

Dariusz KARCZMARZ<sup>1</sup>  
Jerzy MANEROWSKI<sup>2</sup>

### **MODELOWANIE I BADANIE DYNAMIKI PROCESÓW NAPROWADZANIA I LOTU STEROWANEJ RAKIETY PRZECIWLOTNICZEJ Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH**

*W artykule przedstawiono zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w modelowaniu dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety. Wykorzystano wyniki ze strzelań bojowych raketami zestawu przeciwlotniczego. Zamieszczono wyniki badań umożliwiające ocenę dokładności odwzorowania obiektu przez wyznaczony model.*

### **NEURAL MODEL OF ANTI-AIRCRAFT MISSILE FLIGHT CONTROL**

*Artificial neural networks application into the modeling of the anti-aircraft missile flight and guidance dynamics were presented in the paper. The real anti-aircraft missile unit combat firings have been used. The achieved model coefficients evaluating the simulated object imitation quality were included*

## **1. WSTĘP**

Modelowanie dynamiki lotu sterowanych obiektów powietrznych jest współcześnie przedmiotem zainteresowania licznych ośrodków naukowych. Modele matematyczne i symulacyjne wykorzystywane są m.in. w symulatorach szkolenia pilotów, obsług bojowych radarów i zestawów przeciwlotniczych, personelu stanowisk dowodzenia Sił Powietrznych, a także w badaniach przyczyn wypadków lotniczych [1-4,7-12].

W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych od wielu lat opracowywane są modele dynamiki lotu sterowanych obiektów latających w oparciu o wyniki pomiarów w locie z wykorzystaniem metod komputerowej identyfikacji [3,7-10]. W tej metodologii opracowania modeli, istotą jest dobór postaci równania określającego wartości sił i momentów sił aerodynamicznych działających na obiekt w zależności od parametrów ruchu oraz sterowania. Wartości współczynników tych równań określone są ww. metodami identyfikacji. W ogólnym przypadku wymienione równania odwzorowują siły i momenty sił aerodynamicznych w ograniczonym zakresie pełnego przedziału eksploatacji obiektu.

---

<sup>1</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6.  
tel: +48 22 685 19 46, fax: +48 22 685 11 82, e-mail: dariusz.karczmarz@op.pl

<sup>2</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6.  
tel/fax: +48 22 685 11 82, e-mail: jerzy.manerowski@op.pl

W niniejszej pracy, stanowiącej kontynuację problematyki [3], przedstawiono matematyczny model dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN) [5,6,9-11]. Problematyka wykorzystania sztucznych sieci neuronowych jest dziedziną, która jest rozwijana i wykorzystywana na całym świecie.

Opracowanie modeli matematycznych sterowanych obiektów latających metodami identyfikacji i z wykorzystaniem SSN jest trwałym dorobkiem i jedną ze specjalności ITWL. Opracowane modele zostały praktycznie wykorzystane w realizacji:

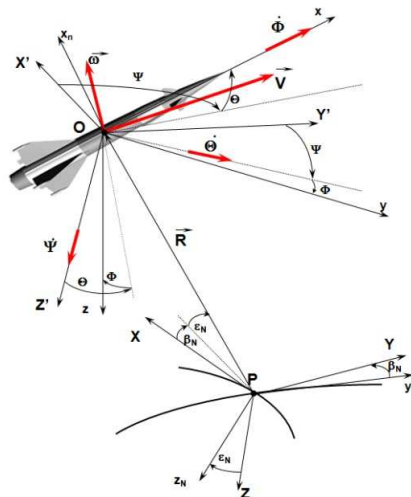
- systemu szkolenia dynamicznego wojsk radiotechnicznych i wojsk obrony przeciwlotniczej Sił Powietrznych „TAMIZA”,
- urządzenia oceny strzelań bojowych dla zestawu raketowego ,
- symulatorów lotu dla samolotów Orlik, TS-11 Iskra.

W dalszej części artykułu omówiona została metodologia wyznaczenia sieci neuronowej odwzorowującej obciążenia i komendy sterowania rakieta. Wykorzystano perceptronową sieć neuronową wraz z oprogramowaniem przedstawionym [6], analogicznie jak w [10]. Przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń z wykorzystaniem wyników pomiarów poligonowych.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Model matematyczny dynamiki lotu sterowanych obiektów powietrznych (rys. 1) w klasycznej postaci oparty jest na równaniach równowagi sił i momentów sił  $\underline{E}$ : bezwładności (B) z siłami i momentami sił aerodynamicznych (A), napędu (T), ciężkości (G) itd.:

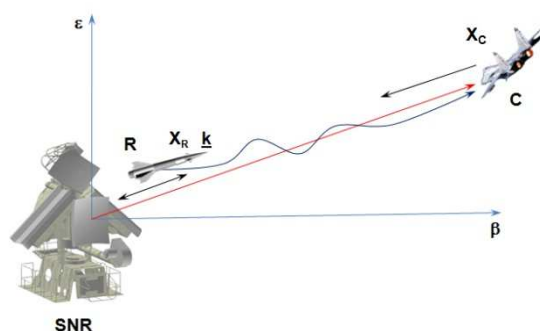
$$\underline{E}_B = \underline{E}_A + \underline{E}_T + \underline{E}_G + \dots \quad (1)$$



Rys. 1. Rozkład sił działających na raketę w układzie Oxyz

Ze względu na brak charakterystyk umożliwiających określenie modelu rozpatrywanego obiektu przyjęto (odmiennie niż np. w [2,4]), że określony będzie on metodą identyfikacji komputerowej wykorzystującą sztuczną sieć neuronową.

Poszukiwanie sprowadza się do wyznaczenia modelu sterowanego obiektu R naprowadzanego na cel C (rys. 2) – w oparciu o zarejestrowane wyniki podczas realnych strzelań poligonowych.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny rejestracji wyników podczas strzelań poligonowych

Poszukiwany model przeciwlotniczej rakiety (rys. 2) możemy opisać następująco:

$$\dot{\underline{\mathbf{X}}}_R = f(\underline{\mathbf{X}}_R, \underline{\mathbf{X}}_C, \underline{\mathbf{k}}(t), t) \quad (2)$$

$$\underline{\mathbf{k}}(t) = f(\dot{\underline{\mathbf{X}}}_R, \dot{\underline{\mathbf{X}}}_C, \underline{\mathbf{X}}_R, \underline{\mathbf{X}}_C, t)$$

gdzie:

- $\underline{\mathbf{X}}_R, \underline{\mathbf{X}}_C$  – wektor stanu rakiety (R) i celu (C), gdzie:
  - $\underline{\mathbf{X}}_R = [X_R, Y_R, Z_R]^T$ ,
  - $\underline{\mathbf{X}}_C = [X_C, Y_C, Z_C]^T$ ,
- $\underline{\mathbf{k}}$  – wektor komend kierowania,
  - $\underline{\mathbf{k}} = [k_\beta, k_\epsilon]$ , gdzie:
    - $k_\beta$  – składowa odchylenia,
    - $k_\epsilon$  – składowa pochylenia

Odpowiednio do uzyskanych danych ze stacji naprowadzania rakiet SRN (rys. 2) parametrów lotu i sterowania (2), do dalszych rozważań przyjęto równania ruchu w postaci zwrotnościowej [3,9,10].

$$\underline{\dot{\mathbf{Y}}}(t) = \underline{\mathbf{E}}_V(V, \epsilon) \underline{\mathbf{E}}_t(\epsilon, \beta) \underline{\mathbf{E}}^T(\Phi, \Theta, \Psi) (\underline{\mathbf{n}} + \underline{\mathbf{n}}_g) \quad (3)$$

gdzie:

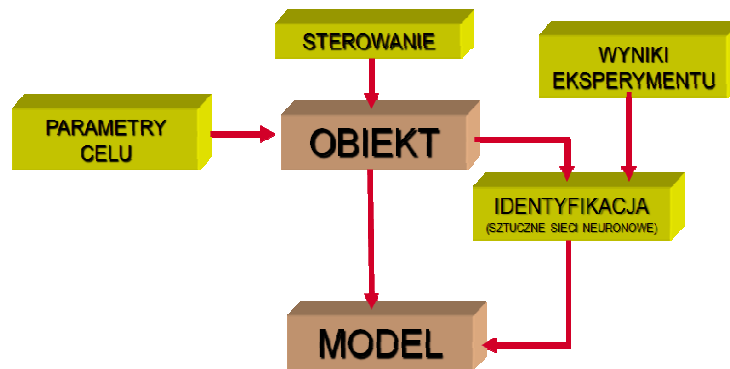
- $\underline{\mathbf{V}}$  – wektor stanu o wyrazach:  $\underline{\mathbf{V}} = [V, \varepsilon, \beta]^T$  (rys. 2.),
- $\underline{\mathbf{n}}$  – wektor przeciążeń aerodynamicznych (zależnych od komend kierowania  $k$ ) i silnikowych o wyrazach:  $\underline{\mathbf{n}} = [n_x, n_y, n_z]^T$ ,
- $\underline{\mathbf{n}}_g$  – wektor przeciążeń grawitacyjnych o wyrazach:  $\underline{\mathbf{n}}_g = [-\sin\varepsilon, 0, \cos\varepsilon]^T$  – (rys.2),
- $\underline{\mathbf{E}}_V, \underline{\mathbf{E}}_t, \underline{\mathbf{E}}^T$  – macierze transformacji [3],
- $\Phi, \Theta, \Psi$  – kąty Eulera określające położenie rakiety w układzie  $OX'Y'Z'$  (rys. 1).

W podanej zależności (3) praktycznie najtrudniejszym do wyznaczenia i zarazem decydującym o dokładności odwzorowania rzeczywistego obiektu jest wektor  $\underline{\mathbf{n}}$ . Odpowiednio do założeń artykułu wektor przeciążenia obliczony może być w oparciu o przetworzone wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie (podczas strzelań na poligonie). Szczegółowe informacje dotyczące wymienionych obliczeń przedstawiono w [3,9]. Modelowanie matematyczne omawianych przeciążeń jest przedmiotem rozważań kolejnego punktu artykułu.

### 3. WYZNACZENIE MODELU PRZECIĄŻEŃ

Zgodnie z założeniem przedstawionym we wstępie, poszukiwane związki pomiędzy parametrami ruchu rakiety i celu, sterowaniem oraz przeciążeniami aerodynamicznymi zostały wyznaczone w oparciu o identyfikację komputerową wykorzystującą sztuczną sieć neuronową [6].

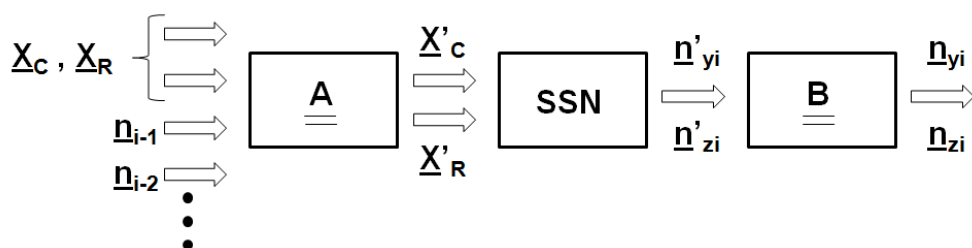
W celu przeprowadzenia wspomnianej identyfikacji niezbędna jest znajomość wyników eksperymentu. W tym przypadku są to dane ze strzelań bojowych na poligonie USTKA, które zostały uzyskane w trakcie prowadzonych przez ITWL badań nad systemem szkolenia jednostek OPL Sił Powietrznych „TAMIZA” (rys. 3.).



Rys. 3. Identyfikacja modelu rakiety wykorzystująca sztuczną sieć neuronową

Do wyznaczenia modelu matematycznego dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety wykorzystano, będącą najbardziej interesującą w technice, jednokierunkową, jednowarstwową sieć perceptronową z neuronami sigmoidalnymi.

Praktyczne obliczenia oparto na programie komputerowym wykorzystującym SSN JETNET 2.0 opracowaną w języku FORTRAN 77 [6]. Wymienione oprogramowanie wykorzystuje algorytm momentowej metody wstecznej propagacji błędów.

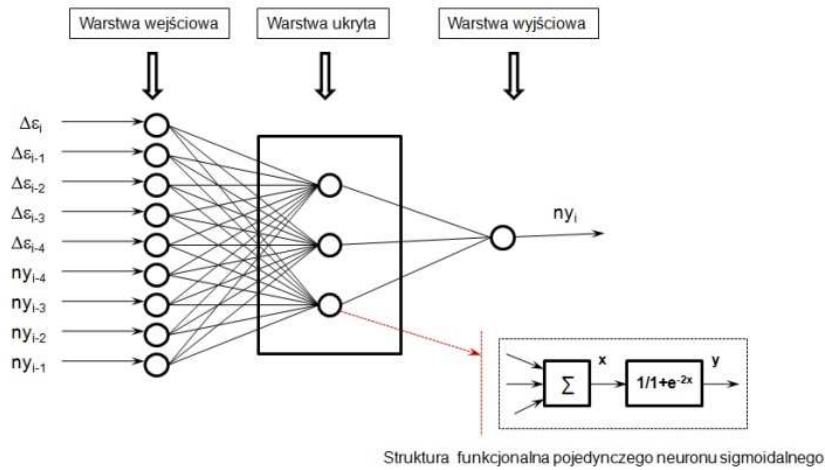


Rys. 4. Schemat modelu przeciążeń rakiety przeciwlotniczej z wykorzystaniem SSN

Model przeciążeń przeciwlotniczej rakiety kierowanej wyznaczono w oparciu o schemat (rys. 4), który odzwierciedla relacje pomiędzy parametrami ruchu celu i rakiety a przeciążeniami rakiety, gdzie:

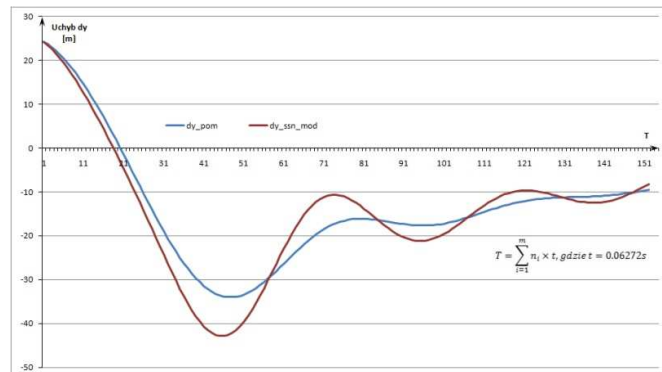
- $\underline{X}_R, \underline{X}_C$  – wektor stanu rakiety (R) i celu (C);
- $\underline{X}'_R, \underline{X}'_C$  – unormowany wektor stanu rakiety (R) i celu (C);
- $\underline{A}, \underline{B}$  – macierze współczynników;
- $n_{i-2}, n_{i-1}$  – przeciążenia w płaszczyznach pochylenia i odchylenia rakiety w kolejnych chwilach;
- $n'_{yi}, n'_{zi}$  – unormowane przeciążenia rakiety w płaszczyznach pochylenia i odchylenia;
- $n_{yi}, n_{zi}$  – wyjściowe przeciążenia rakiety w płaszczyznach pochylenia i odchylenia;

Niżej rozpatrzono sztuczną sieć neuronową (SSN) – rys. 4, odwzorowującą przeciążenia rakiety w chwili  $i$  w zależności od parametrów ruchu rakiety i celu, sterowania i wektora przeciążeń aerodynamicznych w chwilach poprzednich ( $n_{i-1}, n_{i-2} \dots$ ) – rys. 5, dla kierowanej rakiety przeciwlotniczej w płaszczyźnie odchylenia. Analogiczna sieć neuronowa odzwierciedla ww. związki w płaszczyźnie pochylenia rakiety.

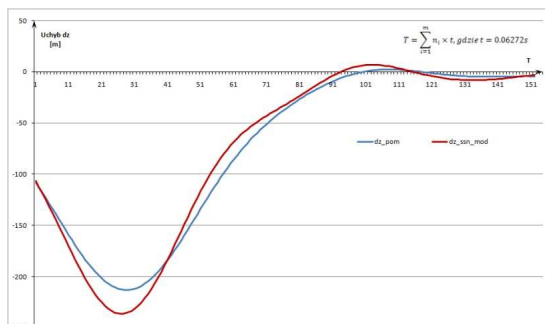


Rys. 5. Sieć neuronową, odwzorującą relację pomiędzy unormowanymi parametrami ruchu rakiety i celem a wektorem przeciążeń aerodynamicznych dla kierowanej rakiety przeciwlotniczej w płaszczyźnie odchylenia

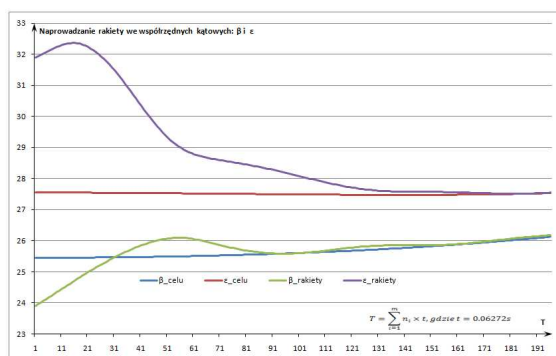
Z porównania wyników uzyskanych z eksperymentu (strzelań bojowych na poligonie) oraz testowania modelu przeciwlotniczej rakiety kierowanej, opartego na sztucznej sieci neuronowej (rys. 6a i 6b, 7a i 7b) widać, że dokładność odwzorowania dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety (przeciążeń aerodynamicznych) jest praktycznie identyczna z wynikami uzyskanymi z eksperymentu.



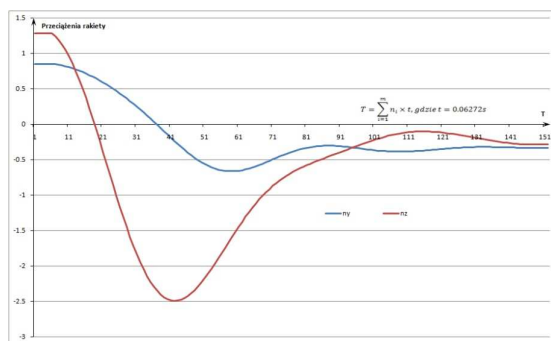
Rys. 6a. Porównanie przebiegu uchybów naprowadzania uzyskanych z eksperymentu i modelu opartego na sztucznej sieci neuronowej w płaszczyźnie odchylenia



Rys. 6b. Porównanie przebiegu uchybów naprowadzania uzyskanych z eksperymentu i modelu opartego na sztucznej sieci neuronowej w płaszczyźnie pochylenia



Rys. 7a. Przebieg procesu naprowadzania sterowanej rakiety przeciwlotniczej we współrzędnych kątowych uzyskany dla modelu opartego na sztucznej sieci neuronowej



Rys 7b. Przebieg przeciążeń sterowanej rakiety przeciwlotniczej uzyskany dla modelu opartego na sztucznej sieci neuronowej w płaszczyźnie odchylenia ( $n_y$ ) i pochylenia ( $n_z$ )

Na podstawie powyższego można uznać, iż model dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety oparty na jednowarstwowej, sztucznej sieci neuronowej poprawnie odwzorowuje rzeczywiste wielkości

#### 4. WNIOSKI

Uzyskane wyniki uzasadniają stwierdzenie, iż model matematyczny dynamiki procesu naprowadzania i lotu przeciwlotniczej rakiety, w którym relacje pomiędzy wektorem komend kierowania a wektorem przeciążeń aerodynamicznych określone są za pomocą sztucznej sieci neuronowej, odwzorowuje rzeczywisty obiekt w zakresie mechaniki lotu. Tak opracowany model może być zastąpiony modelem opracowanym metodami komputerowej identyfikacji [3, 9].

Przedstawiony model przeciwlotniczej rakiety może być wykorzystany w:

- ocenie stanu technicznego stacji naprowadzania rakiet,
- w systemie planowania misji,
- w symulatorach do szkolenia obsługi SD i dywizjonów OPL.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Borowczyk H., Lewitowicz J., Lindstedt P.: *The neural diagnostic method and a complex system of diagnosing airframe and powerplant*. ICAS-98-6,6,4
- [2] Gacek J., Baranowski L.: *Numeryczne badania dynamiki lotu rakiety niekierowanej rakiety z uszkodzoną głowicą*. ML-X 2002, 257-274
- [3] Golański P., Rymaszewski S.: *Identyfikacja modelu dynamiki procesów naprowadzania i lotu sterowanej rakiety*. Rozprawa doktorska, ITWL, Warszawa 2001
- [4] Goraj Z.: *Dynamika i aerodynamika samolotów manewrowych z elementami obliczeń*. IL BNIL, Warszawa 2001
- [5] Hazarika N., Tuncer I. H., Lowe D.: *An inverse design procedure for airfoils using artificial neural networks*. ICAS-98-2,2,1
- [6] Lonblad L., Peterson C., Rognvaldsson T.: *Pattern recognition in high energy physics with artificial neural networks – JETNET 2.0*. Computer Physics Communications 70, 1992
- [7] Manerowski J.: *Identyfikacja modelu dynamiki lotu poddźwiękowego samolotu*. MTiS, 1.30.1992, 51-69.
- [8] Manerowski J.: *The model of a helicopter's powerplant dynamics as constructed with a stochastic-approximation method for a pilot-training simulator*. Metrologia i Systemy Pomiarowe, VI, 1-2, 1999, 97÷105.
- [9] Manerowski J.: *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających*. Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa 1999
- [10] Manerowski J., Rykaczewski D.: *Modeling of UAV flight dynamics using perceptron artificial neural networks*. Journal of Theoretical And Applied Mechanics 43, 2, Warszawa 2005, 297-307
- [11] Marques F.D., Belo M.: *Identification of aircraft non-linear dynamics using Volterra series*. ICAS-98-1,10,5
- [12] Sybilski K.: *Metody analizy niekonwencjonalnych stanów lotu*. ML-X 2002, 307-320