



## Modelowanie dynamiki lotu pocisku raketowego z wykorzystaniem programu PRODAS

Edward OLEJNICZAK, Mariusz PIETRASZEK\*,  
Zbigniew ZIÓŁKOWSKI

*Institut Techniczny Wojsk Lotniczych  
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa  
\* autor korespondencyjny, e-mail: pietrm@itwl.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 22.05.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 25.09.2014*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z badaniem własności dynamicznych pocisku raketowego. Przedstawiono realizację badań zgodnie z następującą kolejnością: badania teoretyczne, eksperymentalne oraz weryfikacja. Stosując zasady modelowania, opisano budowę i dane techniczne pocisku raketowego oraz wykorzystując program PRODAS, opracowano model fizyczny pocisku, w oparciu o który przeprowadzono badania symulacyjne. Wyznaczono charakterystyki masowe, aerodynamiczne oraz podstawowe parametry toru lotu. Następnie omówiono badania doświadczalne podstawowych charakterystyk dynamicznych. Porównanie wyników uzyskanych z badań eksperymentalnych i teoretycznych świadczy o poprawności opracowanego modelu.

**Słowa kluczowe:** mechanika, dynamika lotu, balistyka, modelowanie, pocisk raketowy

### 1. WSTĘP

Proces badania własności dynamicznych obiektu rzeczywistego [1-3] nazwanego obiektem fizycznym można przeprowadzić doświadczalnie lub teoretycznie.

Badania doświadczalne przeprowadza się na istniejącym obiekcie fizycznym lub na jego modelu materialnym przy spełnionych kryteriach podobieństwa. Badania teoretyczne wymagają zaś zbudowania odpowiednich modeli fizycznych i modeli matematycznych.

Zgodnie z klasyczną definicją modelu, modelem nazywa się dający się wyobrazić lub zrealizować układ, który w sposób wystarczający odtwarza wybrane cechy obiektu rzeczywistego tak, że jego badanie pozwala na uzyskanie żądanych informacji o obiekcie. Samo pojęcie „model” wywodzi się z łacińskiego słowa *modus*, *modulus*, co znaczy miara, obraz, sposób. Jego pierwotne znaczenie było przede wszystkim związane z budownictwem i używano go dla oznaczenia wzorca lub przedmiotu podobnego do innego przedmiotu. Posługując się definicją modelu, można stwierdzić, że: „model oznacza reprezentację badanego obiektu w postaci innej niż ta, w której występuje on w rzeczywistości”. Model z założenia jest pewną idealizacją i celowo uproszczoną reprezentacją rzeczywistości, która pozbawiona jest wielu szczegółów i cech nieistotnych z punktu widzenia celów modelowania. Charakter i stopień uproszczenia zależy od wiedzy, potrzeb i świadomości badacza i może się zmieniać w zależności od celu badań. Uproszczenia przy tworzeniu modeli są konieczne, gdyż rzeczywistość jest zbyt złożona w stosunku do ludzkich możliwości postrzegania i przetwarzania informacji. W celu zredukowania złożonego stanu faktycznego rzeczywistości do istotnych struktur podstawowych, przekształca się system rzeczywisty w model, posługując się abstrakcyjnymi i uproszczonymi metodami, w ramach procesu zwanego modelowaniem.

Modelowaniem nazywać będziemy całokształt czynności związanych z budową modelu badanego obiektu, łącznie z eksperymentami przeprowadzanymi na modelu. Obliczenia przy stosowaniu modeli matematycznych sprowadzają się z reguły do rozwiązywania równań i nierówności metodami analitycznymi, numerycznymi czy symulacyjnymi.

Obecnie symulacja komputerowa jest definiowana jako technika numeryczna, która służy do naśladowania rzeczywistego systemu w postaci modelu eksperymentalnego z uwzględnieniem procesów dynamicznych zachodzących w obrębie systemu, w celu rozpoznania jego zachowań i oceny ich wpływu na pracę systemu. Podstawą każdego eksperymentu symulacyjnego jest model analizowanego systemu.

Model fizyczny obiektu powinien uwzględniać przede wszystkim te jego cechy, które w danym przypadku mają decydujący wpływ na analizowane zjawisko. Otrzymany model matematyczny jest kompromisem między dokładnością analizy teoretycznej problemu fizycznego, skomplikowaniem równań matematycznych, dostępnymi środkami technicznymi a naszą umiejętnością i intuicją.

W pracy przedstawiono model niekierowanego lotniczego pocisku raketowego (NLPR), stabilizowanego brzechwowo. Pocisk na torze lotu wykonuje ruchy obrotowe wokół osi podłużnej pod działaniem momentów obrotowych, generowanych dwoma sposobami: gazodynamicznym i aerodynamicznym.

Wyniki badań poligonowych parametrów lotu pocisku, jak prędkość postępową i prędkość obrotową w funkcji czasu, użyto jako wzorzec do oceny poprawności modelu dynamiki pocisku.

Do opracowania modelu dynamiki pocisku posłużono się profesjonalnym oprogramowaniem PRODAS firmy Arrow Tech. Pomiary prędkości pocisku na torze lotu wykonano przy użyciu radaru dopplerowskiego z zestawem antenowym SL30031 firmy Weibel.

## 2. WŁAŚCIWOŚCI KONSTRUKCYJNE MODELOWANEGO POCISKU

### 2.1. Krótki opis i dane techniczne

Niekierowany lotniczy pocisk raketowy kalibru 70 mm NLPR-70 (rys. 1) jest przeznaczony do niszczenia umocnionych celów naziemnych, lekko opancerzonych obiektów, okrętów nawodnych itp.

Podstawowe dane techniczne pocisku (odpalonego z wyrzutni stacjonarnej):

- średnica 70 mm,
- długość 1360 mm,
- prędkość maksymalna 640 m/s,
- prędkość początkowa 50 m/s,
- masa startowa pocisku  $12,2 \pm 0,2$  kg,
- czas pracy silnika  $1,1 \pm 0,1$  s.



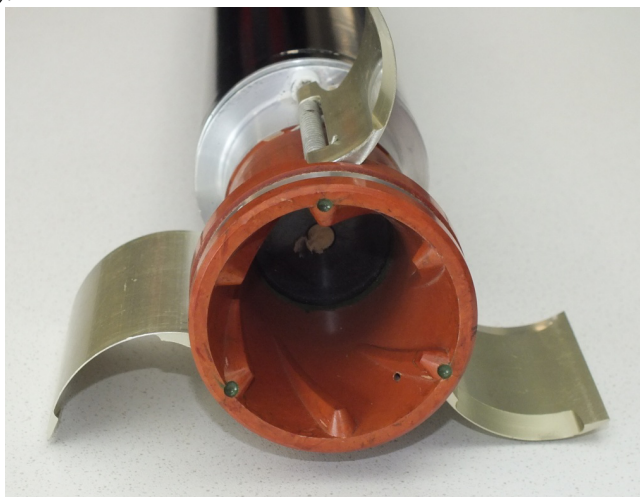
Rys. 1. Widok ogólny pocisku

Fig. 1. A general view of a projectile

Pocisk odpalany z wieloprowadnicowych wyrzutni rurowych jest stabilizowany brzechwowo. Pocisk wykonuje ruch obrotowy wokół osi podłużnej, pod wpływem momentów obrotowych generowanych gazodynamicznie przez silnik raketowy i aerodynamicznie przez brzechwy.

## 2.2. Wytwarzanie gazodynamicznego momentu przechylającego

Urządzeniem wytwarzającym gazodynamiczny moment przechylający jest dysza silnika raketowego. Na wewnętrznej powierzchni naddźwiękowej części dyszy znajduje się sześć spiralnych występów, pełniących funkcję kierownic strug (rys. 2).



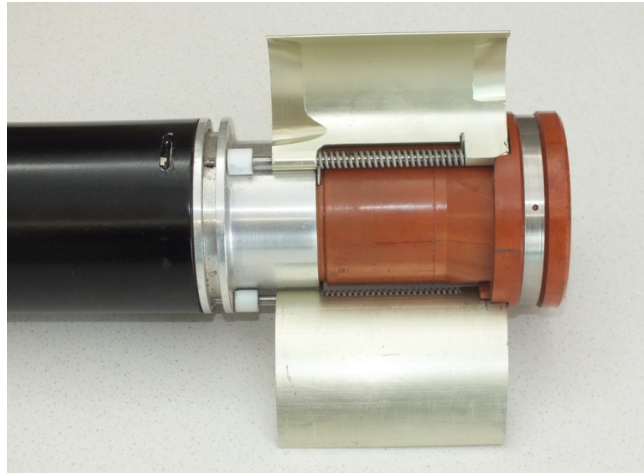
Rys. 2. Brzechwy pocisku w stanie otwartym

Fig. 2. Projectile fins deployed

W wyniku oddziaływania strumienia gazów wylotowych na dyszę silnika raketowego ze spiralnymi występami (kierownicami strug) powstaje moment przechylający obracający pocisk w prawo, patrząc w kierunku lotu. Ruch obrotowy rozpoczyna się jednocześnie z ruchem postępowym w przewodnicy rurowej. Gazodynamiczny moment przechylający jest generowany tylko podczas pracy silnika raketowego.

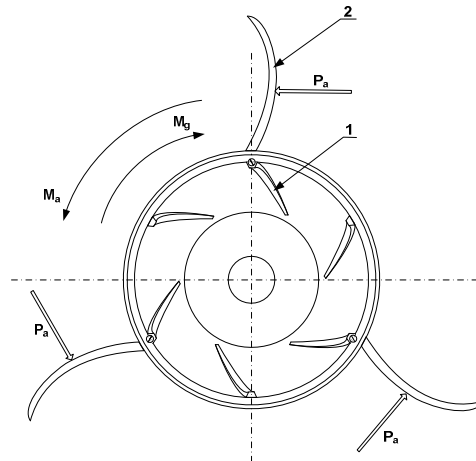
## 2.3. Wytwarzanie aerodynamicznego momentu przechylającego

Organem wytwarzającym aerodynamiczny moment przechylający jest ubrzechwienie, składające się z trzech brzechw prostokątnych, umieszczonych w tylnej części pocisku. Łukowo wygięte brzechwy, po załadowaniu pocisku do przewodnicy rurowej, pozostają w stanie zamkniętym.



Rys. 3. Szczegóły konstrukcyjne brzechwy. Widoczne wielkości i kształt sfazowań wzdłuż krawędzi natarcia i spływu

Fig. 3. Structural details of a fin. Clearly visible are sizes and shapes of the leading/trailing edge bevelling



Rys. 4. Widok pocisku z tyłu. Schemat objaśniający kierunki działania momentów obrotowych: 1 – kierownica strug w dyszy, 2 – brzechwa,  $P_a$  – wektor siły nośnej pojedynczej brzechwy,  $M_a$  – aerodynamiczny moment obrotowy,  $M_g$  – gazodynamiczny moment obrotowy

Fig. 4. The projectile's rear view. The diagram illustrates directions of torques: 1 – the flow/stream-guiding structure in the nozzle, 2 – a fin,  $P_a$  – the vector of lift force of a single fin,  $M_a$  – the aerodynamic torque,  $M_g$  – the gas-dynamic torque

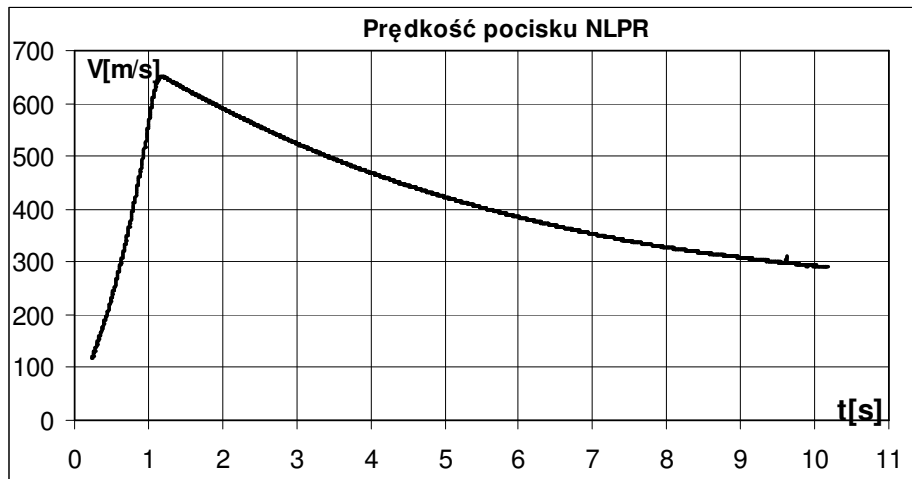
Ich otwarcie do pozycji roboczej następuje po wyjściu pocisku z rury, pod wpływem siły sprężyn oraz siły odśrodkowej. Po otwarciu brzechwy zostają zablokowane w położeniu roboczym (rys. 2). Widok pojedynczej brzechwy i jej szczegóły konstrukcyjne są pokazane na rysunku 3. Posiadają one sfazowania wzdłuż krawędzi natarcia i spływu wykonane w sposób upodabniający je do profilu skrzydła lotniczego.

### 3. BADANIA POLIGONOWE POCISKU

W celu wyznaczenia charakterystyk dynamicznych pocisku, jak: ciągu, prędkości postępowej i obrotowej na torze lotu, wykonano cykl badań poligonowych. Ciąg silnika raketowego mierzono na hamowni poziomej. Prędkość postępową pocisku wyznaczono na podstawie przebiegu składowej prędkości radialnej, pomierzonej za pomocą radaru dopplerowskiego, z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania zestawu DR-5000. Metodę wykorzystania radaru DR-5000 do wyznaczania charakterystyk balistycznych innych środków bojowych, jak bomby lotniczej, przedstawiono w pracy [6]. Przykładową rejestrację prędkości pocisku  $V(t)$  przedstawiono na rysunku 5, natomiast wykres ciągu  $P(t)$  – na rysunku 6.

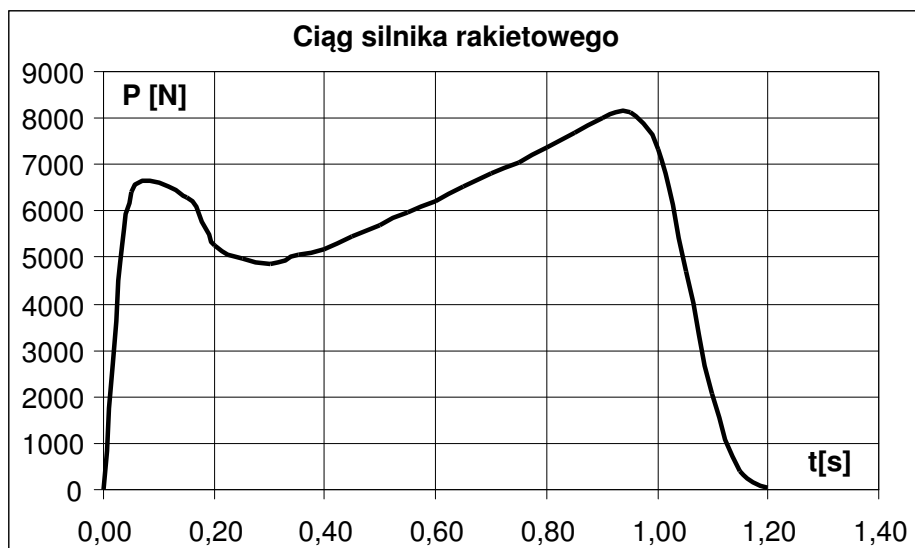
W celu wykonania pomiarów i rejestracji prędkości obrotowej pocisku wykorzystano opracowany w ITWL system teletransmisji parametrów lotu [7-9]. Czujnik obrotów i nadajnik zostały zainstalowane w głowicy pocisku. System umożliwił wyznaczenie: prędkości kątowej obrotów pocisku względem osi podłużnej, kierunku obrotów, a także działających w czasie lotu przeciążeń osiowych. Na podstawie otrzymanych rejestracji wyznaczono prędkość obrotową pocisku na całym torze lotu z jednoczesnym określeniem kierunku wirowania, co przedstawiono na rysunku 7. W początkowej fazie lotu trwającej około 1,7 s pocisk wykonywał obroty w prawo, wywołane gazodynamicznym momentem przechylającym  $M_g$ . Moment ten był generowany przez cały czas pracy silnika raketowego, tj. przez ok. 1,1 s z intensywnością zależną od prędkości wypływu gazów oraz stopnia erozji kierownic strug w dyszy.

Z chwilą wyjścia pocisku z prowadnicy rurowej wyrzutni i po otwarciu brzechw występował przeciwnie skierowany aerodynamiczny moment przechylający  $M_a$ . Wielkość tego momentu uzależniona była od prędkości pocisku oraz stopnia otwarcia brzechw. Po zakończeniu pracy silnika nastąpiła zmiana prędkości i kierunku wirowania pocisku na przeciwny. Ten kierunek wirowania pocisku utrzymywał się na pozostałej części toru lotu.



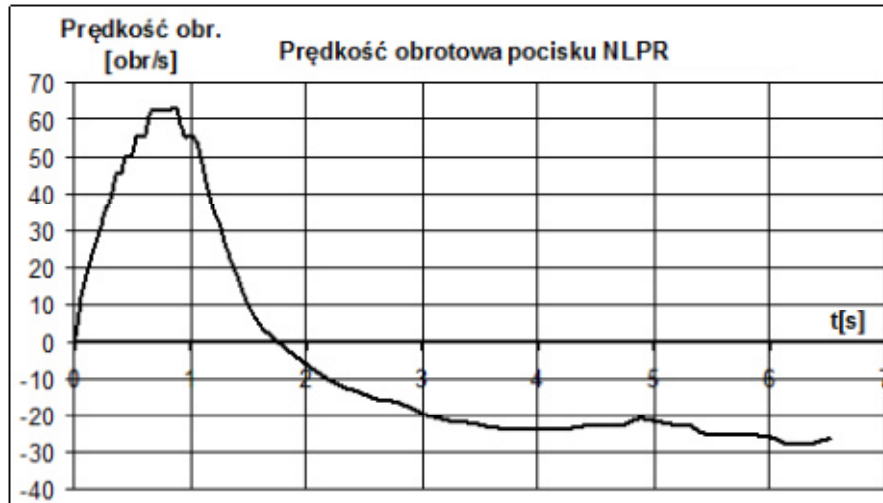
Rys. 5. Wykres prędkości pocisku pomierzonej radarem dopplerowskim

Fig. 5. A curve plotted for the projectile's speed measured with the Doppler radar



Rys. 6. Wykres ciągu silnika raketowego pomierzonego na hamowni

Fig. 6. A curve plotted for the rocket projectile's thrust measured at test facilities



Rys. 7. Wykres pomierzonej prędkości obrotowej pocisku

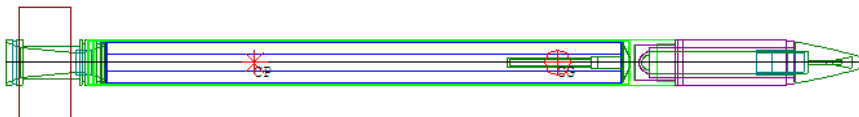
Fig. 7. A curve plotted for the measured rotational speed of the projectile

#### 4. MODEL DYNAMIKI LOTU POCISKU I JEGO BADANIE

Model dynamiki lotu pocisku opracowano, używając pakietu oprogramowania PRODAS. Oprogramowanie PRODAS V3 przeznaczone jest do analiz balistycznych różnych typów pocisków i systemów uzbrojenia, wspomagających projektowanie i modernizację amunicji. Służy do obliczeń charakterystyk masowych, aerodynamicznych oraz balistycznych.

Pierwszym elementem analizy jest opracowanie modelu fizycznego badanego obiektu. Należy przy tym podkreślić, że dokładność opracowania modelu ma bezpośredni wpływ na wiarygodność wyników prowadzonych analiz.

Analizę modelu rozpoczyna się od zestawienia jego geometrii oraz wyznaczenia charakterystyk masowych, tj. masy, położenia środka masy oraz momentów bezwładności. Do analizy masowej wykorzystano moduł programu MASS PROPERTIES, za pomocą którego wykonano wirtualny model pocisku (rys. 8) o ekwiwalentnych dla NLPR-70 charakterystykach geometrycznych i masowych [4, 5].

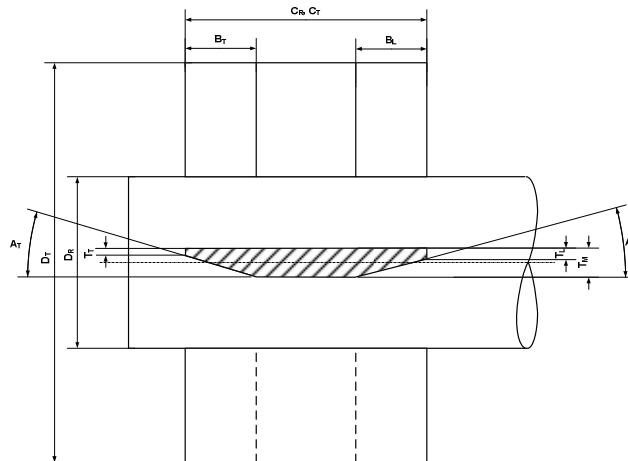


Rys. 8. Widok wirtualnego modelu pocisku

Fig. 8. A virtual model of the projectile



Do wyliczenia momentów przechylających, generowanych gazodynamicznie oraz aerodynamicznie, przyjęto modele generatorów dostępne w pakiecie PRODAS. Model ubrzechwienia pocisku jako generatora aerodynamicznego momentu przechylającego przedstawiono na rysunku 9. Przez dobór parametrów konstrukcyjnych generatora istnieje możliwość zmiany wielkości momentu obrotowego i sterowania przebiegiem prędkości obrotowej pocisku. Istotne z tego punktu widzenia są parametry konstrukcyjne, określone wymiarami:  $A_L$ ,  $A_T$ ,  $B_L$ ,  $B_T$ .



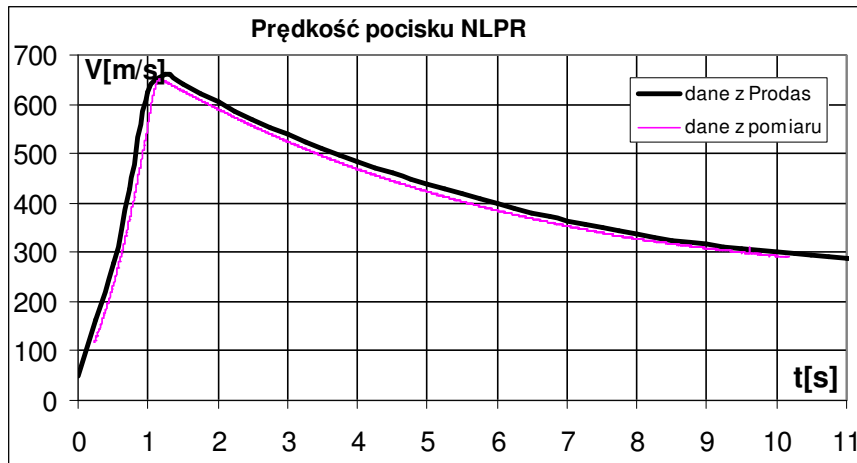
Rys. 9. Model ubrzechwienia pocisku

Fig. 9. A model of the projectile's fins set

Kolejnym elementem było wyznaczenie charakterystyk aerodynamicznych, do obliczenia których wykorzystano moduł programu AERODYNAMIC PREDICTIONS. Obliczone charakterystyki mogą być zestawione w tabelach lub przedstawione w formie wykresów. Po wykonaniu analiz aerodynamicznych modelu pocisku NLPR-70 przewidzianych programem, otrzymano jego charakterystyki aerodynamiczne, jak: położenie środka parcia oraz współczynniki sił i momentów sił aerodynamicznych.

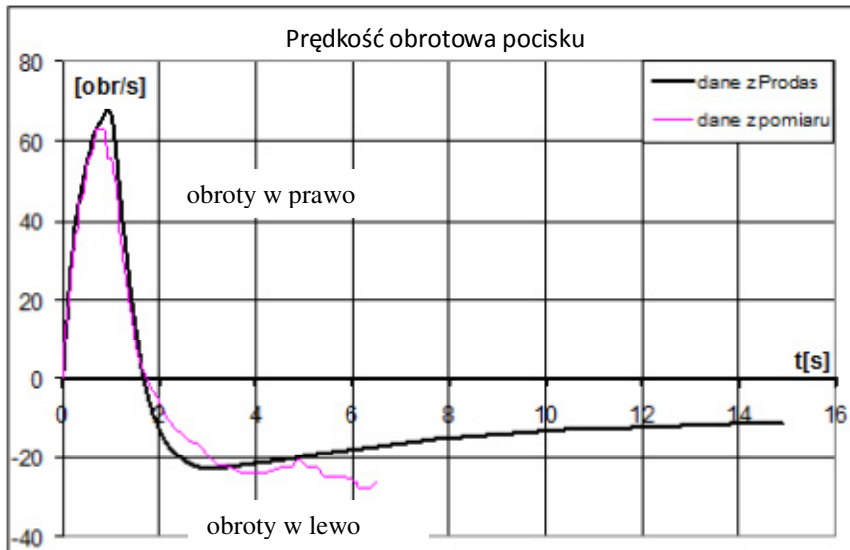
Elementem kończącym analizę było obliczenie kinematycznych i dynamicznych parametrów toru lotu badanego pocisku. Obliczenia wykonano za pomocą modułu programu TRAJECTORY SIMULATION. Po przyjęciu właściwych parametrów konstrukcyjnych pocisku, generatorów momentów obrotowych oraz przebiegu siły ciągu i charakterystyk atmosfery standardowej ICAO, wykonano badania symulacyjne ruchu pocisku.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono porównanie obliczeniowych przebiegów prędkości postępowej i obrotowej pocisku z analogicznymi funkcjami pomierzonymi podczas strzelań poligonowych, uznanymi za przebiegi wzorcowe.



Rys. 10. Porównanie pomierzonej i obliczonej prędkości postępowej pocisku na torze lotu

Fig. 10. Comparison between measured and calculated forward speeds of the projectile following its flight path



Rys. 11. Porównanie pomierzonej i obliczonej prędkości obrotowej pocisku na torze lotu

Fig. 11. Comparison between measured and calculated rotational speeds of the projectile following its flight path

## 5. WNIOSKI

1. Porównanie przebiegów prędkości postępowej i obrotowej, pomierzonych dla rzeczywistego pocisku badanego na poligonie i obliczonych dla jego modelu, świadczy o poprawności i wiarygodności opracowanego modelu.
2. Pakiet programów PRODAS jest wygodnym narzędziem służącym do modelowania lotu niekierowanych pocisków raketowych.
3. W celu zwiększenia dokładności otrzymywanych wyników pożądane jest poprawne odwzorowanie geometrii pocisku oraz rozłożenia mas badanego obiektu.
4. Przebieg prędkości obrotowej pochodzący z pomiaru podlegał silnemu zakłóceniu około czwartej sekundy lotu i zaniknął około szóstej sekundy lotu, ze względu na ograniczony zasięg transmisji telemetrycznej z pokładu lecącego pocisku.
5. Wskazana jest weryfikacja doświadczalna wyników na poszczególnych etapach obliczeń i analiz, możliwa na przykład poprzez eksperymentalne określenie położenia środka masy oraz momentów bezwładności.

## LITERATURA

- [1] Ogata K., *Metody przestrzeni stanów w teorii sterowania*, WNT, Warszawa, 1974.
- [2] Żyłuk A., Badania symulacyjne balistyki zewnętrznej lotniczych środków bojowych, rozprawa habilitacyjna, *Prace naukowe ITWL*, Warszawa, 2009.
- [3] Żyłuk A., *Modelowanie i badania symulacyjne lotniczych środków bojowych*, Wydawnictwo ITWL, Warszawa, 2013.
- [4] Kurow W., Dołżański J., *Zasady projektowania pocisków raketowych na paliwo stałe*, Wydawnictwo MON, Warszawa, 1964.
- [5] *Engineering design handbook. Design for control of projectile flight characteristics*, Headquarters US Army Material Command, 1966.
- [6] Olejniczak E., Winczura Z., Żyłuk A., Wyznaczanie charakterystyk balistycznych bomb lotniczych przy pomocy radaru balistycznego, *IX Ogólnopolska Konferencja „Mechanika w lotnictwie”*, PTMTiS, Warszawa, 2000.
- [7] Milewski W., Pietraszek M., Ziółkowski Z., *Sprawozdanie z badań naziemnych NLPR-70 z telemetrycznym układem rejestracji parametrów w locie*, Opracowanie ITWL, Warszawa, 2008.
- [8] Pietraszek M., Żyłuk A., Feasibilities of measurements in examination of avionoc combat means, *Journal of KONES 2013*, vol. 20, no. 3, pp. 451-460.

- [9] Olejniczak E., Pietraszek M., *Protokół z badań niekierowanych lotniczych pocisków raketowych (NLPR-70). Badania zdawczo-odbiorcze*, Opracowanie ITWL, Warszawa, 2008.

## **Modelling of Dynamics of Rocket Projectile Motion with the PRODAS Software**

Edward OLEJNICZAK, Mariusz PIETRASZEK,  
Zbigniew ZIÓŁKOWSKI

**Abstract.** The paper has been intended to present the issues of studying dynamic properties of a rocket projectile. The study has been carried out and presented as the following sequence: theoretical analyses, experimental testing works, and their verification. With the theory of modelling applied, a physical model of a rocket projectile has been generated. A mathematical model has been formulated using the PRODAS software. With the latter one as the basis, simulation-based analyses have been made. Mass and aerodynamic characteristics and the most essential parameters of the flight path/trajectory have been found. What follows is the discussion of the experimental study of fundamental dynamic characteristics. Comparison of theoretically found results and those gained experimentally proves the generated model to be correct.

**Keywords:** mechanics, motion dynamics, ballistics, modelling, rocket projectile