

Piotr GOLAŃSKI  
Henryk SZKUDLARZ  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

## **ZASTOSOWANIE STEROWANIA ROZMYTEGO DO MODELOWANIA DZIAŁANIA PILOTA PODCZAS SYMULOWANEGO ROZBIEGU SAMOLOTU TS-11 „ISKRA”**

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania sterowania rozmytego do modelowania działania pilota. W pracy ograniczono się do modelowania działania pilota w trakcie realizacji procedury rozbiegu dla samolotu TS-11 „Iskra”. Poszukiwany model został ujęty w postaci regulatora rozmytego PID i zaimplementowany z wykorzystaniem metody Takagi–Sugeno.

### **Wstęp**

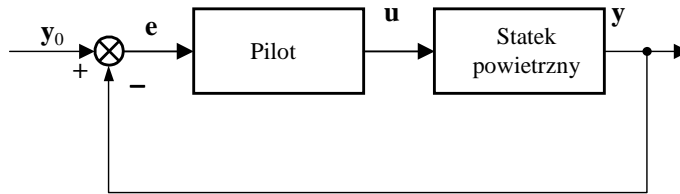
Zagadnienie budowy modelu działania pilota ma związek z eksploatowanym w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych symulatorem badawczo-konstrukcyjnym. Zadaniem symulatora jest badanie wpływu rozmieszczenia przyrządów w kabinie samolotu na jakość realizacji zadań przez pilota. Jakość ta może być określona poprzez porównanie wartości parametrów lotu osiąganych w trakcie wykonywania zadania przez pilota z wartościami parametrów lotu wzorcowego. Obecnie do generacji parametrów wzorcowych lotu wykorzystuje się uproszczony model dynamiki lotu samolotu TS-11 „Iskra”. Uproszczenie polega na przyjęciu kroku całkowania równego 1 s oraz sterowaniu samolotem poprzez skokową zmianę parametrów lotu. Model ten różni się zatem od zastosowanego w symulatorze badawczo-konstrukcyjnym, w którym krok całkowania jest równy 20 ms, a sterowanie odbywa się poprzez zmianę wychylenia sterów.

Zastosowanie tego modelu do generacji parametrów lotu wzorcowego wymaga jednak zdefiniowania pewnego modelu sterowania, który realizowałby proces sterowania statkiem powietrznym. Poszukiwany model powinien być modelem działania pilota, który z jednej strony uwzględnia ograniczenia charakterystyczne dla człowieka, z drugiej jednak strony dokładnie wykonuje procedury pilotażowe.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników prac nad określeniem modelu sterowania samolotem TS-11 „Iskra” w trakcie realizacji procedury rozbiegu, zgodnie z instrukcjami pilotażu dla tego samolotu [4, 8].

## 1. Sformułowanie problemu

W niniejszym artykule rozważany jest model lotu i sterowania statku powietrznego. Obydwa modele współpracują ze sobą, tworząc układ regulacji ze sprzężeniem zwrotnym, w którym model lotu statku powietrznego jest obiektem sterowanym, a model pilota regulatorem (rys. 1.) [4].



Rys. 1. Schemat blokowy sterowania statkiem powietrznym

W układzie tym wektor parametrów lotu statku powietrznego  $\mathbf{y}$  jest porównywany z wektorem parametrów nakazanych  $\mathbf{y}_0$ . Uwzględniając różnicę pomiędzy nimi, oblicza się wektor uchybu  $\mathbf{e}$ :

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0 \quad (1)$$

na podstawie którego pilot wyznacza wektor sterowania statkiem powietrznym  $\mathbf{u}$ . Elementami wektora  $\mathbf{u}$  mogą być np. wychylenia sterów kierunku, wysokości i lotek. W przedstawionym schemacie model statku powietrznego może być opisany jako pewna relacja  $M_D$  wiążąca ze sobą  $n$  parametrów mechanicznych, aerodynamicznych i nawigacyjnych  $p_i$ :

$$M_D = \langle p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n \rangle \quad (2)$$

Parametry  $p_i$  tworzą zbiór parametrów  $P$ . W zbiorze parametrów  $P$  można wyróżnić podzbiór  $m$  parametrów sterujących  $P_S$ , mających wpływ na pozostałe parametry, tzn.  $P_S \subset P$ .

Jak wspomniano we wstępie, poszukiwany jest model pilota  $M_S$ . Dane potrzebne do modelowania i identyfikacji procesu sterowania mogą być uzyskane z trzech źródeł [1]:

- apriorycznej wiedzy określającej fizykę danego zjawiska wyrażoną równaniami różniczkowymi,
- wiedzy empirycznej i eksperckiej wyrażonej regułami lingwistycznymi,
- danych pomiarowych otrzymanych z eksperymentu.

Jeżeli chodzi o aprioryczną wiedzę dotyczącą działania pilota, to z pracy [7] wynika, że model pilota jako operatora może być opisany w formie nieliniowego adaptacyjnego regulatora PID. Postać ogólna regulatora PID wyraża się zależnością:

$$u(t) = K_r \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (3)$$

gdzie:  $e(t)$  – sygnał błędu,  $u(t)$  – sygnał sterujący,  $K_r$  – współczynnik wzmocnienia,  $T_I$  – stała czasowa całkowania,  $T_D$  – stała różniczkowania.

Współczynniki równania zmieniają się w zależności od wartości sygnału błędu. I tak, dla małych wartości sygnału błędu człowiek działa jak regulator PI, natomiast dla dużych wartości – jak regulator PD. Obok tej wiedzy dostępna jest także wiedza ekspercka wyrażona w postaci reguł. Wiedza taka jest zawarta w literaturze [4, 8]. Można ją także uzyskać z wywiadu z pilotem.

W niniejszym artykule określenie modelu działania pilota zawężono do zagadnienia sterowania samolotem TS-11 „Iskra” w trakcie jego rozbiegu, realizowanego podczas procedury startu. Zgodnie z pracą [8] rozbieg samolotu polega na rozpędzaniu samolotu do prędkości 140 km/h, po czym pilot ma za zadanie unieść przednie podwozie samolotu na wysokość 15 cm. Dokonuje tego poprzez ściągnięcie na siebie drążka. O wielkości wychylenia drążka wiadomo jedynie tyle, że powinno ono być nieznaczne i płynne, a przestaje się zwiększać po oderwaniu kółka przedniego podwozia od drogi startowej. Poza tym wychylenie drążka wynika z sił, z jakimi oddziałują one na pilota. Po uniesieniu przedniego podwozia pilot ma za zadanie utrzymywać stałe pochylenie samolotu przy stałym położeniu maski samolotu względem linii horyzontu, aż do momentu oderwania podwozia głównego od drogi startowej.

Jak wynika z przedstawionego opisu, w wiedzy eksperta występuje dość dokładne liczbowe określenie parametrów wyjściowych sterowanego obiektu, natomiast mało precyzyjnie określone są parametry sterowania, jakim jest wychylenie drążka, a co za tym idzie – wychylenie steru wysokości. Z kolei parametry wyjściowe mają określone wartości brzegowe, ale nie ma zależności określającej przejście pomiędzy stanem początkowym a końcowym, kiedy to następuje osiągnięcie przez samolot zadanego pochylenia.

Ponieważ opis wiedzy dotyczącej rozpatrywanego zjawiska zawiera określenia „mały” i „duży”, wygodnie jest ją sformalizować w języku logiki rozmytej. Ponadto, jak wcześniej zostało wspomniane, człowiek działa jak nieliniowy

adaptacyjny regulator PID. Dlatego model działania pilota może być ujęty w postaci rozmytego kontrolera PID (ang. *fuzzy PID controller*). Temu zagadnieniu będzie poświęcona dalsza część artykułu.

## 2. Budowa modelu

Do zdefiniowania modelu reakcji pilota założono, że poszukiwany model ma symulować działanie człowieka, który w sposób idealny korzysta z wiedzy pilotażu i dla którego jedynym ograniczeniem są możliwości statku powietrznego. Dlatego wyznaczenie parametrów takiego modelu może być oparte na [4] wiedzy eksperta oraz modelu statku powietrznego działającego pod wpływem sterowania. Przyjęto, że w wyniku sterowania przez model pilota pochylenie samolotu powinno zmieniać się według pewnej krzywej sigmoidalnej (rys. 2.), przy czym stromość zbocza tej krzywej powinna wynikać z właściwości dynamicznych samolotu.

Jak już wspomniano, poszukiwany jest model pilota w postaci rozmytego regulatora PID. Ogólnie każdy model rozmyty składa się z następujących elementów (rys. 3.) [1, 2]:

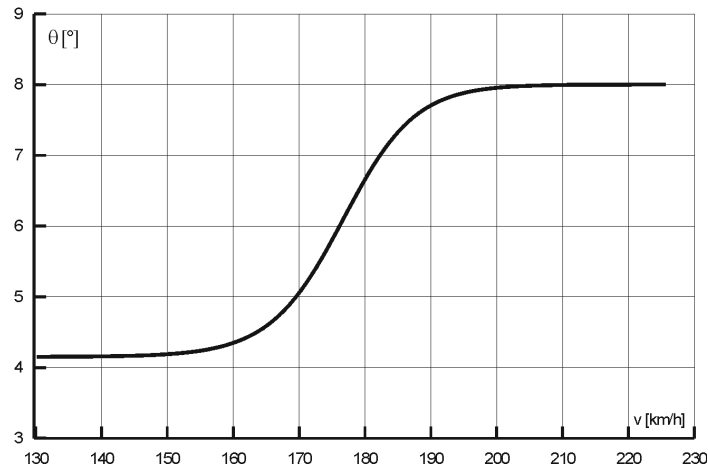
- bloku normalizacji standaryzującego poziom zmiennej wejściowej,
- bloku fuzyfikacji odwzorowującego przeskalowaną zmienną wejściową w odpowiedni zbiór rozmyty zwany funkcją przynależności,
- bazy reguł określających związki lingwistyczne pomiędzy zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi,
- maszyny wnioskującej określającej stopień spełnienia poszczególnych reguł,
- bloku defuzyfikacji generującego nierozmytą wartość zmiennej wyjściowej,
- bloku denormalizacji przekształcającego znormalizowaną wartość zmiennej wyjściowej do odpowiedniego poziomu.

Na strukturę i szczegółowy opis działania wymienionych elementów ma wpływ wiedza dotycząca danej dziedziny przedmiotowej. Dostarcza ona informacji niezbędnej do właściwego przekształcenia zmiennej ilościowej na zmienną rozmytą, określa zbiory rozmyte odwzorowujące wartości lingwistyczne stanu procesu i ich transformacje do wartości sterujących, zawiera fizyczne dziedziny zmiennych oraz ich znormalizowane odpowiedniki wraz z przelicznikami niezbędnymi do normalizacji i denormalizacji zmiennych [2].

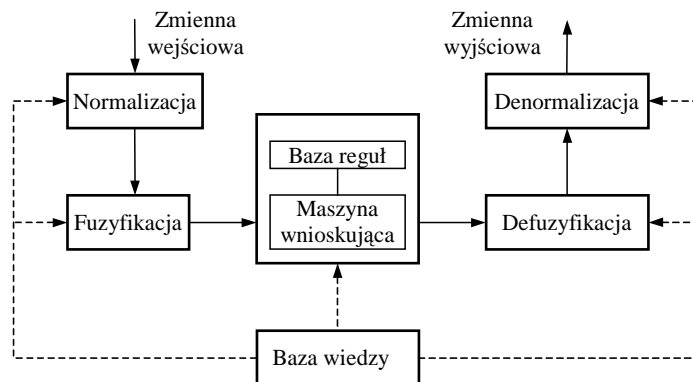
Ze względu na to, że poszukiwany jest model regulatora PID do fuzyfikacji zastosowano trzy funkcje przynależności związane ze składnikiem proporcjonalnym, inercyjnym i różniczkowym. Baza reguł została sformułowana za pomocą modelu Takagi–Sugeno, dla którego reguły te są zapisane w następującej postaci:

$$R_i : \text{If } e_P \text{ is } E_{P,i} \text{ and } e_I \text{ is } E_{I,i} \text{ and } e_D \text{ is } E_{D,i} \text{ then } u = f_i(\mathbf{e}) \quad (4)$$

gdzie:  $e_j$  – składowe proporcjonalna ( $e_P$ ), inercyjna ( $e_I$ ) i różniczkowa ( $e_D$ ) z zależności (3),  $E_{j,i}$  –  $i$ -ta funkcja przynależności dla  $j$ -tej składowej,  $f_i(\mathbf{e})$  – funkcja opisująca działanie regulatora.



Rys. 2. Oczekiwany przebieg zmian kąta pochylenia samolotu w trakcie rozbiegu



Rys. 3. Struktura modelu rozmytego

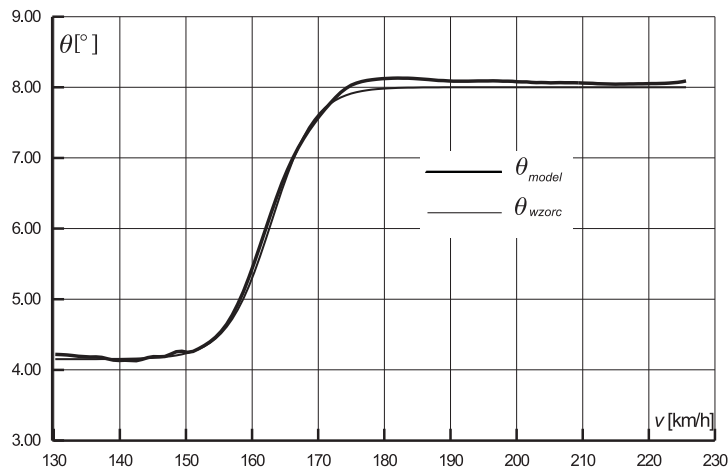
Do realizacji tak określonego modelu przyjęto metodologię stosowaną w tworzeniu systemów ekspertowych [3]. Polega ona na szybkim utworzeniu prototypu modelu, a następnie jego weryfikacji. Jeżeli wynik działania modelu okaże się niezadowalający, następuje powrót do kroku pierwszego, w którym

modyfikuje się ten model. Metodologia ta jest także stosowana w projektowaniu regulatora rozmytego [5].

Wstępnie przyjęto zbiór reguł, w następnikach zastosowano dwie funkcje określające dwa prawa sterowania. I tak dla reguł, w których w poprzednikach występowały duże wartości  $e_j$ , w następniku pojawiała się funkcja sterowania z małymi stałymi czasowymi  $T_D$  i  $T_I$ . Dla reguł z małymi wartościami  $e_j$  w następniku występowała funkcja  $f$  z dużymi wartościami czasów  $T_I$  i  $T_D$ . Podczas eksperymentu polegającego na sterowaniu modelem samolotu [6] w trakcie rozbiegu dokonywano zmian:

- w postaci reguł  $R_i$  oraz ich liczby,
- w opisach zbiorów  $E_{j,i}$ ,
- w zbiorach i współczynnikach funkcji  $f_i(\mathbf{e})$ .

W wyniku przeprowadzonych prób uzyskano końcową postać modelu, który w sposób zadowalający realizował proces sterowania. Na rysunku 4. przedstawiono wyniki działania tego modelu. Linia cieńszą zaznaczono przebieg wzorcowy zmiany kąta pochylenia samolotu  $\theta_{wzorc}$ , natomiast linią grubą przebieg zmiany kąta pochylenia uzyskany z modelu  $\theta_{model}$ .



Rys. 4. Wynik działania modelu sterowania

Jak wynika z rys. 4., model pozwala uzyskać takie sterowanie statkiem powietrznym, które umożliwia spełnienie wymagań narzuconych na zachowanie się samolotu w trakcie rozbiegu, a przebieg zmian pochylenia samolotu odpowiada jednemu z przebiegów wzorcowych. Zaproponowany model sterowania umożliwia maksymalnie szybkie osiągnięcie zadanego pochylenia samolotu oraz szybkie ustabilizowanie zadanej wartości kąta pochylenia.

### 3. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję budowy modelu działania pilota opartą na modelowaniu rozmytym. W określaniu struktury modelu przyjęto, że poszukiwany model ma postać regulatora rozmytego PID. Na prezentowanym etapie pracy zrealizowano sterowanie samolotu, obejmujące procedurę startu do chwili oderwania kół podwozia od powierzchni drogi startowej. Jako obiekt sterowania wykorzystano model dynamiki lotu samolotu TS-11 „Iskra”.

Do określenia początkowych parametrów modelu wykorzystano wiedzę eksperta, natomiast do jego weryfikacji – model statku powietrznego działającego pod wpływem sterowania. Osiągnięte wyniki pokazują, że zastosowanie modelowania rozmytego jest odpowiednią metodą do stworzenia modelu odwzorowującego działanie człowieka.

#### Literatura

- [1] Abonyi J.: Fuzzy model identification for control, Birkhauser, Boston 2003.
- [2] Bociek S., Gruszecki J.: Układy sterowania automatycznego samolotem, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
- [3] Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1990.
- [4] Instrukcja techniki pilotowania samolotu TS-11 „Iskra”, Lot 1851/78, zatwierdzona Zarządzeniem DWL nr 50, z dnia 07 czerwca 1978.
- [5] Michalewicz Z., Fogel D.B.: Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [6] Model dynamiki lotu sterowanego samolotu TS-11 „Iskra” dla symulatora badawczo-konstrukcyjnego, BiAK 3523/50 ITWL, Warszawa 2007.
- [7] Piegat A.: Fuzzy modeling and control, Physica-Verlag, Heidelberg 2001.
- [8] Samolot TS-11 „Iskra”. Metodyka szkolenia lotniczego, technika pilotowania i zastosowania bojowego, Lot. 2000/79, zatwierdzona Zarządzeniem DWL nr 131, z dnia 27 grudnia 1979.

### FUZZY CONTROL APPLICATION IN MODELLING OF PILOT ACTION DURING TAKEOFF ROLL SIMULATION FOR TS-11 AIRCRAFT

#### Abstract

This paper presents a concept of application of the fuzzy modelling to building a model of an ideal pilot. Here, the focus is on the model of pilot action during takeoff roll phase of flight. The proposed model structure is expressed in the form of fuzzy PID controller. For parameters identification of this model, an expert knowledge has been used. Furthermore, the methodology used in expert system building has been applied. It consists in fast prototyping of an initial model and then the modification of model parameters in the testing process. For testing, as a controlled object, the flight dynamic model of a TS-11 aircraft has been used. Finally, the result of model simulation, has been presented.

*Złożono w Oficynie Wydawniczej w sierpniu 2011 r.*