

dr inż. Piotr Golański
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Propozycja struktury programowej symulatora pilota

Artykuł dotyczy modelowania procesu sterowania statkiem powietrznym i budowy symulatora pilota opartego na zdefiniowanym modelu sterowania. Na wstępie przedstawiono cel budowy symulatora pilota. Podano ogólne założenia dotyczące tworzenia modelu układu człowiek-maszyna jak i szczegółowe problemy związane z symulacją działania pilota. Zaproponowano hierarchiczną dwupoziomową strukturę modelu pilota. Na obydwu poziomach zastosowano różne modele sterowania: pierwszy oparty na regułowym ekspertowym systemie sterowania oraz drugi oparty na logice rozmytej. Na zakończenie przedstawiono propozycję struktury programowej symulatora pilota oraz wyniki symulacji sterowania samolotem w trakcie rozbiegu.

A PROPOSAL OF PROGRAM STRUCTURE OF PILOT SIMULATOR

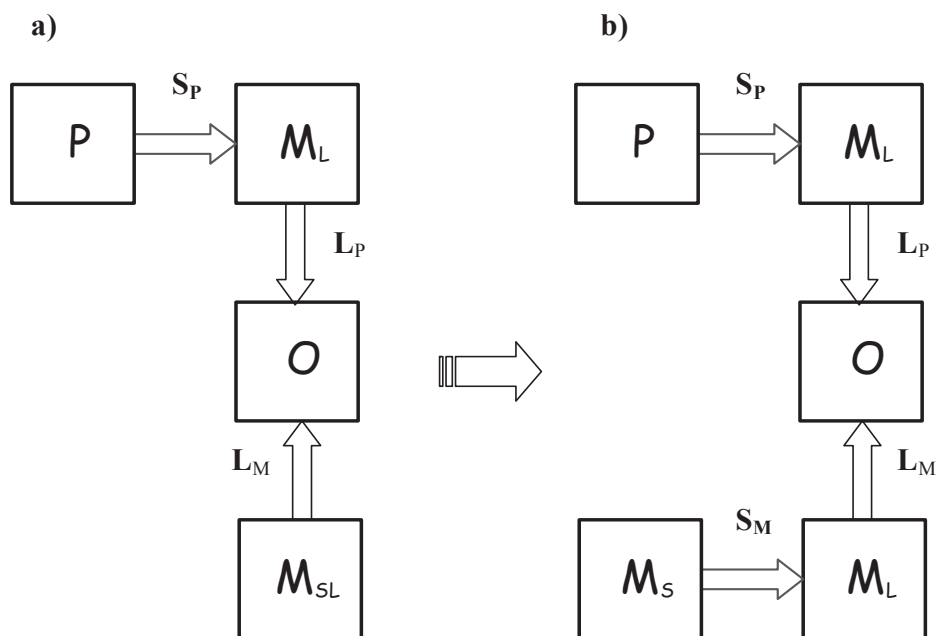
This paper concerns on the problem of modeling aircraft control process and on building of a pilot simulator based on the defined control model. At the beginning, it presents the main goal of building of a pilot simulator. It poses general assumption concerning the building of man-machine model and the particular one concerning the simulation of a pilot action. It proposes a hierarchical two-leveled pilot model. At each level there are applied difference control models. At first one is applied the rules based control and at the second one the fuzzy logic. Finally, it presents the proposal of the program structure of a pilot simulator and the results of simulator work.

1. WSTĘP

Potrzeba stworzenia symulatora pilota zaistniała w związku z prowadzonymi w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych badaniami wpływu rozmieszczenia przyrządów w kabinie samolotu na jakość realizacji zadań przez pilota. W tym celu zbudowany został symulator badawczo-konstrukcyjny [6]. Na rys. 1a przedstawiono pewną część symulatora pozwalającą na wykonanie przez pilota symulowanego lotu. W jego trakcie pilot P steruje modelem dynamiki lotu statku powietrznego M_L [8] (rys. 1), zmieniając wektor parametrów sterowania samolotu S_p . Wyniki eksperymentu są zapisywane w postaci parametrów lotu L_p , a następnie porównywane z wynikami wzorcowymi L_M w odpowiednim module oceny O . Wyniki wzorcowe są uzyskiwane z pewnego wzorcowego, symulowanego lotu, w którym zapewnione jest sterowanie, umożliwiające realizację takiego samego zadania, jakie było postawione przed pilotem. Symulację taką realizuje pewien uproszczony model M_{SL} . Uproszczenie polega na przyjęciu kroku symulacji równego 1 s i sterowaniu samolotem poprzez oddziaływanie bezpośrednio na jego parametry lotu, takie jak np. przechylenie i pochylenie zamiast na odpowiednie zmiany wychylenia lotek czy steru wysokości. Wynika stąd, że warunki generacji parametrów lotu pilota i parametrów wzorcowych są różne.

W celu uzyskania podobnych warunków generacji parametrów lotu pilota i parametrów wzorcowych należy w miejscu modelu uproszczonego zastosować model sterowania M_S , któ-

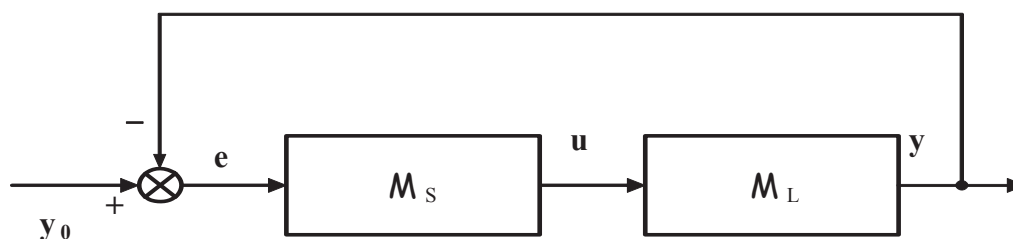
ry realizowałyby sterowanie modelem dynamiki lotu M_L (rys. 1b) tak jak pilot. Model taki powinien z jednej strony odzwierciedlać ludzkie ograniczenia, z drugiej dokładnie realizować procedury pilotażowe. Celem tego artykułu jest przedstawienie wyników prac nad określeniem struktury takiego modelu sterowania, jak również wynikającej z niego struktury programowej symulatora pilota.



Rys. 1. Schemat eksperymentu w symulatorze badawczo-konstrukcyjnym a) dotychczasowy, b) proponowany

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W niniejszym artykule będzie rozważany model lotu i sterowania statku powietrznego. Obydwa modele współpracują ze sobą, tworząc układ regulacji ze sprzężeniem zwrotnym, w którym model lotu statku powietrznego M_L jest obiektem sterowanym, a model sterowania M_S regulatorem, tak jak przedstawiono to na rys. 2 [5].



Rys. 2.

Schemat blokowy modelu sterowania statkiem powietrznym

W układzie tym wektor parametrów lotu statku powietrznego y jest porównywany z wektorem parametrów nakazany y_0 . W oparciu o różnicę pomiędzy nimi wyliczany jest wektor uchybu e :

$$e = y - y_0, \quad (1)$$

na podstawie którego model M_S wyznacza wektor sterowania statkiem powietrznym u . Elementami wektora u mogą być przykładowo: wychylenia steru kierunku, steru wysokości i lotek. W przypadku, gdy regulatorem jest człowiek model sterowania należy ująć w postaci nieliniowego adaptacyjnego regulatora PID [5].

Przedstawiony na rys. 2 model sterowania jest modelem uproszczonym - sprowadzającym się do układu kompensacji. W rzeczywistości pilot dysponuje także informacją o parametrach zadanych lotu y_0 (układ śledzenia), a także ma bezpośrednią informację dotyczącą sterowanego statku powietrznego y [4].

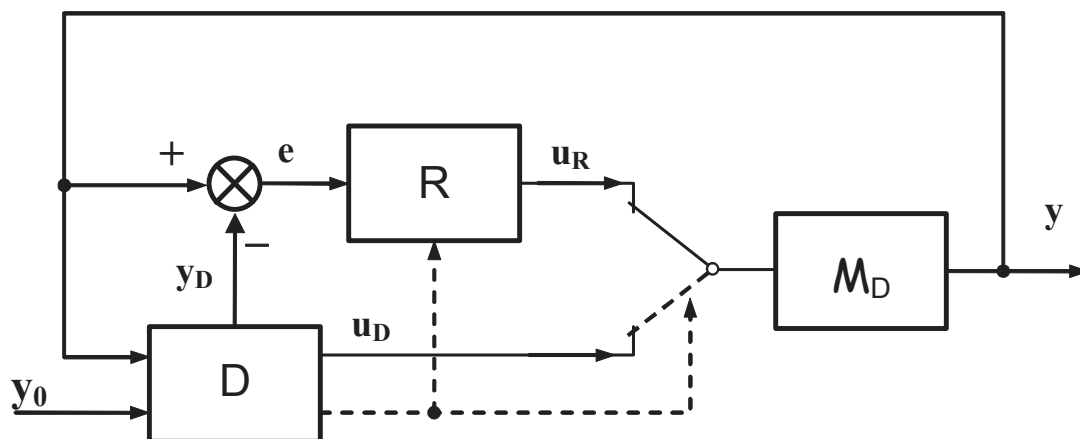
Złożoność procesu sterowania statkiem powietrznym jest widoczna już w przypadku sterowania samolotem podczas realizacji procedury rozbiegu. Na przykład dla samolotu TS-11 "Iskra", zgodnie z [7], rozbieg polega na rozpędzaniu samolotu do prędkości 140 km/h, po czym pilot ma zadanie unieść przednie podwozie samolotu na wysokość 15 cm. Dokonuje tego poprzez ściągnięcie drążka na siebie. O wielkości wychylenia drążka wiadomo jedynie tyle, że powinno ono być nieznaczne i płynne. Podczas odrywania kółka przedniego podwozia od drogi startowej pilot powinien utrzymywać stałe wychylenie drążka. Po oderwaniu kółka przedniego podwozia pilot powinien doprowadzić samolot do odpowiedniego pochylenia i utrzymać je poprzez odpowiednie zmiany wychylenia drążka sterowego, aż do momentu oderwania podwozia głównego od drogi startowej.

Można zauważyć, że w przedstawionym opisie działania pilota występują określenia dwójakiego rodzaju. Jedne w sposób dokładny precyzują warunki działania pilota, np. zdanie "unieść przednie podwozie samolotu na wysokość 15 cm". W innych stosowane są określenia przybliżone, np. "wychylenie drążka powinno być nieznaczne i płynne".

W modelu powinna zatem istnieć możliwość formalnego wyrażenia tych treści. Ponadto z rozważań zawartych w [4] wynika, że struktura modelu działania pilota jest hierarchiczna. Wymaga to rozbudowania schematu z rys. 2. W następnym punkcie zostanie przedstawiona propozycja struktury modelu działania pilota dla procedury rozbiegu samolotu TS-11.

3. PROPONOWANA STRUKTURA MODELU

Uwzględnienie wymagań zawartych w poprzednim punkcie prowadzi do wyodrębnienia w modelu M_S dwóch bloków: decyzyjnego D i regulatora R , które zostały przedstawione na rys. 3. Z rysunku wynika, że sterowanie powinno odbywać się na dwóch poziomach. Na pierwszym poziomie sterowanie odbywa się w pętli $R - M_D$. W tym układzie regulator R minimalizuje wektor uchybu e , który stanowi różnicę wektora wartości parametrów stanu samolotu y i wektora wartości zadanych y_D otrzymywanych z bloku D .



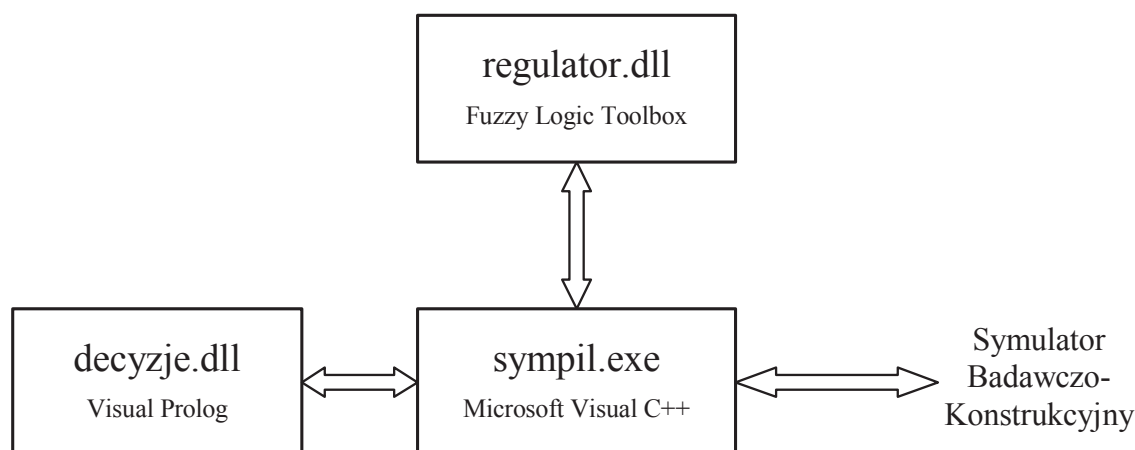
Rys. 3. Dwupoziomowa struktura modelu sterowania statkiem powietrznym

Zadaniem regulatora R jest utrzymywanie zadanych podstawowych parametrów lotu modelu M_D takich jak: odchylenie, pochylenie i przechylenie. O tym, jaki parametr i jaka jego wartość ma być osiągnięta i utrzymywana określa blok D . Ponadto blok ten koryguje działanie regulatora, bądź poprzez wybór odpowiedniej jego procedury, bądź poprzez wymuszenie własnego sterowania.

Obydwa bloki różnią się także sposobem działania. Regulator realizuje te czynności pilota, które są wyrażone w postaci instrukcji zawierających przybliżone określenia. Ponadto działa on jako nieliniowy adaptacyjny regulator PID. W związku z tym zaproponowano, aby ten blok zrealizować w postaci rozmytego regulatora PID [3]. Do definicji regulatora wykorzystano model Takagi-Sugeno dla trzech zmiennych wejściowych związanych ze składnikiem proporcjonalnym, inercyjnym i różniczkowym sygnału błędu e .

Blok D został ujęty w postaci regułowego systemu sterowania [2]. Pełni on rolę nadrzędną w stosunku do regulatora R . Struktura bloku jest w postaci ekspertowego systemu sterowania [1], wykorzystującego bazę wiedzy eksperta-pilota oraz mechanizmy wnioskowania. Jego funkcjonowanie oparte jest na regułach, w których występują dokładne wartości sterowanego obiektu. Spełnienie tych reguł powoduje wypracowanie decyzji sterujących, które:

- 1) dokonują wyboru odpowiedniej funkcji w bloku regulatora R ,
- 2) zmieniają wektor sygnału błędu e dla wybranej funkcji,
- 3) wyłączają z pracy regulator, podając na wyjście wypracowane sygnały sterujące u_D .

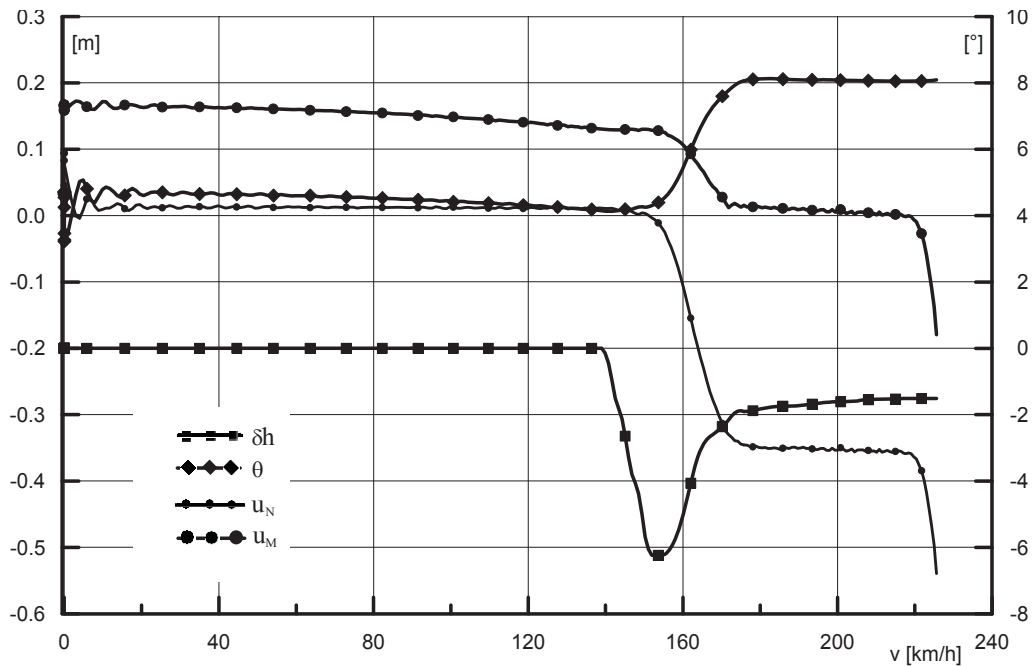


Rys. 4. Struktura oprogramowania

Zgodnie z przedstawionymi założeniami zbudowano symulator realizujący proces sterowania rozbiegiem samolotu TS-11 "Iskra". Regulator R zaimplementowano w postaci biblioteki dynamicznej DLL z wykorzystaniem funkcji z pakietu Fuzzy Logic Toolbox środowiska MATLAB [9]. Blok D został zrealizowany w środowisku Visual Prolog 7.1 i również stanowi bibliotekę dynamiczną (DLL). Funkcje obydwu bibliotek są wywoływane z poziomu aplikacji utworzonej w środowisku Microsoft Visual C++, komunikującej się z modułami programowymi symulatora badawczo-konstrukcyjnego (rys. 4).

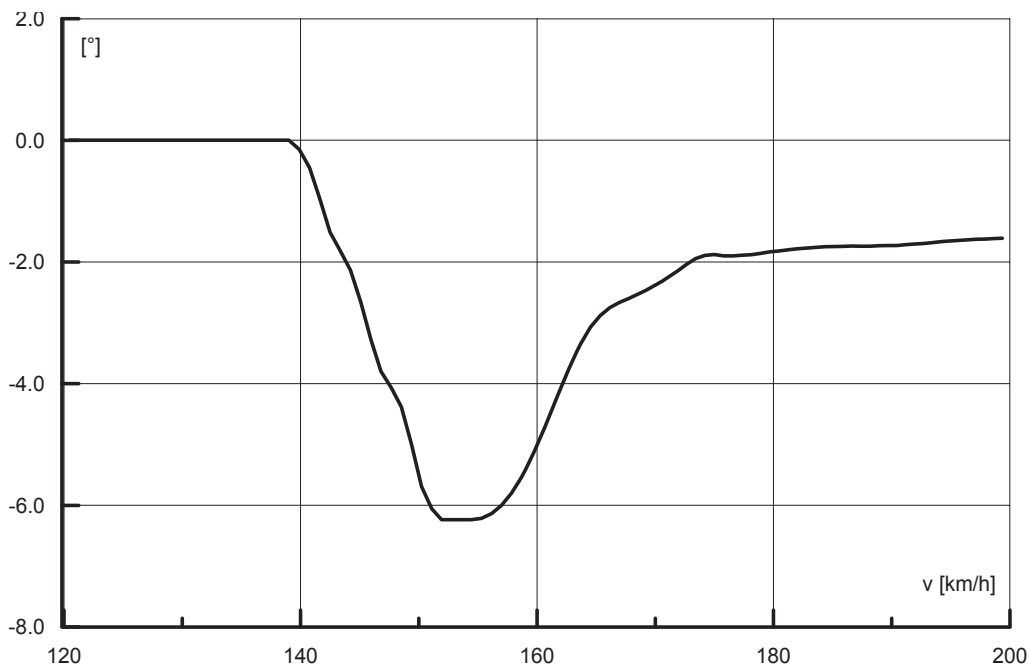
4. WYNIKI

Zastosowanie dwupoziomowej struktury sterowania samolotem powoduje, że w zależności od stanu samolotu nadrzędny moduł decyzyjny, bądź przekazuje sterowanie samolotem modułowi regulatora, bądź sam przejmuje sterowanie. Taki przypadek można zaobserwować podczas symulacji procesu sterowania rozbiegiem samolotu TS-11. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi czasowe zmian wybranych parametrów sterowania i lotu opisujących ten proces.



Rys. 5. Przebiegi zmian parametrów samolotu w trakcie rozbiegu

Proces rozbiegu przedstawiono od chwili uzyskania maksymalnych obrotów silnika oraz zwolnienia hamulców podwozia. Rozhamowanie podwozia powoduje zmniejszenie momentu pochylającego i odciążenie amortyzatora przedniego podwozia, co widać na wykresie pochyleń samolotu θ i ugięcia jego podwozia przedniego u_p . Do osiągnięcia przez samolot prędkości 140 km/h sterowaniem samolotu zajmuje się jedynie blok D.



Rys. 6. Wykres zmian kąta wychyleń steru wysokości w trakcie symulowanego rozbiegu samolotu

Po przekroczeniu prędkości 140 km/h włączana jest procedura sterująca wychyleń steru wysokości w regulatorze R. W wyniku jej działania stopniowo zwiększane jest wychyleń steru wysokości. W chwili oderwania kółka przedniego podwozia od drogi startowej ($u_p < 0$) blok D przerywa pętlę sterowania związaną z regulatorem R i przekazuje wartość zerowego przyrostu wychyleń steru wysokości do modelu dynamiki lotu. Jest to dobrze widoczne na

wykresie zmian wychylenia steru wysokości przedstawionego na rys. 6. Widać na nim zaznaczony płaski odcinek stałych wartości kąta wychylenia sterów ($\delta h \approx -6^\circ$). Tym samym realizowane jest zalecenie mówiące o utrzymywaniu przez pilota wychylenia drążka sterowego po oderwaniu koła przedniego podwozia. Następnie regulator jest powtórnie włączany w pętlę sterowania, aż do momentu oderwania kół podwozia głównego od drogi startowej ($u_G < 0$).

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że sterowanie kątem wychylenia steru wysokości jedynie przez regulator, zawsze prowadziło, bądź do powstawania przeregulowania, bądź powodowało zbyt duży czas narastania kąta poch`ylenia samolotu θ .

5. PODSUMOWANIE

Jak wynika z przedstawionych rozważań modelowanie procesu sterowania statkiem powietrznym, już w przypadku niezbyt złożonego zagadnienia jakim jest sterowanie w trakcie rozbiegu, jest zagadnieniem złożonym. Wymaga stworzenia odpowiedniej struktury sterowania, odzwierciedlającej wielopoziomowy sposób działania człowieka.

W pracy zaproponowano dekompozycję modelu pilota na dwa modele regulacji i decyzji. Model regulacji został zaproponowany w formie regulatora rozmytego, natomiast do budowy modelu decyzji wykorzystano podejście stosowane przy budowie systemów ekspertowych. Przyjęcie takiej struktury modelu miało wpływ na jego implementację. W zaproponowanej strukturze programowej każdy z modeli został zaimplementowany jako zestaw procedur bibliotek dynamicznych. Model sterowania został wyrażony z wykorzystaniem formalizmu logiki rozmytej w środowisku Fuzzy Logic Toolbox, natomiast model decyzji został wyrażony za pomocą reguł języka Prolog w środowisku Visual Prolog.

Działanie aplikacji zostało sprawdzone na przykładzie sterowania samolotem w trakcie realizacji procedury rozbiegu. Przedstawiony wynik dowodzi zasadności przyjętego rozwiązania. Ponadto podany przykład pokazuje duże możliwości modelu, jeśli chodzi o zmianę rodzaju sterowania w trakcie jego działania. Pozwala to przypuszczać, że przedstawiona koncepcja będzie mogła być zastosowana także dla innych przypadków sterowania samolotem.

BIBLIOGRAFIA

1. Bubnicki Z.: *Wstęp do systemów ekspertowych*, PWN, Warszawa 1990.
2. Golański P., Szkudlarz H.: *Budowa regułowego modelu systemu sterowania samolotem TS-11 „Iskra”*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 2/2009, s. 633–639.
3. Golański P., Szkudlarz H.: *Zastosowanie sterowania rozmytego do modelowania działania pilota podczas symulowanego rozbiegu samolotu TS-11 „Iskra”*, *Materiały VI Konferencji Awioniki*, Bezmiechowa 16–18 września 2010.
4. Morawski J.M. *Gospodarka informacją w układzie pilot-samolot*, Redakcja Wydawnictw Uczelnianych Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów-Warszawa 1994.
5. Piegat A.: *Fuzzy Modeling and Control*, Physica-Verlag Heidelberg, 2001.
6. Szczepański C. i in., *System komputerowego wspomaganie projektowania i optymalizacji interfejsów człowiek-system techniczny na przykładzie kokpitu wojskowego statku powietrznego*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 2/2008, s. 609–618.
7. *Samolot TS-11 Iskra, Metodyka szkolenia lotniczego, technika pilotowania i zastosowania bojowego*, wyd. Lot. 2000/79, zatwierdzona Zarz. DWL nr 131, z dnia 27.12 1979 r.
8. *Model dynamiki lotu sterowanego samolotu TS-11 Iskra dla symulatora badawczo-konstrukcyjnego*, BiAK 3523/50 ITWL, Warszawa 2007.
9. *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc., 2001.