\cos(\theta + \varphi) - \cos(\theta_0 + \varphi_0)]$$

$$F_z(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t > t_b \\ \frac{F_A}{2} [1 - \cos(\omega t)] & \text{dla } t \leq t_b \end{cases} \quad (20)$$

$$F_A = p_{mz}s; \quad t_b = \frac{2J_F}{F_A}; \quad \omega = \frac{2\pi}{t_b} \quad (21)$$

$$R_p = \begin{cases} k_{xw}(x_1 - x_{10}) + c_1 \dot{x}_1 & \text{dla } x_1 \geq x_s \\ k_{xs}(x_1 - x_s) + k_{xw}(x_s - x_{10}) & \text{dla } x_1 < x_s \end{cases} \quad (22)$$

$$M_p = k_\varphi(\varphi - \varphi_0) + c_\varphi \dot{\varphi} \quad (23)$$

m_A, m_B, I_A, I_B – masy i główne centralne momenty bezwładności ciał A i B ;
 k_{xw}, k_{xs}, c_1 – sztywności sprężyn i współczynnik tłumienia wiskotycznego elementu Voigta, opisującego oddziaływanie barku strzelca w kierunku współrzędnej x_1 ;

x_s – współrzędna charakteryzująca zmianę sztywności sprężyny, co wynika z charakterystyki barku strzelca i ubrania;

$k_\theta, k_\varphi, c_\theta, c_\varphi$ – sztywności sprężyn i współczynniki tłumienia wiskotycznego elementów Voigta, opisujące oddziaływanie strzelca w przegubach O i O' (rys. 1);

k_2, c_2 – sztywność sprężyny i współczynnik tłumienia wiskotycznego elementu Voigta, opisującego oddziaływanie amortyzatora odrzutu;

r, L – odległości środka masy ciała A oraz przegubu O_1 od przegubu O ;

g – przyspieszenie ziemskie;

p_{mz} – ciśnienie maksymalne działające na zamek broni;

s – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu lufy;

J_F – impuls siły wymuszającej podczas odrzutu swobodnego broni;

F_A – maksymalna siła wymuszająca;

t_b – czas balistyczny;

$x_{10}, x_0, \theta_0, \varphi_0$ – początkowe wartości poszczególnych wielkości, które zapewniają również równowagę statyczną układu dla $t = 0$ oraz: $F(t) = 0$;

$\dot{x}_1 = 0; \quad \dot{x} = 0; \quad \dot{\theta} = 0; \quad \dot{\varphi} = 0.$

W przedstawionym modelu przyjęto dodatkowo, że siła wymuszająca $F_z(t)$ jest przybliżana funkcją harmoniczną zaproponowaną przez Boutteville'a [13]. Stałe F_A i t_b występujące we wzorze (20) można obliczać ze wzorów (21), zaproponowanych w pracy [14].

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ RUCHU UKŁADU MECHANICZNEGO Z WYKORZYSTANIEM ZAPROPONOWANEGO MODELU

Do symulacji komputerowej ruchu układu mechanicznego: strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna wykorzystano system MATLAB firmy MathWorks, Inc. dla mikrokomputerów klasy IBM PC. Stosowano przy tym biblioteczną funkcję ode45.

Tabela 2. Dane liczbowe używane podczas symulacji komputerowej

Table 2. Collected data used in computer simulations

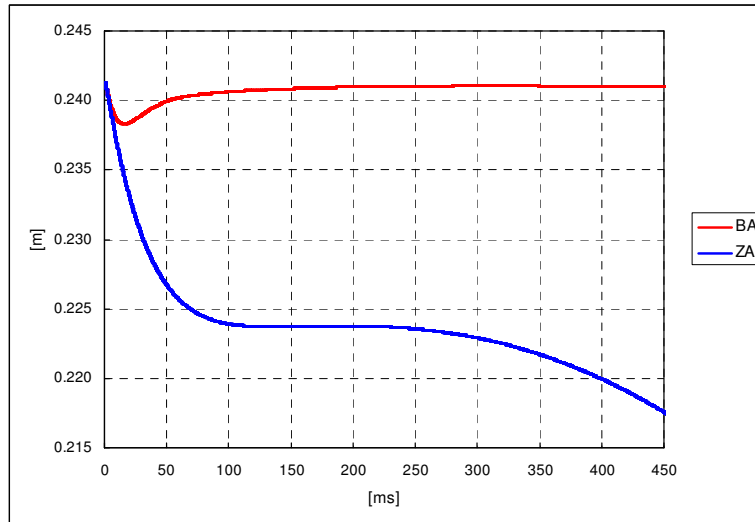
Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Typ broni	
			M16	Broń myśliwska kal. 12/70
Masa ciała A	m_A	kg	44,15	
Moment bezwładności	I_A	kg·m ²	2,3304	
Masa ciała B	m_B	kg	14,97	
Moment bezwładności	I_B	kg·m ²	1,2428	
Odległość	L	mm	533,4	
Odległość	r	mm	355,6	
Odległość	x_0	mm	241,3	
Odległość	$x_0 - x_s$	mm	1,0	
Odległość	$x_0 - x_{10}$	mm	-	50
Odległość	$x_{10} - x_s$	mm	-	1,0
Odległość	δ	mm	32,0	
Maksymalna siła wymuszająca	F_A	N	8088,629	13452,46
Czas balistyczny	t_b	ms	1,319845	2,426147
Przyspieszenie ziemskie	g	m/s ²	9,81	
Sztywność sprężyny	k_θ	N·m/rd	23,5	
Sztywność sprężyny	k_ϕ	N·m/rd	23,5	
Sztywność sprężyny	k_{xw}	N/m	14610,0	
Sztywność sprężyny	k_{xs}	N/m	43830,0	
Sztywność sprężyny	k_2	N/m	14000,0	
Wsp. tłumienia	c_θ	N·m·s/rd	100,0	
Wsp. tłumienia	c_ϕ	N·m·s/rd	30,0	
Wsp. tłumienia	c_1	N·s/m	1000,0	
Wsp. tłumienia	c_2	N·s/m	1600,0	

Symulację przeprowadzono dla przypadków strzelania ogniem pojedynczym przez strzelca o całkowitej masie ciała 78 kg i wzroście 185 cm, z karabinka M16 lub z gładkolufowej broni myśliwskiej kal. 12/70. W każdym przypadku analizowano dwa warianty układu, to jest: bez amortyzatora i z amortyzatorem. Dane liczbowe charakteryzujące strzelca i karabinek M16 zaczerpnięto z pracy [6], zaś broń myśliwską kal. 12/70 – z prac [15-17]. Przyjęto przy tym, że ciała A i B są charakteryzowane takimi samymi masami, momentami bezwładności i odległościami: r , L , x_0 . Dane liczbowe używane w obliczeniach zestawiono w tabeli 2.

Symulacje prowadzono w przedziale czasu od 0 do 0,45 s, gdyż zgodnie z danymi podawanymi w literaturze [18], zwłoka w pojawieniu się świadomej reakcji człowieka na bodźce zewnętrzne wynosi od 0,1 do 0,45 s. Ponadto założono następujące warunki początkowe, dla $t = 0$:

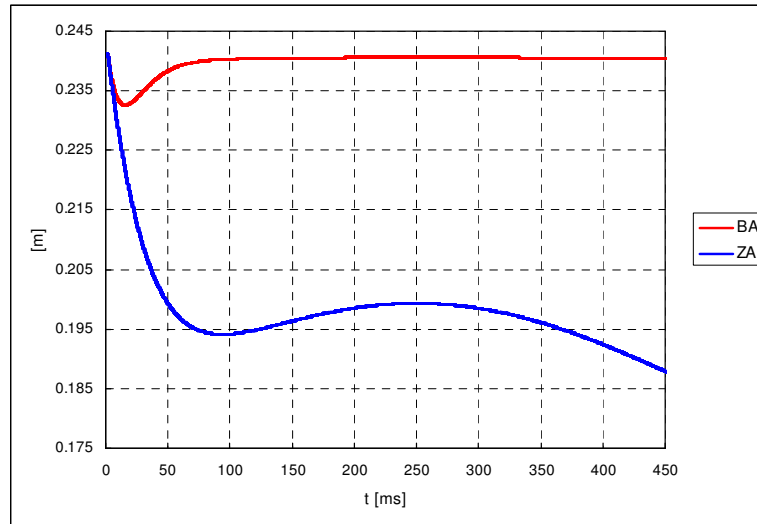
$$\dot{x}_1 = \dot{x} = \dot{\theta} = \dot{\varphi} = \theta = \varphi = 0; \quad x_1 = x_{10}; \quad x = x_0.$$

Na kolejnych rysunkach zamieszczono przykładowe wyniki symulacji komputerowej, dla podanych danych liczbowych. Na szczególną uwagę zasługują przebiegi przemieszczenia broni opisywane współrzędną x oraz kąt jej pochylenia ($\theta + \varphi$), jak również siły oddziaływania broni lub broni i amortyzatora odrzutu na bark strzelca $R(t)$.



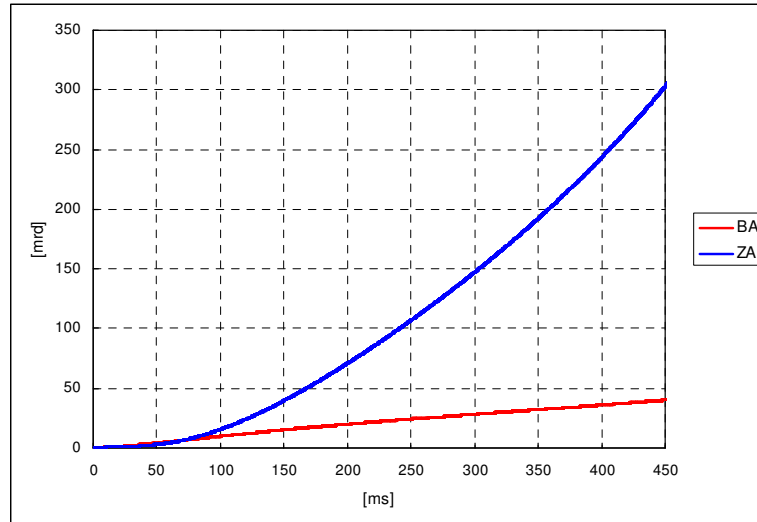
Rys. 3. Przemieszczenie $x(t)$ ciała B , dla siły wymuszającej $F(t)$ karabinka M16: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 3. Displacement $x(t)$ of body B , under excitation $F(t)$ for M16 weapon: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper



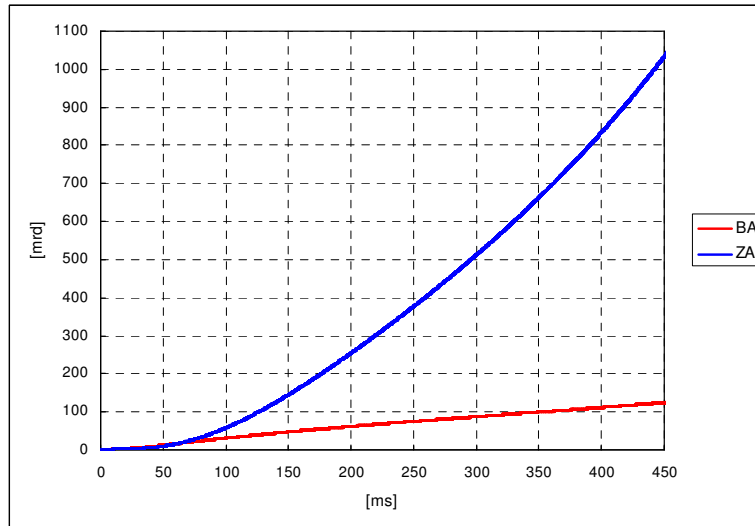
Rys. 4. Przesunięcie $x(t)$ ciała B , dla siły wymuszającej $F(t)$ gładkolufowej broni myśliwskiej kal. 12/70: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 4. Displacement $x(t)$ of body B under excitation $F(t)$ for a smooth-bored hunting weapon cal. 12/70: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper



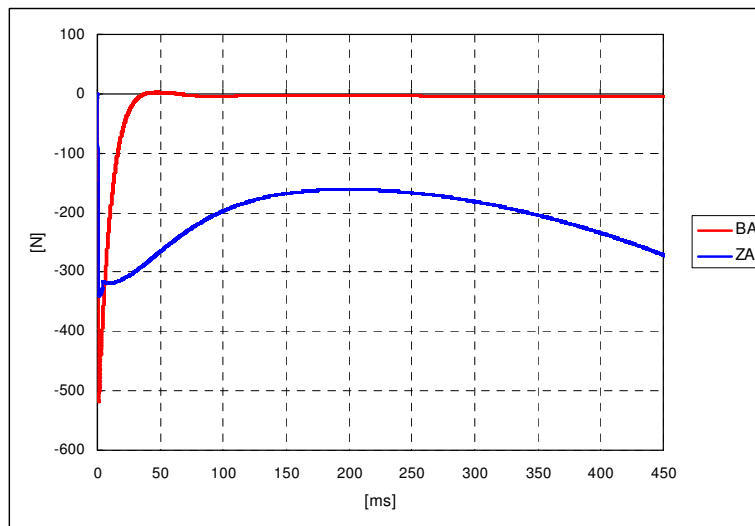
Rys. 5. Pochylenie $\theta(t) + \varphi(t)$ ciała B , dla siły wymuszającej $F(t)$ karabinka M16: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 5. Lean angle $\theta(t) + \varphi(t)$ for body B , under excitation $F(t)$ for M16 weapon: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper



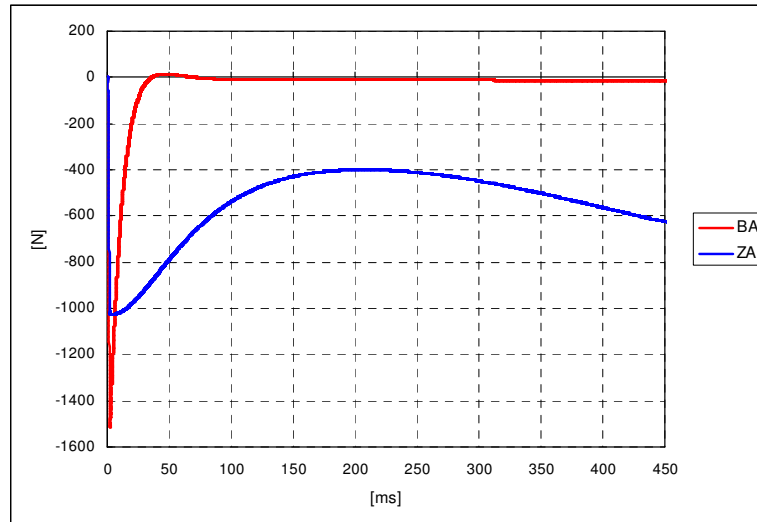
Rys. 6. Pochylenie $\theta(t) + \varphi(t)$ ciała B , dla siły wymuszającej $F(t)$ gładkolufowej broni myśliwskiej kal. 12/70: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 6. Lean angle $\theta(t) + \varphi(t)$ for body B under excitation $F(t)$ for a smooth-bored hunting weapon cal. 12/70: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper



Rys. 7. Siła reakcji ramienia strzelca $R(t)$, dla siły wymuszającej $F(t)$ karabinka M16: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 7. Reaction force of the shooters shoulder $R(t)$, for excitation $F(t)$ for M16 weapon: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper



Rys. 8. Siła reakcji ramienia strzelca $R(t)$, dla siły wymuszającej $F(t)$ broni myśliwskiej kal. 12/70: BA – bez amortyzatora odrzutu, ZA – z amortyzatorem odrzutu

Fig. 8. Reaction force of the shooters shoulder $R(t)$, for excitation $F(t)$ for a smooth-bored hunting weapon cal. 12/70: BA – without recoil damper, ZA – with recoil damper

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki symulacji komputerowej wskazują, że opracowany model pozwala oceniać jakościowo wpływ amortyzatora odrzutu na ruch badanego układu mechanicznego w jego wstępnej fazie, która nie obejmuje jeszcze świadomych reakcji człowieka na wymuszenia siłowe. Otrzymane wyniki pozwalają sformułować między innymi następujące wnioski:

1. Zmniejszeniu siły reakcji ramienia strzelca $R(t)$, poprzez zastosowanie amortyzatora odrzutu, towarzyszy wzrost modułu przemieszczenia broni względem jej położenia początkowego, jak również jej kąta pochylenia. Zjawiska te mogą powodować zmniejszenie celności układu w kolejnym strzale. Chcąc więc zachować celność z pierwszego strzału, należy liczyć się z koniecznością wydłużenia czasu naprowadzania broni na cel przez strzelającego, a co za tym idzie – ogólna szybkostrzelność układu zmaleje.
2. Dobre wyszkolenie strzelca, które skróci czas zwłoki jego świadomej reakcji na wymuszenie siłowe do około 0,1 s, istotnie zmniejsza niekorzystne zjawiska wymienione w poprzednim punkcie. Podobny skutek można również osiągnąć, stosując amortyzator odrzutu o zmiennej charakterystyce tłumienia, jak np. amortyzator z cieczą magnetoreologiczną.

3. Dobór charakterystyki technicznej amortyzatora odrzutu jest pewnym kompromisem pomiędzy komfortem strzelca oraz celnością i szybkostrzelnością układu.

Podsumowując, można stwierdzić, że przedstawione wyniki zachęcają do kontynuowania prac w kierunku uwzględnienia w modelu świadomej reakcji człowieka na wymuszenie siłowe, jak również zmiennych w czasie charakterystyk amortyzatora odrzutu z cieczą magnetoreologiczną. Oczywiście prace te powinny obejmować także badania doświadczalne w celu weryfikacji danych liczbowych charakteryzujących analizowany układ mechaniczny: strzelec – amortyzator odrzutu – broń palna.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez NCBiR z programu badań stosowanych nr PBS1/A6/10/2012.

LITERATURA

- [1] Journée General V., Les sensations de recul dans le tir. Leur rapport avec les valeurs mécaniques du recul, *L'année psychologique*, vol. 24, pp. 91-127, 1923.
- [2] Blagonravov A.A., *Osnovaniya proektirovaniya avtomatičeskovo oružija*, GIOP, Moskva, 1940.
- [3] Gay H.P., Lentz S.S., Werner W.M., *An Interim Report in the Study of Parameters That Affect the Accuracy of Automatic Rifles*, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, ADA 375295, 1961.
- [4] Burrard G., *Modern Shotgun, The Gun and the Cartridge*, vol. 3, Jenkins H., London, 1966.
- [5] Kochański S., *Oddziaływanie człowieka na ruch urządzeń mechanicznych odrzucanych impulsem gazów*, praca doktorska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, 1968.
- [6] Hutchings T.D., Rahe A.E., *Study of Man-Weapon Reaction Forces Applicable to the Fabrication of a Standard Rifle Firing Fixture*, General T.J. Rodman Laboratory, Rock Island Arsenal, Rock Island, ADA 034523, 1975.
- [7] Czepukajtis W., *Oddziaływanie operatora na przemieszczenia lekkich urządzeń mechanicznych*, praca doktorska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, 1974.
- [8] Kochański S., *Odrzut hamowany ramiennej broni palnej*, *Prace Naukowe, Technika Specjalna*, nr 2, Politechnika Warszawska, Instytut Budowy Sprzętu Mechanicznego, Warszawa, 1979.

- [9] Blankenship K., Evans R., Allison S., Murphy M., Isome H., Dinauer P., Harper W., Ortega S., *Shoulder-Fired Weapons with High Recoil Energy: Quantifying Injury and Shooting Performance*, U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine, Natick, ADA 425518, 2004.
- [10] Lee Y., Choi Y., A study on the human impulse characteristics of standing shooting posture, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 4, pp. 7-12, 2004.
- [11] Zakharenkov V.F., Arseniev S.E, Belov A. V., Agoshkov O.C., Lee Y.S., Kim I.W., Chae J.W., Modeling and numerical investigation of the stochastic biomechanical interaction human-rifle system, *Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics*, Destech Publications, Inc. September, 2002.
- [12] Decyzja nr 713/2005 Komendanta Głównego Policji z dnia 30 grudnia 2005 r. w sprawie szkolenia strzeleckiego policjantów (Dz. Urz. KGP z 2006 r., nr 3, poz. 9).
- [13] *Waffentechnisches Taschenbuch*, red. R. Germershausen, Rheinmetall, Düsseldorf, 1980.
- [14] Bajkowski M., Radomski M., Preliminary analysis of the special object recoil effect for series of shots, *Machine Dynamics Research*, vol. 36, no. 4, pp. 14-23, 2012.
- [15] Radomski M., *Określenie przyczyn rozrywania się broni myśliwskiej śrutowej i opracowanie wstępnych założeń programu badań eliminujących naboje mogące powodować zniszczenie broni w czasie strzału*, raport z pracy nr 501/101/65-66/6, maszynopis IBSM PW, Warszawa, 1989.
- [16] Hall M.J., Measuring felt recoil of sporting arms, *International Journal of Impact Engineering*, 35, pp. 540-548, 2008.
- [17] Burns B.P., *Recoil Considerations for Shoulder-Fired Weapons*, Report No. ARL-CR-692, U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 2012.
- [18] Hempel L., *Człowiek i maszyna. Model techniczny współdziałania*, WKiŁ, Warszawa, 1984.

The Dynamics of Mechanical System: Shooter – Recoil Damper – Firearm

Marcin BAJKOWSKI, Janusz KANIEWSKI, Marek RADOMSKI

Abstract. A mathematical model is presented, allowing computer simulations of the system shooter – recoil damper – firearm at an early stage of its motion, when no conscious reactions to input forces occur on the shooter's side. Exemplary computation results are given for a shooter of a mass of 78 kg and a height of 185 cm, firing an M16 rifle or a 12/70 smoothbore hunting weapon, single shot mode. Those results point out the significance of the shooter's training, especially the delay time resulting from conscious response to forcing stimuli, and the benefits accruing from using a damper filled with magnetorheological fluid having time-variable damping characteristics.

Keywords: mechanics, biomechanics, firearm recoil, magnetorheological damper

