

dr inż. Piotr Golański
 pilot mgr inż. Henryk Szkudlarz
 Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

BUDOWA REGULOWEGO MODELU SYSTEMU STEROWANIA SAMOLOTEM TS-11 ISKRA

W artykule przedstawiono metodę tworzenia modelu sterowania samolotem przez pilota. W pracy skupiono się na realizacji procedury startu. W tym celu wykorzystano instrukcje wykonywania lotu oraz wiedzę pilota. Na zakończenie przedstawiono postać regulowego modelu systemu sterowania samolotem oraz wyniki przeprowadzonych symulacji.

BUILDING OF RULES BASED AIRCRAFT CONTROL SYSTEM

This paper presents the method of building of aircraft control model. Here, the focus is on the model of taking off procedure. For this purpose the fly instruction and pilot knowledge has been used. Finally, the model formalization and simulation results, has been presented.

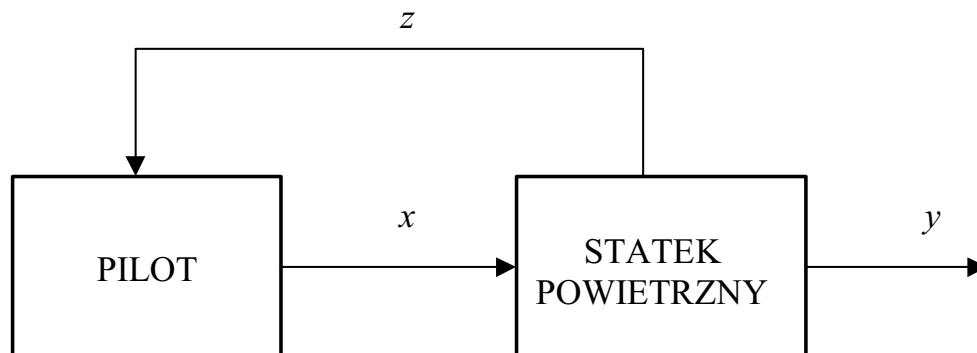
1. WSTĘP

Zagadnienie budowy modelu sterowania samolotem TS-11 Iskra, 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. Do generacji parametrów wzorcowych lotu wykorzystuje się uproszczony model dynamiki lotu. Uproszczenie polega na przyjęciu kroku całkowania równego 1s oraz na sterowaniu samolotem poprzez zmianę parametrów lotu z pominięciem sterów. Np. przechylenie jest zmieniane skokowo do zadanej wartości. Poza tym model nie umożliwia realizacji takich zadań jak start i lądowanie.

Celem tego artykułu jest przedstawienie wyników prac nad określeniem modelu sterowania samolotem na przykładzie startu samolotu TS-11 Iskra realizującego procedurę startu zgodnie z instrukcjami pilotażu dla tego samolotu [3, 4].

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Proces sterowania statkiem powietrznym można przedstawić w postaci ogólnej jako pewien układ sterowania ze sprzężeniem zwrotnym (rys. 1).



Rys. 1. System sterowania PILOT-STATEK POWIETRZNY

W układzie tym pilot steruje statkiem powietrznym podejmując decyzje x na podstawie obserwacji parametrów stanu statku powietrznego z oraz zadanych parametrów ruchu statku powietrznego y stanowiących cel sterowania.

W przedstawionym schemacie STATEK POWIETRZNY może być opisany jako pewna relacja M_D wiążąca ze sobą n parametrów mechanicznych, aerodynamicznych i nawigacyjnych p_i :

$$M_D = \langle p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n \rangle. \quad (1)$$

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. $P_S \subset P$. Model M_D jest znany i posłuży do weryfikacji poszukiwanego modelu opisującego proces podejmowania decyzji sterujących statkiem powietrznym.

Poszukiwany model można opisać jako pewną relację M_S , opisaną szóstką uporządkowaną [1]:

$$M_S = \langle X, Y, Z, W; \varphi, F \rangle, \quad (2)$$

gdzie: X – zbiór decyzji,

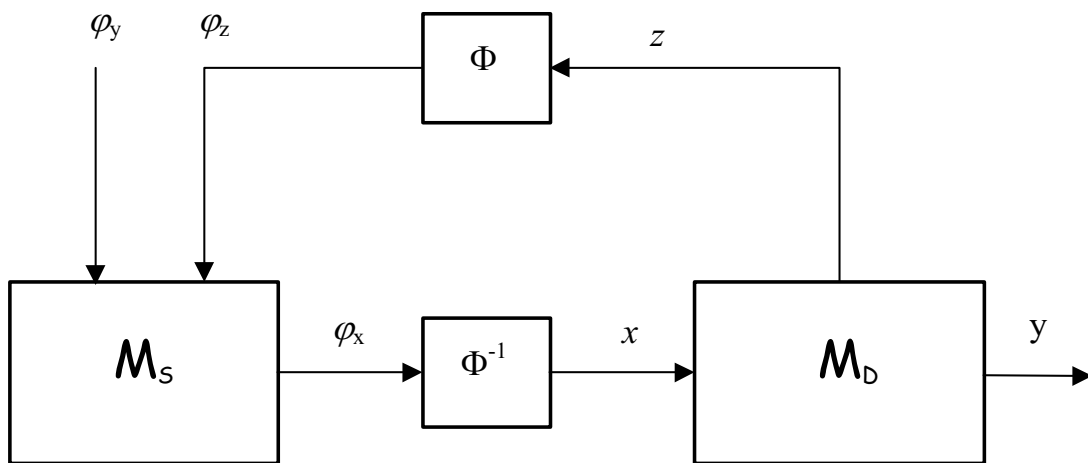
Y – zbiór wyników decyzji,

Z – zbiór obserwacji,

W – zbiór wielkości pośredniczących w sensie logiki dwuwartościowej,

φ – funkcja zdaniowa,

F – struktura logiczna.



Rys. 2. Model sterowania statkiem powietrznym

Na rys. 2. przedstawiono proces sterowania dla tak zdefiniowanych modeli sterowania i lotu. Na wejście modelu sterowania podawany jest wynik obserwacji oraz wymaganie dla wyjścia w postaci odpowiednich funkcji zdaniowych $\varphi_z(z)$ i $\varphi_y(y)$, tak aby był spełniony warunek:

$$\begin{cases} w[\varphi_z(z)] = 1 \\ w[\varphi_y(y)] = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Za pomocą funkcji zdaniowych tworzone są formuły elementarne a służące do formułowania faktów

$$\alpha_i = \varphi_i(x, y, z, w). \quad (4)$$

Fakty są powiązane ze sobą strukturą logiczną tworząc reprezentację wiedzy RW:

$$RW = \langle \alpha, F \rangle \quad (5)$$

Zadanie sterowania polega na znalezieniu decyzji sterującej $\varphi_x(x)$ dla danych RW oraz $\varphi_z(z)$ i $\varphi_y(y)$, tak aby prawdziwa była implikacja:

$$\varphi_x(x) \Rightarrow \varphi_y(y). \quad (6)$$

Dla zbudowania modelu sterowania niezbędne jest zdefiniowanie bazy wiedzy a następnie jego formalizacja za pomocą wybranego narzędzia.

3. BUDOWA REGULOWEGO MODELU STEROWANIA

3.1. Akwizycja wiedzy

W rozpatrywanym przypadku reprezentacja wiedzy RW stanowi wiedzę i doświadczenie pilota w sterowaniu statkiem powietrznym. Mimo, że wiedza w tej dziedzinie przedmiotowej jest dostępna w instrukcjach [3, 4], to jednak bardzo ważny w procesie akwizycji wiedzy jest wywiad z samym pilotem lub pilotami.

Akwizycję wiedzy na temat sterowania statkiem powietrznym rozpoczęto od zagadnienia startu. Rozpatrywanym statkiem powietrznym jest samolot szkolno-treningowy TS-11 Iskra. Dla tego samolotu start przebiega w następujących etapach:

- 1) czynności wstępne,
- 2) rozbieg I faza - do podniesienia koła przedniego podwozia,
- 3) rozbieg II faza – do oderwania podwozia głównego od drogi startowej,
- 4) wznoszenie.

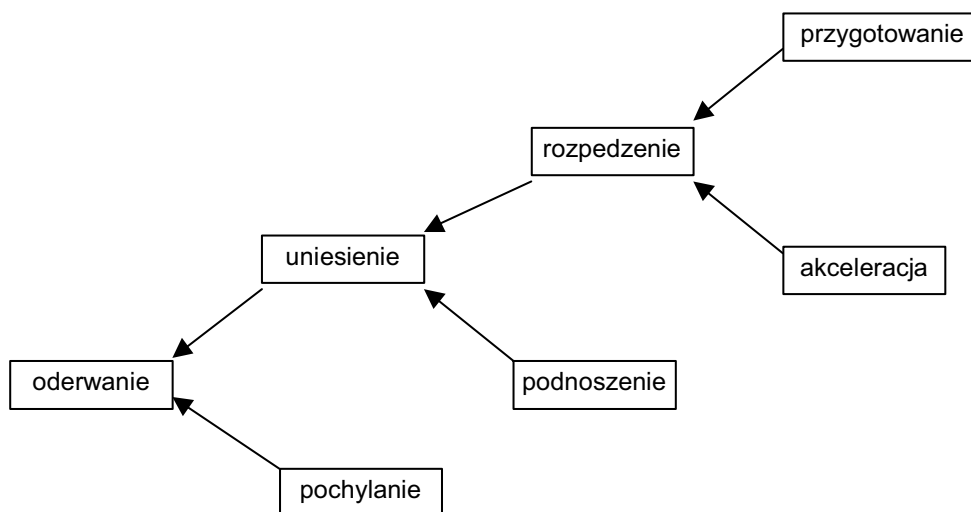
Wynikiem czynności wstępnych jest akceleracja silnika do obrotów maksymalnych przy zaciśniętych hamulcach podwozia a następnie rozhamowania podwozia. Ten etap nie stanowi problemu jeśli chodzi o zdefiniowanie dla niego reprezentacji wiedzy. Podobnie ma się sprawa z etapem 2). Samolot sam zwiększa swoją prędkość postępową, jedynie kierunek startu jest korygowany przez pilota za pomocą steru kierunku. Problemy pojawiają od momentu gdy pilot, ciągnąc dźwignię na siebie, powoduje podniesienie kółka przedniego podwozia. O wielkości wychylenia dźwigni wiadomo z [4] jedynie tyle, że powinno ono być nieznaczne i płynne. Z punktu widzenia algorytmizacji procesu sterowania jest to specyfikacja niewystarczająca. Nieco więcej można się dowiedzieć z wywiadu z pilotem. Wynika z niego, że ruch dźwigni ustaje po uniesieniu kółka przedniego podwozia. Poza tym regulacja wychylenia dźwigni wynika z sił z jakimi oddziałuje on na pilota. Również na etapie 3) pojawiają się problemy z określeniem numerycznych zależności na sterowanie dźwignią. Na tym etapie pilot powinien utrzymywać stałe pochylenie samolotu do momentu oderwania podwozia głównego.

Na podstawie przedstawionych danych, model sterowania, można jedynie określić w sposób jakościowy. W związku z tym przyjęto metodologię charakterystyczną dla procesu tworzenia

klasycznego systemu ekspertowego, polegającą na określeniu pewnego modelu początkowego, który jest modyfikowany w trakcie działania. W formułach elementarnych tego modelu decyzją sterującą x będzie wychylenia steru wysokości $\Delta\delta_h$, natomiast wymaganiem na wyjście y będzie parametr pochylenia samolotu θ_p . Przyjęto pewien początkowy zbiór parametrów Z^* stanowiący wielkości obserwowane z , zakładając, że jego ostateczna postać zostanie określona w fazie weryfikowania modelu starowania.

3.2. Reprezentacja wiedzy

Struktura logiczna reprezentacji wiedzy RW , określa w jaki sposób fakty na temat przedmiotowej wiedzy są ze sobą powiązane. Dla każdego zastosowania struktura jest inna i powinna odzwierciedlać specyfikę danego zagadnienia. W rozpatrywanym przypadku struktura powinna odzwierciedlać specyfikę procesu sterowania. W tym procesie określa się pewną funkcję celu sterowania dla którego określa się parametry sterowania. Dla rozpatrywanego przykładu startu fragment struktury sterowania można przedstawić w postaci schematu konceptualnego na rys. 3:



Rys. 3. Schemat konceptualny procedury startu

Schemat konceptualny pozwala przedstawić opis rozwiązania problemu z danej dziedziny przedmiotowej w ogólnej postaci z wykorzystaniem pojęć z tej dziedziny. Przedstawiony schemat stanowi zbiór stanów, określających kolejne fazy procesu. Cały proces można przedstawić wychodząc od celu sterowania, jakim jest oderwanie kół podwozia od drogi startowej. W takim przypadku można stwierdzić, że aby nastąpiło oderwanie samolot powinien mieć podniesione przednie podwozie oraz odpowiednie pochylenie i prędkość. Z kolei, aby nastąpiło uniesienie przedniego kółka podwozia samolot powinien mieć odpowiednią prędkość i wychylony pod odpowiednim kątem ster wysokości. Aby samolot rozpedzał się jego silnik powinien mieć obroty maksymalne.

W przedstawionym schemacie występuje wnioskowanie oparte na osiągnięciu celu (goal-driven reasoning) [2]. Ten mechanizm jest stosowany w maszynie wnioskującej języka Prolog, dlatego problem został sformalizowany w notacji tego języka za pomocą predykatów: oderwanie(), uniesienie(), pochylenie(), podnoszenie(), rozpedzanie() (rys. 4):

Predykаты z rys. 4 wykorzystują następujące fakty:

```

oderwanie() :-
    up1(Up1),
    Up1 < 0.0,
    up2(Up2),
    Up2 < 0.0.

oderwanie() :-
    uniesienie(),
    pochylenie().

uniesienie() :-
    up0(Up0),
    Up0 < 0.0.

uniesienie() :-
    rozpedzanie(),
    podnoszenie().

rozpedzenie() :-
    predkosc(V),
    V > 38.8,

rozpedzenie() :-
    przygotowanie(),
    akceleracja().

akceleracja() :-
    obroty(Obr),
    Obr > 15000.0.

```

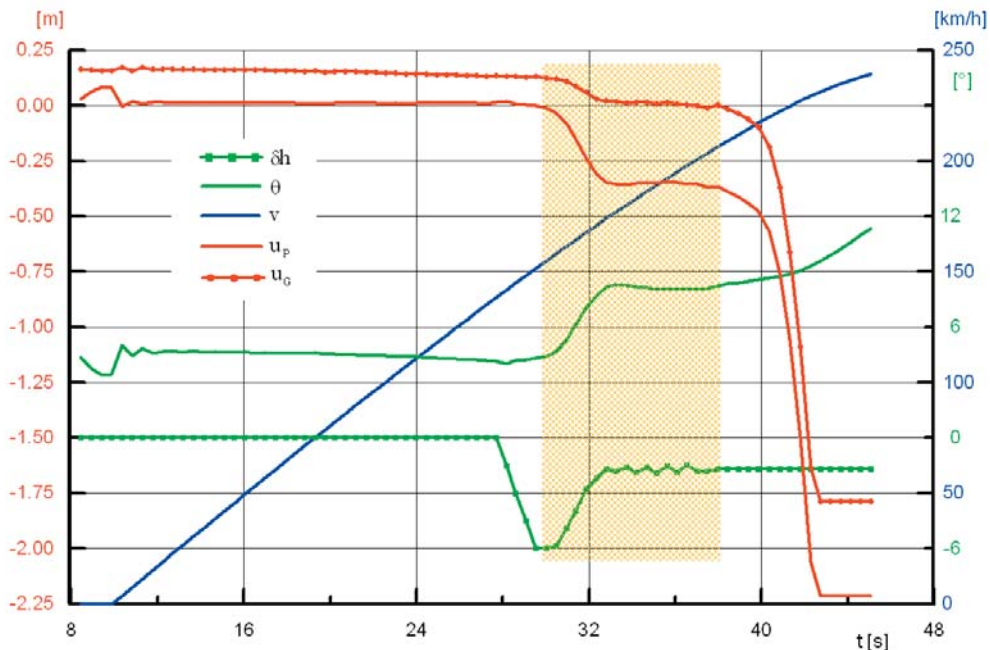
Rys. 4. Predykaty sterowania startem samolotu

- $up0(Up0)$ – określający ugięcie amortyzatora koła przedniego podwozia,
- $up1(Up1)$ – określający ugięcie amortyzatora lewego koła podwozia głównego,
- $up1(Up2)$ – określający ugięcie amortyzatora prawego koła podwozia głównego,
- $obroty(Obr)$ – określający obroty silnika,
- $predkosc(Obr)$ – określający prędkość postępową.

3.3. Weryfikacja modelu

Zdefiniowany w poprzednim punkcie model sterowania został zweryfikowany według schematu przedstawionego na rys. 2. Jako model M_D wykorzystano opracowany w ITWL model dynamiki lotu samolotu TS-11 Iskra [5]. Jak już wcześniej wspomniano model realizuje proces sterowania samolotem na etapie jego startu do momentu oderwania podwozia od drogi startowej. W związku z tym w modelu decyzją sterującą x jest zmiana wychylenie steru wysokości $\Delta\delta h$ i ustawienie dźwigni sterowania silnikiem DSS, nie ma natomiast sterowania klapami oraz chowania podwozia w trakcie wznoszenia. Ponieważ nie uwzględniono wpływu wiatru dlatego model nie steruje wychyleniem sterów kierunku oraz lotkami.

Zgodnie z założeniami z p. 2, w trakcie kolejnych prób modyfikowano postać reguł bazy wiedzy, jeśli chodzi o zbiór wielkości obserwowanych i ich wpływ na wyznaczenie decyzji sterującej. W wyniku poszukiwań zostało określone prawo sterowania określające zależność pomiędzy wartością decyzji sterującej x a wielkościami obserwowanymi z i wymaganiami na wyjście y . Proce sterowania dla tak wyznaczonego modelu można przedstawić w postaci wykresu przedstawiającemu przebiegi czasowe sygnału sterowania δh i odpowiadające im w czasie przebiegi charakterystycznych dla tego procesu parametrów lotu samolotu. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi takich parametrów uzyskane z zarejestrowanego procesu sterowania.



Rys. 5. Proces sterowania samolotem

Na rysunku przebiegi czasowe są przedstawione 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 pochylenia samolotu θ i ugięcia jego podwozia przedniego u_p . Po osiągnięciu przez samolot prędkości $v = 140$ km/h stopniowo zwiększane jest pochylenie steru wysokości do chwili oderwania kółka przedniego podwozia od drogi startowej. W wyniku pojawienia się momentu zwiększającego pochylenie samolotu, zmniejszane jest wychylenie steru wysokości i następuje taka jego regulacja, aby utrzymać stałe pochylenie samolotu z uniesionym przednim kołem. Przebiegi dla tej fazy startu zostały przedstawione na żółtym tle. W instrukcji [4] wysokość uniesienia jest określona w przedziale od 15 cm do 20 cm. Dla zastosowanego modelu wysokość ta wynosi ok. 35 cm. Ta rozbieżność jest to wynikiem pewnych założeń dotyczącym geometrii podwozia, która była modelowana pod kątem warunków stania samolotu [5]. Oderwanie kół podwozia głównego ($u_G < 0$) następuje przy prędkości $v = 203$ km/h.

W ramach weryfikacji wykonano 17 prób. Uzyskane w trakcie symulacji wyniki są następujące parametry startu:

- prędkość podniesienia kółka przedniego podwozia $v_p = 153 \div 165$ km/h,
- prędkość oderwania kół podwozia głównego $v_G = 194 \div 221$ km/h,
- utrzymywany kąt pochylenia samolotu dla $\theta_p \approx 8^\circ$.

4. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję budowy regułowego modelu systemu sterowania statkiem powietrznym. W koncepcji tej wykorzystano metodologię stosowaną w tworzeniu systemów ekspertowych. Struktura modelu została ujęta w postaci regułowego systemu ekspertowego, wykorzystującego bazę wiedzy eksperta-pilota oraz mechanizmy wnioskowania. Na obecnym etapie pracy zrealizowano sterowanie samolotu obejmujące procedurę startu, do chwili oderwania kół podwozia od powierzchni drogi startowej. Jako obiekt sterowania został wykorzystany model dynamiki lotu samolotu TS-11 Iskra.

Implementacja tak scharakteryzowanego systemu została zrealizowana w środowisku Visual Prolog 7.1 i stanowi bibliotekę dynamiczną (DLL) wykorzystywaną w symulatorze badawczo-konstrukcyjnym.

W ramach weryfikacji modelu przeprowadzono 17 prób startu. W trakcie tych prób parametry lotu osiągane w kolejnych etapach startu były zbliżone do podawanych w [4]. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że uzyskany model sterowania poprawnie odwzorowuje proces sterowania samolotem TS-11 Iskra w zakresie procedury startu.

LITERATURA

- [1] Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych, PWN, Warszawa 1990.
- [2] Merritt D.: Building Expert Systems in Prolog, Amzi! inc., 2000.
- [3] Instrukcja techniki pilotowania samolotu TS-11 Iskra, wyd. Lot 1851/78, zatwierdzona Zarządzeniem DWL nr 50, z dnia 07.06 1978.r.
- [4] Samolot TS-11 Iskra, Metodyka szkolenia lotniczego, technika pilotowania i zastosowania bojowego, wyd. Lot. 2000/79, zatwierdzona Zarządzeniem DWL nr 131, z dnia 27.12 1979 r.
- [5] Model dynamiki lotu sterowanego samolotu TS-11 Iskra dla symulatora badawczo-konstrukcyjnego, BiAK 3523/50 ITWL, Warszawa 2007.