

Sylwester Gładys, Marek Malarski,  
Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska

## MODEL RUCHU LOTNICZEGO W FIR WARSZAWA DLA PROCEDURALNEJ METODY STEROWANIA RUCHEM (ATC)

**Streszczenie.** Ruch lotniczy cywilnego lotnictwa komunikacyjnego jest organizowany i sterowany przez służby kontroli ruchu lotniczego (ATC). Ruch lotniczy i jego sterowanie zostały zamodelowane na komputerze IBM PC i wszechstronnie przebadane.

### 1. Wstęp

Ruch lotniczy cywilnego lotnictwa komunikacyjnego realizowany jest w ściśle zorganizowanych częściach przestrzeni powietrznych. Podstawową jednostką przestrzeni powietrznej jest "rejon informacji powietrznej" - FIR. Jest to wydzielony obszar, w którym określone służby "kontroli ruchu" - ATC pełnią na prawach wyłączności kontrolę i koordynację ruchu wszystkich samolotów w nim się znajdujących.

Ruch lotniczy w przestrzeniach kontrolowanych jest z wyprzedzeniem planowany i koordynowany, lecz jego realizacja podlega wielu losowym zakłóceniom. Służby kontroli ruchu lotniczego śledzą rzeczywistą realizację tego ruchu, zapewniając jego bezkolizyjność.

Przez pojęcie: systemu sterowania ruchem lotniczym rozumiany jest system wzajemnie oddziałujących na siebie i na ruch lotniczy służb kontroli ruchu lotniczego. System sterowania ruchem lotniczym ma hierarchiczną strukturę organizacyjną, składającą się z dwóch zasadniczych części: bloku ruchu i wielopoziomego bloku sterowania ruchem. Zrealizowany model ruchu lotniczego opisuje wzajemne oddziaływanie podsystemu sterowania bezpośredniego i procesu ruchu.

### 2. Ruch lotniczy w FIR

#### 2.1. Organizacja ruchu lotniczego

W lotnictwie komunikacyjnym stosowane są samoloty o porównywalnych osiąгах, w miarę jednolitym wyposażeniu, podobnych charakterystykach aerodynamicznych, przeznaczone do zbliżonych zadań. Wydzielono więc tę część ruchu lotniczego kierując go do fragaentu przestrzeni powietrznej

nazwanego przestrzenią powietrzną kontrolowaną (CTA).

Przestrzenie CTA dzielą się organizacyjnie i terytorialnie na:

- sieć dróg lotniczych AWY,
- obszary (rejon) kontrolowane lotnisk TMA,
- strefy kontrolowane lotnisk CTR.

Droga lotnicza AWY jest to część obszaru kontrolowanego, wydzielona w postaci korytarza o określonej szerokości, w której działają urządzenia radionawigacyjne. Drogi lotnicze przeznaczone są do wykonywania przelotów pomiędzy rejonami kontrolowanymi TMA i strefami kontrolowanymi lotnisk CTR. Obszary TMA i strefy CTR są to części przestrzeni CTA, w których wykonywane są manewry związane bezpośrednio ze startami i lądowaniami statków powietrznych.

W Polsce utworzono jeden rejon informacji powietrznej FIR - Warszawa obejmujący swym zasięgiem oprócz przestrzeni nad terytorium Polski również część przestrzeni nad Morzem Bałtyckim. W FIR - Warszawa wydzielono dwa sektory ATC - wschodni i zachodni, rejon TMA - Warszawa oraz kilkanaście stref kontrolowanych lotnisk CTR.

## 2.2. Sterowanie ruchem lotniczym

W przestrzeniach powietrznych CTA działają trzy rodzaje służb ATC:

- służba kontroli obszaru (ACC) - na drogach lotniczych (AWY),
- służba kontroli zbliżania (APP) - w rejonie kontrolowanym lotnisk (TMA),
- służba kontroli lotniska (TWR) - w strefie kontrolowanej lotniska (CTR).

Stosowane są dwie podstawowe metody prowadzenia kontroli ruchu lotniczego:

- proceduralna - oparta na biernej rejestracji przebiegu lotów,
- radiolokacyjna - funkcjonująca z wykorzystaniem urządzeń radarowych.

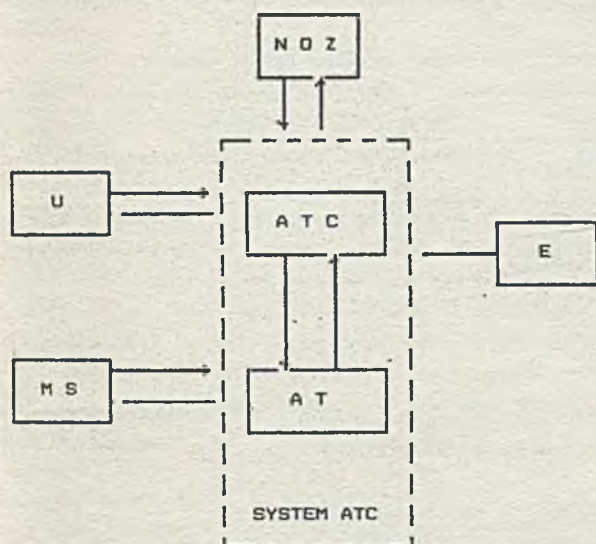
W metodzie proceduralnej służba ATC wykorzystuje informacje - meldunki otrzymywane z samolotów przelatujących nad z góry określonymi naziemnymi punktami meldunkowymi (z reguły - pomocami radionawigacyjnymi). W radarowej kontroli ruchu lotniczego dane o pozycji samolotów pochodzą z radaru naziemnego. Dla zapewnienia bezpieczeństwa lotów służby ATC utrzymują pomiędzy statkami powietrznymi lecącymi w przestrzeni kontrolowanej odpowiednie odległości, zwane separacjami. Parametry tych separacji określają szczegółowe przepisy międzynarodowe [1].

W obszarach przestrzeni powietrznej o dużym natężeniu ruchu lotniczego przyjęto określone zasady działania i wzajemnej współpracy służb ATC. Taka współpraca służb ATC tworzy system sterowania ruchem lotniczym (system ATCS), zapewniający utrzymanie warunków bezpiecznego i wydajnego użytkowania przestrzeni powietrznej.

System ATCS składa się z dwóch zasadniczych części: bloku sterowanego

AT (Air Traffic) reprezentującego ruch lotniczy i bloku sterującego ATC (Air Traffic Control) obejmującego sterowanie ruchem. Informacjami nadchodzącymi do systemu z otoczenia są :

- informacje nadrzędnego organu zarządzającego (blok NOZ),
- informacje przedsiębiorstw przewozowych korzystających z transportu lotniczego, (blok U),
- informacje ze współdziałającego wojskowego systemu sterowania ruchem lotniczym (blok MS),
- zakłócenia oddziałujące na obiekty systemu ATCS (blok E).



Rys.1. System ATCS i jego otoczenie

Fig.1. ATCS system and its environment.

### 3. Model ruchu lotniczego w FIR

W realizacji modelu uwzględniono przedstawioną uprzednio strukturę systemu ATCS. Główny nacisk położono na dokładne odwzorowanie ruchu lotniczego i sterowania bezpośredniego. Wpływ otoczenia uwzględniono za pomocą zadanych procedur i zasad określonych odpowiednimi dokumentami. Zrealizowany model systemu ATCS przedstawia rys.2.

Działanie modelu systemu ATCS można więc opisać następująco :

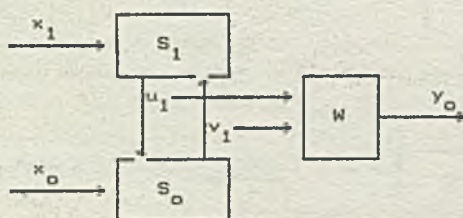
$$S_1 : X_1 \times V \rightarrow U \quad \text{tzn.} \quad u_1 = S_1(x_1, v_1)$$

$$S_o : X_o \times U \Rightarrow V_1 \quad \text{tzn. } v_1 = S_o(x_o, u_1)$$

$$W : U \times V \Rightarrow Y \quad \text{tzn. } y = W(u, v)$$

gdzie:

- $S_1$  - obiekt sterujący
- $S_o$  - obiekt sterowany
- $W$  - blok opracowania wyników
- $X_o, X_1$  - zbiory parametrów wejściowych  $x_o, x_1$
- $U$  - zbiór oddziaływań aktywnych  $u_1$
- $V$  - zbiór oddziaływań pasywnych  $v_1$
- $Y_o$  - zbiór parametrów wyjściowych  $y_o$ .



Rys.2. Model systemu ATCS

Fig.2. ATCS system model,

Odtwarzając rzeczywistą organizację ruchu w przestrzeni CTA zdekomponowano systemy  $S_o, S_1$  na pary podsystemów  $S_{oi}, S_{1i}$  odpowiadające podziałowi na sektory ATC.

Dane wejściowe bloku sterowanego  $S_o$  zawierają :

- G - parametry określające strukturę tras lotów,
- C - parametry określające strukturę przepływu strumieni samolotów,
- A - charakterystyki obiektów sterowania, zasady wykonywania lotów.

Dane wejściowe bloku sterującego  $S_1$  zawierają :

- G<sub>1</sub> - parametry określające organizację przestrzeni i podział na sektory ATC,
- R - charakterystyki obiektów sterujących (metody prowadzenia kontroli, normy stosowanych separacji),
- K - charakterystyki technicznych środków sterowania.

Ponadto na system ATCS wpływają zewnętrzne oddziaływania wymuszające  $E$ , zawierające:

- F - czynniki meteorologiczne,
- Φ - ograniczenia w wykorzystaniu poszczególnych tras, poziomów, lotnisk,
- P - błędy oceny sytuacji lotniczej.

Dane wejściowe modelu można podzielić na dane mające charakter losowy (parametry określające strukturę przepływu strumieni samolotów  $C$  i

oddziaływania zewnętrzne E) i deterministyczne (pozostałe dane wejściowe). Zmiennymi wyjściowymi modelu ( $y_0$ ) są informacje zawierające charakterystyki procesu ruchu lotniczego i obciążenia pracą kontrolera sektora ATC.

Ze względu na losowy charakter części parametrów opisany model należy do klasy modeli probabilistycznych. Model jest tak skonstruowany, że możliwe jest modyfikowanie jego parametrów, warunków zewnętrznych, procesów i procedur ATC. Możliwe jest również wprowadzanie powtórzeń procesu dla otrzymania wiarygodnej oceny statystycznej. Wymagania te zrealizowano przyjmując modułowość struktury, umożliwiającą zmiany, reorganizację i modyfikacje programów nie naruszając logiki modelu i jego ogólnej struktury.

Prezentowany model wykorzystuje wyniki prac nad modelami cząstkowymi ruchu lotniczego, które dotychczas zrealizowano w Instytucie Transportu Politechniki Warszawskiej [2].

Program realizujący model symulacyjny systemu ATCS składa się z trzech niezależnych części:

- DANE WEJŚCIOWE - organizacja przestrzeni powietrznej, sieci tras, generowanie planu lotów samolotów dla całej modelowanej przestrzeni, wprowadzanie charakterystyk systemu ATCS,
- SYMULACJA - symulacja ruchu lotniczego i jego sterowania,
- OPRACOWANIE WYNIKÓW - analiza rezultatów modelowania.

Przestrzeń powietrzna podlegająca modelowaniu obejmuje przestrzeń FIR Warszawa. Scharakteryzowana jest poprzez sieć

$$S = \langle G, \{\xi_i\}, \{\psi_j\} \rangle$$

gdzie :

- graf  $G = \langle K, U, P \rangle$ ,
  - zbiór funkcji  $\{\xi_i\}$ ,  $i=1,2,..I$  określonych na zbiorze wierzchołków grafu,
  - zbiór funkcji  $\{\psi_j\}$ ,  $j=1,2,..J$  określonych na zbiorze gałęzi grafu.
- $G$  jest grafem zwykłym składającym się ze zbioru wierzchołków  $k_i$  ( $i=1,2,..n$ ) będących punktami kontrolnymi przestrzeni CTA i ze zbioru gałęzi  $u_j$  ( $j=1,2,..m$ ) odpowiadających odcinkom dróg lotniczych pomiędzy wybranymi wierzchołkami.

Relacja  $P \subset K \times U \times K$ , określająca incydentność punktów i odcinków, scharakteryzowana jest jednoznacznie poprzez binarną macierz przyległości wierzchołków grafu.

Funkcje  $\xi_i: K \rightarrow R$   $i=1,2,..I$  przyporządkowują punktom kontrolnym kod, nazwę, identyfikator przynależności do sektora ATC i wskaźnik obowiązku meldunku pozycyjnego, określają: rodzaj punktu, rodzaj pomocy radionawigacyjnej w tym punkcie, lokalizację w tablicy sytuacji ruchowej. Funkcje  $\psi_j: U \rightarrow R$   $j=1,2,..J$  przyporządkowują odcinkom dróg lotniczych długość, magnetyczny kąt drogi, dolne i górne ograniczenia poziomu lotów.

W grafie  $G$  wyróżniono zbiór marszrut  $G_M$ . Marszruta lotu  $M_j$  jest ciągiem punktów kontrolnych  $k_i \in K$  i odcinków  $u_j \in U$  łączących określone

pary punktów. Poszerzając marszrutę o punkty wlotu i wylotu z obszaru, otrzymano trasę lotu. Każdej trasie lotu przyporządkowano identyfikator kierunku trasy (wschodni, zachodni).

Ustalając dane o obiektach sterowania  $A$ , przeanalizowano parametry techniczno - ruchowe samolotów określając w każdej grupie szybkości:

- optymalny i maksymalny poziom lotu,
- prędkość optymalną na optymalnym poziomie,
- prędkość minimalną,
- optymalne i maksymalne przyspieszenie,
- optymalne i maksymalne zwalnianie,
- średnią prędkość wznoszenia i zniżania,
- w zależności od poziomu lotu:
  - rozkład optymalnej i maksymalnej prędkości,
  - rozkład optymalnej i maksymalnej prędkości wznoszenia,
  - rozkład optymalnej i maksymalnej prędkości zniżania.

Strukturę przepływu strumieni samolotów  $C$  w modelowanej sieci dróg lotniczych  $S$  opisują funkcje określone na zbiorze marszrut  $G_M$ . Dla każdej marszruty lotu określone są rozkłady typów samolotów, rodzajów lotów, poziomów: wlotowych, przelotowych i wylotowych.

Zatem  $C = \langle G_M \vee T_{WE} \vee B \vee H \vee R, \xi \rangle$

gdzie:  $\xi : G_M \rightarrow T_{WE} \times B \times H \times R$  - funkcja przyporządkowująca danej marszrucie  $G_M$ :

- $T_{WE}$  - rozkład czasu wlotu,
- $B$  - rozkład dostępnych typów samolotów,
- $H$  - rozkład przydzielonych poziomów lotu,
- $R$  - rozkład rodzajów lotów.

Wejściowe dane pomocnicze mogą zawierać: dodatkowe ograniczenia w punktach i odcinkach oraz parametry sytuacji meteorologicznej. Ponadto w danych wejściowych zawarte są informacje o obowiązującym połówkowym systemie ustalania poziomów lotu, parametry sytuacji meteorologicznej określające prędkość i kierunek wiatru na wszystkich odcinkach sieci.

Przyjmując zadaną strukturę sieci tras lotniczych  $S$ , parametrów przepływu strumieni samolotów  $C$ , charakterystyki samolotów  $A$ , ograniczenia na loty  $\Phi$ , warunki meteorologiczne i inne zakłócenia  $E$  formułuje się plany lotów dla całej modelowanej przestrzeni. Wektor planu  $i$ -tego samolotu składa się z następujących elementów:

$\{ N, TR_j, b, r, t_{pow}, t_{we}, t_{wl}, H_{wl}, v_{wl}, H_{przel}, \Delta t_{wy}, H_{wy} \}_i$

gdzie:

- $N$  - numer samolotu
- $TR_j$  - numer trasy lotu
- $b$  - typ samolotu
- $r$  - rodzaj lotu
- $t_{pow}$  - czas powiadomienia o wlocie

- $t_{we}$  - czas wejścia do sytuacji ruchowej  
 $t_{wl}$  - czas wlotu  
 $H_{wl}$  - poziom wlotowy  
 $V_{wl}$  - prędkość w chwili wlotu  
 $H_{przel}$  - poziom przelotowy  
 $\Delta t_{wy}$  - czas, po jakim następuje usunięcie samolotu z sytuacji ruchowej po przelocie punktu wylotowego  
 $H_{wy}$  - poziom wylotowy.

Dla samolotów wlatujących w obszar na poziomie FL 0 bezpośrednio po starcie z lotniska krajowego, przewidziano możliwość dołączenia dwóch dodatkowych elementów:

- $t_{zw}$  - czas, po jakim samolot osiągnie punkt kontrolny, od którego nastąpi pełna identyfikacja położenia,  
 $H_{zw}$  - poziom osiągnięty po czasie  $t_{zw}$ .

Na bazie wyznaczonych danych określających przepływ strumieni samolotów C, tworzy się odpowiednie dystrybuanty, służące do skonstruowania programowych generatorów. Wszystkie programowe generatory liczb losowych wykorzystują ten sam generator o rozkładzie równomiernym z przedziału (0,1); wykorzystano generator opracowany przez firmę Texas Instruments.

Przed rozpoczęciem generowania planu lotów należy określić maksymalną liczbę samolotów w planie lotów  $N_{max}$  (intensywność ruchu lotniczego). Kolejność generowania elementów planu jest następująca:

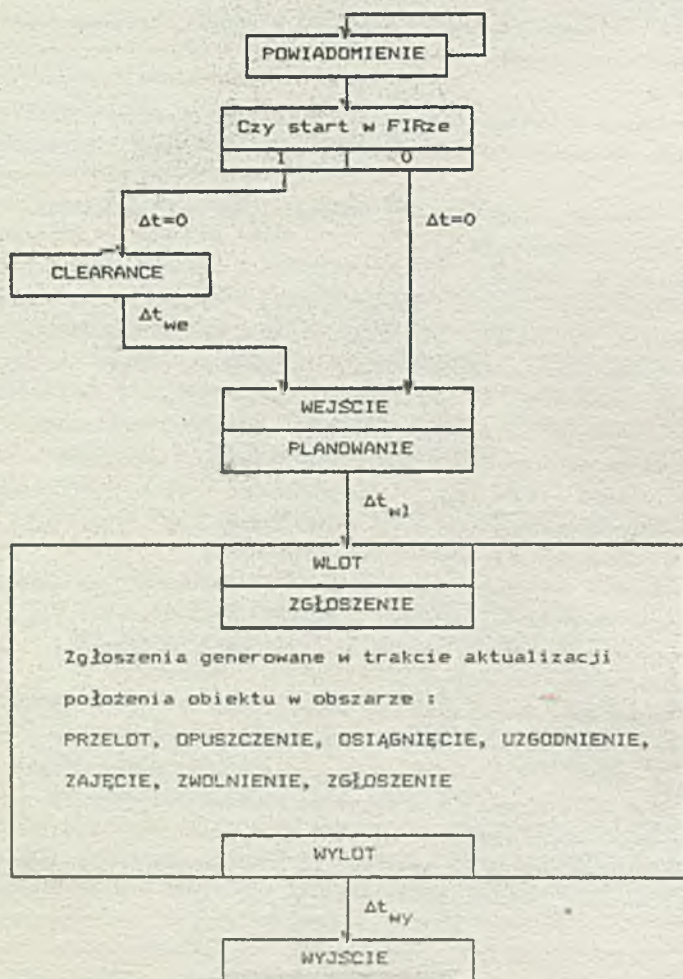
- generowane jest miejsce wlotu w modelowaną przestrzeń,
- dla wyznaczonego punktu wlotowego generowane są: czas wlotu  $t_{wl}$ , czas wejścia do sytuacji ruchowej  $t_{we}$  i czas powiadomienia o wlocie  $t_{pow}$ ,
- dla wyznaczonego punktu wlotowego generowany jest punkt wylotowy i określony jest numer trasy lotu  $TR_j$ ,
- dla wyznaczonej trasy generowany jest typ samolotu  $b$ ,
- dla wyznaczonej trasy lotu i typu samolotu generowane są poziomy: przelotowy  $H_{przel}$ , wlotowy  $H_{wl}$ , wylotowy  $H_{wy}$ , - dla wyznaczonej trasy lotu generowany jest czas wyjścia z sytuacji ruchowej  $\Delta t_{wy}$ ,
- dla wyznaczonego czasu wlotu generowany jest rodzaj lotu  $r$ .

Ponadto dla samolotów wlatujących na poziomie FL 0 generowane są elementy planu: poziom zwolnienia  $H_{zw}$  i czas zwolnienia  $t_{zw}$ .

#### 4. Symulacja systemu ATCS

Proces ruchu lotniczego w modelowanym obszarze symulowany jest przemieszczaniem się strumieni samolotów podlegających sterowaniu zgodnie z odpowiednimi zasadami ATC i w kolejności zapisanej w realizowanym planie lotów. Przelot samolotu przez obszar kontrolowany inicjuje ciąg zdarzeń,

które wywołują reakcję systemu ATCS. Zdarzeniu w modelu odpowiada zmiana stanu systemu ATCS spowodowana przemieszczaniem się obiektu w obszarze lub działaniem służb kontroli mającym na celu zapewnienie bezpieczeństwa lotów



Rys.3. Model symulacyjny systemu ATCS

Fig.3. ATCS system simulation model

Ze względu na charakter działania, zbiór zdarzeń  $R$  modelu można rozbić na rozłączne podzbiory  $R_i$  :



$$R = \bigcup_i R_i, \quad i=1,2,3$$

Podzbiór  $R_1$  (zdarzenia: WLOT, WYLOT, PRZELOT, OPUSZCZENIE, OSIĄGNIĘCIE, ZAJĘCIE, ZWOLNIENIE) zawiera zdarzenia związane bezpośrednio z procesem ruchu, z przemieszczaniem się samolotów w obszarze kontroli.

Podzbiór  $R_2$  (zdarzenia: POWIADOMIENIE, WEJSCIE, WYJSCIE, UZGODNIENIE) obejmuje zdarzenia związane z wykonywaniem podstawowej pracy przez kontrolera sektora ATC, tj. z przejęciem, (przekazaniem) samolotu na granicy z sąsiednimi sektorami lub z sąsiednim FIRem, z prowadzeniem samolotu wewnątrz sektora ATC.

Zdarzenia: PLANOWANIE, CLEARANCE, ZGŁOSZENIE, związane z kontrolą sytuacji ruchowej, przewidywaniem możliwości powstania sytuacji konfliktowej i podejmowaniem decyzji w celu ich rozwiązania, należą do zbioru  $R_3$ .

Istnieje możliwość modyfikacji zdarzeń należących do podzbiorów  $R_2$  i  $R_3$ , co odpowiada różnym metodom prowadzenia kontroli ruchu lotniczego. Ogólny schemat następstwa zdarzeń przedstawiony jest na rys.3.

Upływ czasu w modelu realizowany jest metodą kolejnych chwil czasu. Czas bieżący  $t_B$  zwiększany jest o stałą wartość  $\Delta t_B$ . Co krok czasu  $\Delta t_B$  dokonywana jest aktualizacja położenia samolotów w modelowanym obszarze i analizowana jest możliwość wystąpienia poszczególnych zdarzeń. Zdarzenia występujące w przedziale czasu  $\Delta t_B$  są zapisywane na Listę Zdarzeń. Ponadto zdarzenia generowane mogą być w trakcie lotu samolotu od chwili powiadomienia do chwili wlotu w obszar lub w wyniku podejmowania decyzji sterujących.

### 5. Zastosowanie opracowanego modelu systemu ATCS

Opracowany model zrealizowano w języku Profesjonal Fortran na komputerze zgodnym z IBM PC/AT. Model wszechstronnie zweryfikowano w wielu seriach eksperymentów. Poprawność działania przyjętych algorytmów sprawdzono rozpatrując przelot 245 samolotów w obszarze FIR Warszawa w ciągu doby. W celu zweryfikowania utworzonego modelu systemu ATCS wykorzystano metody weryfikacji hipotez i statystycznej oceny parametrów rozkładów.

Dokonano:

- analizy prawidłowości odtworzenia danych wejściowych,
- analizy wybranych przestrzenno-czasowych trajektorii lotów.

Model symulacyjny systemu ATCS zbudowano z myślą o opisie aktualnie istniejącego systemu. Parametry wejściowe modelu przyjęto na bazie obserwacji parametrów wejściowych do rzeczywistego systemu. Część tych parametrów ma charakter losowy. Dla określenia rozkładów charakteryzujących losowe dane wejściowe dokonano analizy rzeczywistego ruchu lotniczego w czerwcu 1986 i 1987r., uzyskując poszukiwane rozkłady parametrów ruchu [2].

Szczegółowe wyniki testowania modelu ATCS przedstawiono w pracach [2] i [3].

Symulacyjny model systemu ATCS wykorzystano praktycznie do wyznaczania zdolności przepustowej sektorów ATC, tzw. pojemności, w FIR Warszawa [3]. Przeprowadzono iteracyjną serię eksperymentów badających wpływ zmian intensywności ruchu na obciążenie pracą kontrolera sektora. Wyznaczono również pojemności projektowanych sektorów ATC w FIR Warszawa.

Opracowany model może być wykorzystany do:

- oceny wariantów zmian struktury przestrzeni powietrznej,
- oceny zmian struktury przepływu strumieni samolotów,
- koordynacji rozkładu lotów,
- testowania określonej metody sterowania ruchem w istniejącym sektorze (wykorzystując możliwość oceny obciążenia pracą),
- zarządzania przepływem strumieni samolotów (ATFM).

#### LITERATURA

- [1] "Instrukcja o ruchu lotniczym kontrolowanym" (IL 4444).  
Ministerstwo Komunikacji - CZLC, Warszawa 1983.
- [2] Malarski M. i zespół "Wybrane zagadnienia analizy i rozwoju systemów sterowania ruchem i procesami transportowymi w transporcie lotniczym".  
CPBP 02.19.02.05, Warszawa 1988.
- [3] Gładys S. "Symulacyjna metoda wyznaczania pojemności sektora kontroli ruchu lotniczego". Rozprawa doktorska, PW 1988.
- [4] Gładys S., Malarski M., Urbanik A. "Model analysis of air traffic control systems in FIR Warsaw performed in view of its modernisation".  
Transportation Forum, Toronto 1988.

Recenzent: Doc.dr h.inż. T.Czachórski

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30.

#### MODEL OF AIR TRAFFIC IN FIR WARSAW FOR PROCEDURAL AIR TRAFFIC CONTROL

##### Summary

Air traffic of the civil airlines is organized and controlled by the services of air Traffic Control (ATC) were modelled as a composed system ATCS. A model of this system has been realized and investigated on IBM Personal Computer. This model was used for estimating the capacity of air traffic sectors in FIR Warsaw.

МОДЕЛЬ АВИАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ В ФИР ВАРШАВА ДЛЯ ПРОЦЕДУРНОГО  
МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Авиадвижение гражданской коммуникационной авиации организовано и управляется службой контроля авиационного движения /АЦ/. Авиадвижение и его управление были промоделированы на компьютере ИБМ ПЦ и тщательно исследованы.