



Analiza numeryczna działania układu tłoka gazowego z suwadłem w karabinkach podstawowych Modułowego Systemu Broni Strzeleckiej kalibru 5,56 mm

Jerzy MAŁACHOWSKI¹, Paweł PŁATEK², Ryszard WOŹNIAK²
Mirosław ZAHOR²

¹ *Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,*

² *Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Uzbrojenia
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

Streszczenie. Celem artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania symulacji komputerowej do opisu działania układu tłoka gazowego z suwadłem w opracowywanych karabinkach podstawowych Modułowego Systemu Broni Strzeleckiej kalibru 5,56 mm (MSBS-5,56). Zaprezentowano możliwości wykorzystania aplikacji CAE – programu MSC.visual Nastran – w procesie rozwiązywania dynamicznych równań ruchu tłoka gazowego i suwadła zgodnie z teorią Newtona–Eulera. Przedstawiono etapy przygotowywania modelu numerycznego wraz z przyjętymi warunkami początkowo-brzegowymi oraz porównano wyniki symulacyjne z doświadczalnymi.

Słowa kluczowe: projektowanie broni strzeleckiej, analiza numeryczna, metoda układów wielocłonowych

1. WSTĘP

Współcześnie projektowane systemy broni strzeleckiej charakteryzują się nowatorskimi rozwiązaniami, które często wpływają w znaczący sposób na kształt geometrii współpracujących elementów i mechanizmów broni. Oprócz powszechnie stosowanych aplikacji CAD (*Computer Aided Design*) inżynierowie zaangażowani w proces projektowania urządzeń specjalnych korzystają z dodatkowych narzędzi CAE (*Computer Aided Engineering*), umożliwiających weryfikację poprawności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych poprzez wykonanie różnego rodzaju analiz i symulacji. Etap testowania modelu komputerowego z wykorzystaniem programów CAE określa się mianem wirtualnego prototypowania (ang. *functional virtual prototype*) [1, 5]. Uzyskane na podstawie analizy numerycznej informacje o zachowaniu się układu i jego działaniu pozwalają na podjęcie decyzji o konieczności wprowadzenia zmian do dokumentacji konstrukcyjnej zanim zostaną poczynione przygotowania związane z opracowaniem prototypu.

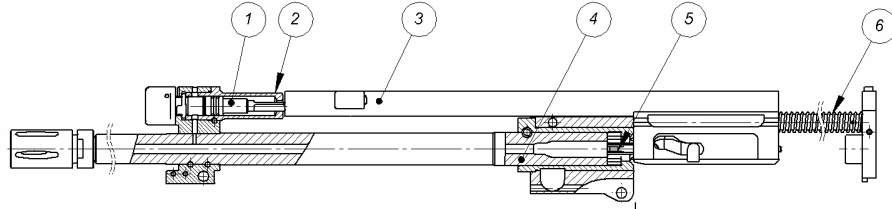
Zakład Konstrukcji Specjalnych WAT we współpracy z Fabryką Broni „Łucznik”-Radom realizuje od 2007 r. projekt rozwojowy, którego celem jest zaprojektowanie, wykonanie i przebadanie dwóch demonstratorów technologii karabinków podstawowych kalibru 5,56 mm zbudowanych w kolbowym i bezkolbowym układzie konstrukcyjnym. Powstające w ramach projektu karabinki charakteryzują się wieloma innowacyjnymi rozwiązaniami, które dotychczas nie były stosowane przez Fabrykę z Radomia. Jedno z nich dotyczy sposobu działania automatyki karabinka, która wykorzystuje krótki ruch tłoka gazowego. W związku z tym powstała konieczność sprawdzenia poprawności zaproponowanego rozwiązania z wykorzystaniem programów obliczeniowych CAE [4].

2. CHARAKTERYSTYKA AUTOMATYKI BRONI Z KRÓTKIM RUCHEM TŁOKA GAZOWEGO

Nowo projektowane karabinki podstawowe MSBS-5,56 działają na zasadzie odprowadzenia części gazów prochowych przez boczny otwór w lufie, z krótkim ruchem tłoka gazowego. W rozwiązaniu tym tłok nie jest połączony z zespołem suwadła. Stanowi on oddzielną część, która przemieszcza się ruchem prostoliniowym wewnątrz wkładki komory gazowej. Impulsem wymuszającym ruch tłoka jest siła od ciśnienia gazów prochowych rozprężających się w komorze gazowej (rys. 1). Zespół suwadła składa się z suwadła oraz zamka, który współpracuje z tuleją ryglową lufy. Pod wpływem działania tłoka zespół suwadła przemieszcza się ruchem prostoliniowym w kierunku przeciwnym do ruchu pocisku.

Energia kinetyczna tłoka gazowego, poprzez ruch suwadła, jest wykorzystywana do: odryglowania zamka, wyrzucenia łuski z komory nabojeowej, napięcia sprężyny kurka oraz sprężyny mechanizmu powrotnego, która wymusza ruch powrotny suwadła w kierunku obsady lufy.

Zgromadzona w sprężynie mechanizmu powrotnego energia umożliwia dostanie naboju do komory nabojeowej, zaryglowanie zamka w tulei ryglowej lufy, przygotowanie broni do oddania kolejnego strzału [4].



Rys. 1. Widok ogólny analizowanego układu: 1 – tłok gazowy, 2 – wkładka komory gazowej, 3 – suwadło, 4 – lufa, 5 – zamek, 6 – mechanizm powrotny

Fig. 1. The diagram of analysed system: 1 – gas piston, 2 – gas chamber insert, 3 – slide, 4 – barrel, 5 – bolt, 6 – recoil spring

3. OKREŚLENIE METODYKI POSTĘPOWANIA ORAZ BUDOWA MODELU NUMERYCZNEGO ANALIZOWANEGO UKŁADU BRONI

3.1. Założenia do budowy modelu analitycznego

Dynamiczny charakter współpracy tłoka gazowego z suwadłem jest zagadnieniem skomplikowanym od strony opisu matematyczno-fizycznego, który definiowany jest poprzez układ równań różniczkowych i algebraicznych [1]. Aby móc przeanalizować zagadnienie oddziaływania tłoka gazowego z podzespołem suwadła, należy przyjąć istotne założenie mówiące o tym, iż układ rzeczywisty jest układem wielocłonowym (ang. *multibody systems*), reprezentowanym przez model złożony z wielu członów podlegających działaniu różnego typu sił i powiązanych ze sobą połączeniami różnych klas (parami kinematycznymi) [2]. Przyjęcie przedstawionego założenia pozwala na wykorzystanie aplikacji CAE – programu MSC.visual Nastran w procesie rozwiązywania dynamicznych równań ruchu tłoka gazowego i suwadła zgodnie z teorią Newtona – Eulera (II prawo Newtona i twierdzenie dotyczące zmiany krętu bryły sztywnej). Równania takie są formułowane przy założeniu, że układ własny $\zeta\eta\zeta$, (układ związany z analizowaną bryłą sztywną) jest układem centralnym, umiejscowionym w środku masy C .

Podstawowe równania dynamiczne przyjmują wówczas w postaci wektorowej następującą postać [1, 2]:

$$m \dot{\vec{v}}_c = \vec{F}, \quad \dot{\vec{K}}_c = \vec{N}_c$$

gdzie: $\dot{\vec{v}}_c$ – składowe wektora prędkości (środka masy C),

\vec{F} – siła wypadkowa,

$\dot{\vec{K}}_c$ – kręt ruchu obrotowego względem środka masy C ,

\vec{N}_c – moment od sił zewnętrznych względem środka masy C .

Składowe prędkości środka masy C analizowanej bryły zdefiniowane są w takim przypadku w osiach układu inercyjnego xyz i przyjmują postać $v_c = [v_{cx} v_{cy} v_{cz}]^T = [\dot{x}_c \dot{y}_c \dot{z}_c]^T$, gdzie v_c jest prędkością uogólnioną.

Składowe wektora krętu $\dot{\vec{K}}_c$ badanego ciała względem środka masy są przedstawione w układzie osi $\xi\eta\zeta$ i zdefiniowane w sposób następujący:

$$\dot{\vec{K}}_c = J_c \dot{\omega}$$

gdzie: $\dot{\omega} = [\dot{\omega}_\xi \dot{\omega}_\eta \dot{\omega}_\zeta]^T$,

J_c – biegunowy moment bezwładności bryły względem środka masy C .

Równania ruchu analizowanego ciała sztywnego w takim przypadku możemy zapisać w postaci macierzowej [1, 2]:

$$\begin{bmatrix} mI & 0 \\ 0 & J_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{\omega} J_c \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ N_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: I – 3×3 wymiarowa macierz jednostkowa,

J_c – biegunowy moment bezwładności bryły względem środka masy C ,

N_c – moment od sił zewnętrznych (F) względem środka masy C danej bryły,

ω – prędkość kątowa,

$\dot{\omega}$ – przyspieszenie kątowe,

(\sim) – indeks górny oznacza macierz skośnie symetryczną – operator mnożenia wektorowego.

Powyższe równanie można przedstawić w zapisie symbolicznym [1, 2]:

$$M \dot{v} + h(v) = f(p, v, t) \quad (2)$$

gdzie: M – jest $n \times n$ – wymiarową, symetryczną macierzą bezwładności, $h(v)$ – wektor sił dynamicznych (macierz kolumnowa), prawa strona równania, tj. f jest zależna od położenia i prędkości układu, a także od czasu t .

Zależności kinematyczne w analizowanym przypadku przyjmują postać:

$$\dot{\mathbf{p}} \equiv \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_c \\ \dot{\boldsymbol{\alpha}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_c \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \equiv \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{v} \quad (3)$$

gdzie: $\mathbf{r}_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ – wektor wodzący do środka masy C względem układu globalnego xyz ,

\mathbf{I} – jednostkowa macierz 3×3 ,

$\boldsymbol{\alpha}$ – opisuje trzy kąty określające zmianę położenia układu $\zeta\eta\zeta$ względem układu xyz , $\mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{v}$ – macierz transformacji pomiędzy składowymi prędkości \mathbf{v} .

3.2. Opis realizacji analizy numerycznej działania układu tłoka gazowego z suwadłem

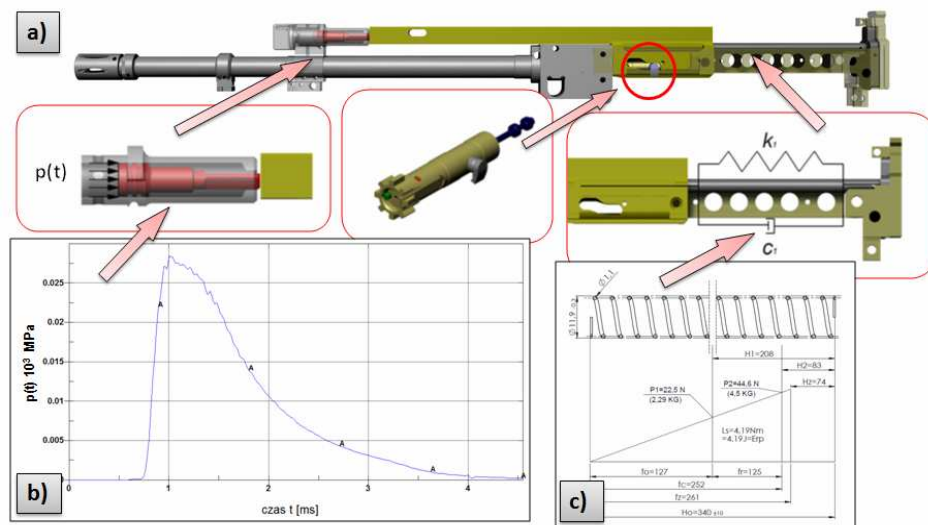
Przedstawiony powyżej model analityczny zaimplementowano do realizacji w oprogramowaniu typu CAE – MSC.visual Nastran. Podejście to stanowi próbę rozwiązania problemu związanego z określeniem dynamicznego oddziaływania układu tłoka gazowego z suwadłem metodami symulacyjnymi. Prace nad przygotowaniem modelu numerycznego rozpoczęto od wyeksportowania z środowiska CAD, jakim jest program Solid Works 2008, geometrii poszczególnych podzespołów karabinka do uniwersalnego formatu wymiany danych *.STEP.

Kolejny etap przygotowania analizy numerycznej był związany z określeniem warunków początkowo-brzegowych. Etap ten obejmował:

- zdefiniowanie warunków brzegowych dla tłoka gazowego i suwadła – określenie możliwości ruchu poprzez definicję stopni swobody (rys. 2a)
- zdefiniowanie warunku wymuszenia oddziałującego na tłok gazowy (rys. 2b) – charakterystyka ciśnienia
- zdefiniowanie par kontaktowych
- zdefiniowanie parametrów materiałowych dla poszczególnych części
- zdefiniowanie parametrów elementu dyskretyzowanego o właściwościach sprężysto-tłumiących (sprężyna mechanizmu powrotnego) – określenie sztywności elementu (rys. 2c).

Wymuszeniem uruchamiającym działanie analizowanego układu było ciśnienie działające na powierzchnię czołową tłoka gazowego (rys. 2b). Przebieg funkcji ciśnienia został określony doświadczalnie na stanowisku laboratoryjnym w trakcie strzelania z jednoczesną rejestracją wartości ciśnienia w komorze gazowej. Sprężynę mechanizmu powrotnego zdefiniowano za pomocą elementu dyskretnego o właściwościach sprężysto-tłumiących, a dane niezbędne do określenia jej sztywności uzyskano z dokumentacji konstrukcyjnej modelu badawczego broni (rys. 2c).

Sformułowanie warunków początkowo-brzegowych dla tłoka gazowego oraz suwadła było związane z określeniem ich stopni swobody. Dla analizowanego układu, tłok gazowy posiada dwa stopnie swobody: możliwość przemieszczania się oraz obrotu wzdłuż osi w zakresie ograniczonym wymiarami wkładki komory gazowej. Suwadło ma jeden stopień swobody – możliwość ruchu posuwisto-zwrotnego wzdłuż osi przewodu lufy. Ograniczenia ruchu suwadła zostały wprowadzone do układu poprzez zdefiniowanie par kontaktowych bryły suwadła z takimi elementami, jak: prowadnice suwadła, obsada lufy, tylec mechanizmu powrotnego, podzespół zamka oraz wodzik zamka. Tłok gazowy został zdefiniowany jako element współpracujący z: suwadłem, wkładką komory gazowej oraz regulatorem gazowym. Wszystkie elementy w analizowanym układzie wiernie opisywały charakterystyki masowe i geometryczne. Z uwagi na typ prowadzonej analizy, wszystkie ciała były bryłami sztywnymi (nieodkształcalnymi).



Rys. 2. Model numeryczny analizowanego układu tłok gazowy-suwadło: a – elementy składowe modelu numerycznego, b – charakterystyka ciśnienia wymuszającego ruch tłoka, c – charakterystyka sztywnościowa modelu dyskretnego sprężysto-tłumiącego

Fig. 2. The numerical model of analysed gas piston with slide system: a – numerical model components, b – gas pressure curve causing gas piston movement, c – elastic-damping discrete stiffness model characteristics

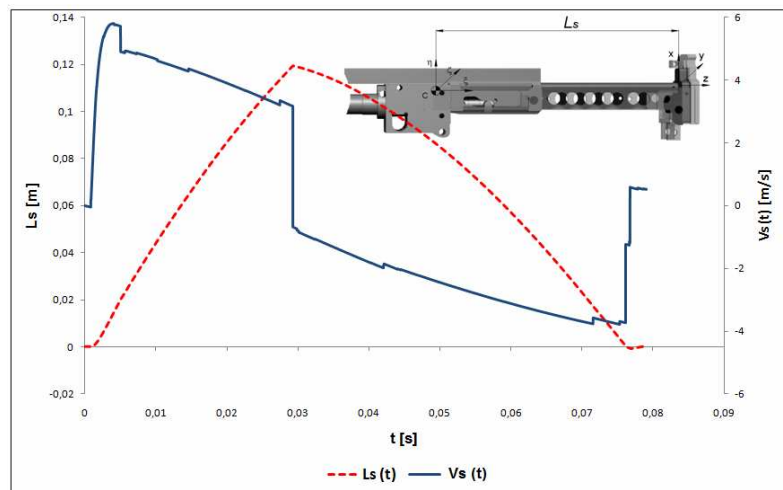
Przyjęte do analizy wstępne warunki początkowo-brzegowe nie uwzględniają wielu istotnych czynników, w tym np. dyssypacji energii w wyniku procesu tarcia oraz zmian zachodzących w układzie na skutek oddziaływań termicznych w elementach węzła gazowego.

Zjawiska te będą uwzględnione podczas realizacji kolejnych analiz prowadzonych na modelach dyskretnych bazujących na równaniach dynamicznych opisanych z wykorzystaniem metody elementów skończonych [6]. Dalszy etap realizacji prac związanych z uruchomieniem analizy numerycznej obejmował definiowanie parametrów symulacji, takich jak: określenie kroku całkowania i warunków związanych z przyjętą tolerancją, wybór metody całkowania Kutta–Mersona [3].

4. WYNIKI ANALIZY KINEMATYCZNEJ DLA ANALIZOWANEGO UKŁADU TŁOKA GAZOWEGO Z SUWADEŁM

Przeprowadzona analiza numeryczna dla jednego cyklu działania układu tłoka gazowego z suwadłem umożliwiła wyznaczenie wielkości charakterystycznych dla układu, takich jak: przemieszczenie L_t tłoka gazowego i L_s suwadła, ich prędkości (V_t i V_s) oraz przyspieszenie A_s suwadła.

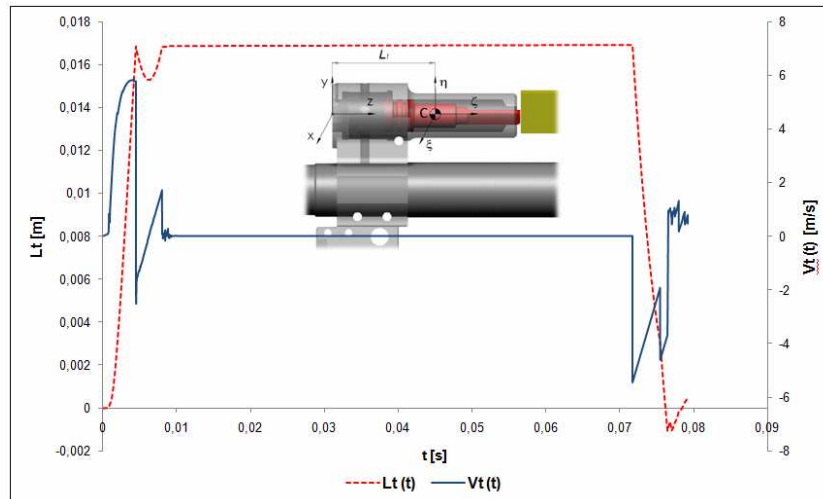
Określone na drodze symulacji komputerowej charakterystyki przedstawiono w postaci wykresów (rys. 3-5). Analizując otrzymane wyniki, można zauważyć wpływ procesu ryglowania zamka z tuleją ryglową lufy na przebieg charakterystyk opisujących zachowanie się suwadła (rys. 3). Na wykresie przedstawiającym przebieg prędkości suwadła w funkcji czasu widoczny jest nagły spadek wartości prędkości na skutek włączenia do przemieszczającego się układu masy zamka.



Rys. 3. Wykres przemieszczenia $L_s(t)$ i prędkości $V_s(t)$ środka ciężkości suwadła na kierunku osi przewodu lufy

Fig. 3. The displacement $L_s(t)$ and velocity $V_s(t)$ curves of slide mass center in barrel bore direction

Wykresy przedstawiające zachowanie się tłoka gazowego (rys. 4) odwzorowują dynamiczny charakter zmian zachodzących w analizowanym układzie konstrukcyjnym. Pod wpływem impulsu ciśnienia od spalającego się ładunku prochowego tłok gazowy przemieszcza się wewnątrz wkładki komory gazowej do momentu uderzenia w jej czołową powierzchnię. Na skutek uderzenia zmienia się kierunek ruchu tłoka gazowego, aż do momentu, kiedy siła od ciśnienia gazów prochowych nie wymusi powtórnego przemieszczenia tłoka w kierunku czoła wkładki komory gazowej.

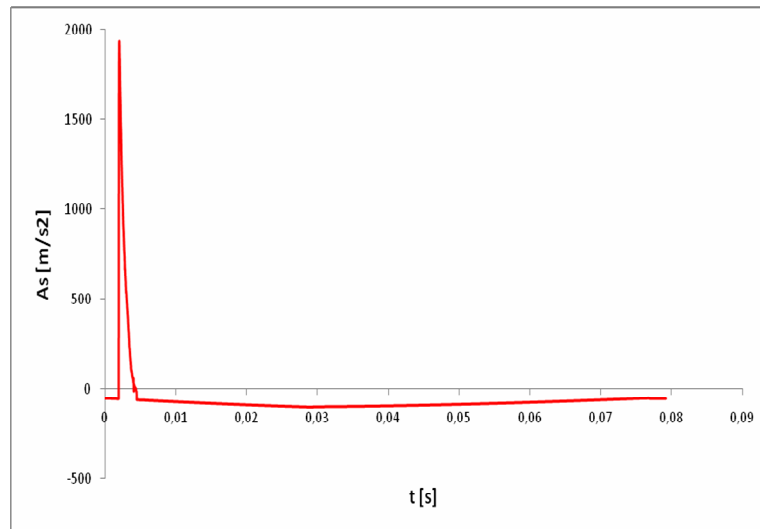


Rys. 4. Wykres przemieszczenia $L_t(t)$ i prędkości $V_t(t)$ środka ciężkości tłoka gazowego na kierunku wzdłuż osi przewodu lufy

Fig. 4. The displacement $L_t(t)$ and velocity $V_t(t)$ curves of gas piston mass center in barrel bore direction

Zjawisko to trwa do momentu całkowitego zatrzymania tłoka gazowego w przednim położeniu. W drugim etapie ruchu, tłok gazowy przemieszcza się na skutek oddziaływania suwadła, które powraca w przednie położenie. Analizując charakterystyki przyspieszenia suwadła (rys. 5), można zauważyć ujemną jego wartość w początkowej fazie ruchu. Jest to efekt wynikający z faktu zrównoważenia siły wstępnego napięcia sprężyny mechanicznego powrotnego. Określony przebieg przyspieszenia pozwala na wyznaczenie wartości siły oddziaływania tłoka gazowego na suwadło w początkowej fazie ruchu, kiedy elementy te przemieszczają się wspólnie.

Dane na temat wartości siły będą niezbędne w procesie realizacji analizy wytrzymałościowej suwadła metodą elementów skończonych [5].



Rys. 5. Wykres przyspieszenia $A_s(t)$ środka ciężkości suwadła na kierunku wzdłuż osi przewodu lufy

Fig. 5. The acceleration $A_s(t)$ curve of slide mass center in barrel bore direction

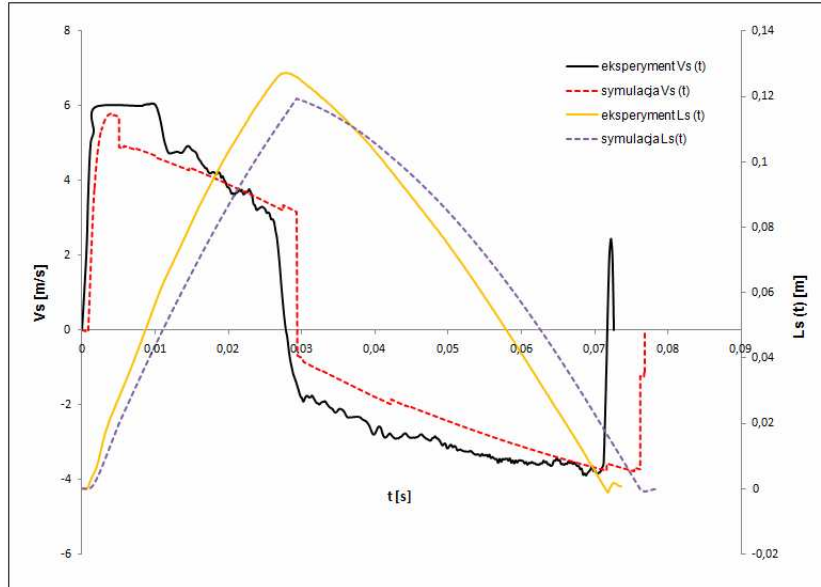
5. PORÓWNANIE WYNIKÓW ANALIZY NUMERYCZNEJ Z WYNIKAMI EKSPERYMENTALNYMI

Otrzymane metodą symulacji komputerowej wyniki porównano z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej strzelaniem podczas testowania modelu badawczego karabinka podstawowego MSBS-5,56 (rys. 6).

Charakterystyki przemieszczenia oraz prędkości określające zachowanie się suwadła metodą symulacji komputerowej są zbliżone do krzywych otrzymanych na drodze eksperymentalnej.

Widoczne przesunięcie w fazie wykresów przemieszczenia i prędkości może być wynikiem różnej wartości impulsu ciśnienia wymuszającego działanie układu (ciśnienie działające na tłok gazowy zostało określone na stanowisku laboratoryjnym i może różnić się od ciśnienia działającego na elementy układu węzła gazowego karabinka badawczego). Ponadto różnica w uzyskanych wartościach maksymalnych dla krzywych przemieszczenia wynika z przyjętej metodyki rozwiązywania układów wieloczłonowych (zdefiniowanie poszczególnych elementów jako brył sztywnych).

Dla rzeczywistego układu suwadło przemieszczając się w tylne położenie, uderza w elastomerowy zderzak, pochłaniający nadmiar energii kinetycznej (różnica w wartości przemieszczenia wynika z faktu odkształcania zderzaka elastomerowego).



Rys. 6. Porównanie wykresów przemieszczenia $L_s(t)$ i prędkości $V_s(t)$ suwadła uzyskanych z eksperymentu oraz symulacji

Fig. 6. The numerical and experimental displacement $L_s(t)$ and velocity $V_s(t)$ curves comparison of slide mass center in barrel bore direction

Dodatkowymi czynnikami mogącymi mieć wpływ na różnice w uzyskanych przebiegach mogą być wartość sztywności sprężyny mechanizmu powrotnego (wartość sztywności przyjętej w modelu symulacyjnym określono analitycznie na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej broni, a nie poprzez pomiar ugięcia sprężyny powrotnej zastosowanej w karabinku), a także niedokładność przyjętej metodyki pomiarowej w badaniach eksperymentalnych (przemieszczenie suwadła było mierzone za pomocą kamery do rejestracji przebiegów szybkozmiennych, gdzie dokładność uzyskanych wyników jest uwarunkowana rozdzielczością analizowanych obrazów).

6. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie programów CAE w procesie projektowania broni strzeleckiej pozwala na szybką ocenę zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Opracowany model numeryczny umożliwia prowadzenie badań symulacyjnych bez konieczności wykonywania kosztownych i długotrwałych badań eksperymentalnych.

Zdefiniowane warunki początkowo-brzegowe takie jak: sztywność sprężyny mechanizmu powrotnego, wartość impulsu wymuszenia, właściwości materiałowe opisujące poszczególne elementy mogą być dowolnie konfigurowane. Analiza komputerowa zbudowanego modelu numerycznego pozwala na określenie odpowiedzi układu w zależności od przyjętych warunków początkowo-brzegowych.

Porównane wyników uzyskanych z obydwu badań (numerycznego i eksperymentu) wskazuje na ich stosunkowo dużą zgodność. Pozwala na wstępne wyznaczenie przebiegu charakterystyk dla pozostałych elementów układu, np. tłoka gazowego. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zakresu realizowanych badań doświadczalnych.

Wyniki przedstawionej symulacji komputerowej stanowią wstęp do dalszych prac pozwalających na dokładniejsze odwzorowanie charakteru zjawiska współpracy tłoka gazowego z suwadłem.

Dalszy etap realizowanych prac będzie obejmował m.in. analizę wytrzymałościową współpracujących ze sobą elementów broni.

Otrzymane wartości wyteżenia materiału będą stanowiły kierunek dalszych zmian w procesie modyfikacji dokumentacji konstrukcyjnej karabinka.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010
jako projekt rozwojowy.*

LITERATURA

- [1] Frączek J., Wojtyra M., *Kinematyka układów wieloczołowych. Metody obliczeniowe*, WNT, Warszawa, 2007.
- [2] Blajer W., *Metody dynamiki układów wieloczołowych*, Politechnika Radomska, 1998.
- [3] MSC.visual Nastran 4D, Quick Reference Guide, 2001.
- [4] Gacek J., Małachowski J., Płatek P., Woźniak R., Wstępna analiza procesu dynamicznego oddziaływania tłoka gazowego z suwadłem dla modułowego systemu broni strzeleckiej MSBS kal. 5,56 mm, *Materiały XIV Szkoły komputerowego wspomagania projektowania wytwarzania i eksploatacji*, s. 129-136, Jurata, 10-14 maja 2010 r.
- [5] Belytschko T., Liu W.K., Moran B., *Nonlinear Finite Elements for continua and structures*, John Wiley & Sons, England, 2000.

Numerical Analysis of Operation Process of Gas Piston System with Slide for the Assault Rifle of Modular Small Arms System Cal. 5,56 mm

Jerzy MAŁACHOWSKI, Paweł PŁATEK, Ryszard WOŹNIAK
Mirosław ZAHOR

Abstract. The aim of the paper is to present the possibility of using the numerical analysis to describe the operation process of system the gas piston with the slide for the assault rifle of modular small arms system cal. 5,56 mm. The capability of CAE (Computer Aided Engineering) software – MSC.visual Nastran system in process of solution dynamic equations of motion of the gas piston and the slide accordance with Newton – Euler's theory is presented. The multibody model development and boundary conditions implementation are also discussed. At the end the comparison between numerical and experimental results and final conclusion are shown.

Keywords: small arms design, numerical analysis, multibody model