

Sylwester Gładys, Marek Malarski

Politechnika Warszawska

#### MODELOWE BADANIE ODCINKA I SKRZYŻOWANIA DRÓG LOTNICZYCH

**Streszczenie.** Ruch lotniczy odbywa się w ściśle zorganizowanych częściach przestrzeni powietrznych. Obejmują one między innymi sieć dróg lotniczych łączących strefy kontrolowane lotnisk. W artykule opisano modele symulacyjne podstawowych elementów sieci dróg lotniczych: odcinka i skrzyżowania. Przeprowadzono analizę wybranych parametrów modeli.

#### 1. Wstęp

Polskie prawo lotnicze określa lotnictwo jako "zespół zagadnień i środków związanych z wykonywaniem przez człowieka lotów w przestrzeni powietrznej za pomocą statków zdolnych do unoszenia się w przestrzeni powietrznej". Wśród różnych zagadnień związanych z pojęciem lotnictwa, jednym z najbardziej istotnych jest ruch lotniczy, rozumiany zwykle jako zmieniająca się dynamicznie względem siebie i względem przedmiotów terenowych, w czasie i w przestrzeni, konfiguracja statków powietrznych.

Ruch lotniczy odbywa się w przestrzeniach powietrznych i na polach manewrowych lotnisk. Przestrzeń powietrzna, przeznaczona do wykorzystywania przez lotnictwo, jest ograniczona do tych wysokości, na których możliwy jest lot samolotu ze względu na siłę nośną lub własności napędu. Aby ruch lotniczy mógł odbywać się w sposób bezpieczny oraz zgodnie z interesami i przepisami państw i towarzystw lotniczych, przestrzenie powietrzne zostały odpowiednio podzielone i zorganizowane.

Analizując ruch lotniczy, dla zadania budowy modelu całego obszaru powietrznego Polski, zaistniała potrzeba przebadania elementarnych zjawisk w nim występujących. Zbudowano więc i przebadano modele cząstkowe ruchu lotniczego:

- model odcinka drogi lotniczej pomiędzy dwoma radiolatarniami,
- model skrzyżowania dróg lotniczych wraz z przylegającymi odcinkami dróg.

Wstępnym etapem realizacji obu modeli było określenie liczby i następstwa zdarzeń tam występujących. W zdarzeniach tych odzwierciedlono każdą czynność wykonywaną przez samolot oraz służbę kontroli obszaru, niezbędną dla prawidłowej realizacji ruchu w modelowanej przestrzeni. Upływ czasu dla modeli zrealizowano metodą kolejnych zdarzeń.

## 2. 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 i skierowano na odrębne szlaki - w przestrzeń powietrzną kontrolowaną (CTA). Przestrzenie CTA dzielą się organizacyjnie i terytorialnie na:

- sieć dróg lotniczych AWY,
- obszary (rejony) 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, strefami kontrolowanymi lotnisk CTR. Ruch na drodze lotniczej może odbywać się wyłącznie na wyznaczonych poziomach lotu odpowiadających powierzchniom o stałym, ściśle określonym ciśnieniu standardowym (STD). Ciśnienie to zapewnia separację wysokościową pomiędzy statkami powietrznymi przelatującymi AWY na różnych poziomach. Na drogach lotniczych wykonywane mogą być jedynie niektóre manewry nawigacyjne, np. zmiana wysokości na kolejny dopuszczalny poziom, zmiana szybkości lotu lub zmiana kursu związana z załamaniem drogi.

Sterowanie ruchem lotniczym w przestrzeni CTA prowadzą wydzielone służby kontroli ruchu lotniczego (ATC) nazywane służbą kontroli obszaru - ACC. Do ich zadań należy między innymi:

- zbieranie informacji o aktualnej sytuacji powietrznej i o przewidywanym ruchu lotniczym,
- zbieranie informacji o zjawiskach meteorologicznych, sprawności urządzeń nawigacyjnych, stanie lotnisk i ich urządzeń,
- przetwarzanie tych informacji na decyzje dotyczące sterowania ruchem poszczególnych statków powietrznych i koordynujące cały ruch w obszarze kontrolowanym,
- przekazywanie wypracowanych decyzji na pokłady statków powietrznych.

Stosowane są dwie podstawowe metody prowadzenia sterowania ruchem lotniczym :

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

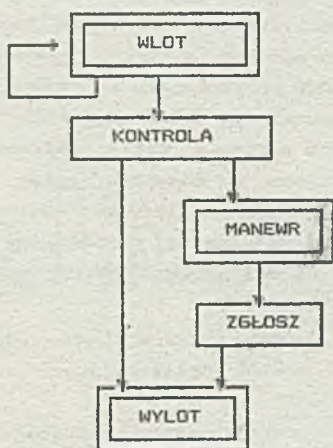
W metodzie proceduralnej służba ATC wykorzystuje informacje - meldunki otrzymywane ze statków powietrznych przelatujących nad punktami, w których zainstalowano naziemne pomoce radionawigacyjne. W radarowej kontroli ruchu lotniczego dane o pozycji samolotów są stale dostępne i pochodzą z radaru naziemnego. Metoda radarowa uniezależnia służbę ATC od meldunków pozycyjnych napływających ze statków powietrznych.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa lotów służby ATC utrzymują pomiędzy statkami powietrznymi lecącymi w przestrzeni kontrolowanej odpowiednią odległość, zwaną separacją. Separacje ustalone na podstawie doświadczenia są prawnie zalegalizowane jako odpowiadające normom bezpieczeństwa.

### 3. Model symulacyjny odcinka drogi lotniczej

#### 3.1 Następowstwo zdarzeń

Pierwszym etapem realizacji modelu ruchu w obrębie odcinka drogi lotniczej było wyznaczenie liczby i następowstwa zdarzeń tam występujących. W zdarzeniach tych odzwierciedlono każdą czynność wykonywaną przez statek powietrzny oraz służbę kontroli obszaru - ACC, niezbędną do prawidłowej realizacji ruchu w obrębie odcinka. Jako odcinek drogi lotniczej przyjęto kontrolowaną przestrzeń drogi lotniczej między dwiema sąsiednimi radiolatarniami.



Rys.1 Schemat blokowy modelu odcinka drogi lotniczej.

Fig.1 Flow-diagram of airway segment model

Pierwszym zdarzeniem modelu jest WLOT statku powietrznego. W zdarzeniu tym następuje przekazanie do organów kontroli ruchu lotniczego meldunku zawierającego znak rozpoznawczy, pozycję, prędkość i poziom lotu. Po otrzymaniu meldunku organ ACC sprawdza możliwość kontynuowania lotu na dotychczasowych warunkach. Odbywa się to w ramach zdarzenia KONTROLA. Jeżeli lot jest możliwy, ACC wydaje zgodę na kontynuowanie lotu, nakazując

zgłoszenie osiągnięcia kolejnego punktu meldunkowego, czyli radiolatarni wylotowej odcinka. Jeśli ze względów bezpieczeństwa lub organizacji ruchu kontynuowanie lotu na niezmiennych warunkach jest niemożliwe, ACC nakazuje wykonanie manewru przez statek powietrzny. Następuje zdarzenie MANEWR. Jednocześnie ACC nakazuje potwierdzenie wykonania manewru. Czynność tę w modelu przedstawia zdarzenie ZGŁDSZ. Po zgłoszeniu zmiany poziomu statek powietrzny kontynuuje lot. Zdarzenie WYLOT następuje po osiągnięciu radiolatarni wylotowej.

Zdarzenia realizowane w modelu symulacyjnym odcinka drogi lotniczej dzielą się na dwie grupy:

blok ruchu - są to zdarzenia związane z przemieszczaniem się statku powietrznego (WLOT, MANEWR, WYLOT)

blok kontroli - są to zdarzenia związane ze sterowaniem ruchem lotniczym w przestrzeni drogi lotniczej (KONTROLA, ZGŁDSZ).

### 3.2 Szczegółowa realizacja modelu

Zrealizowane zostały dwie wersje szczegółowe modelu systemu. Wersja pierwsza - podstawowa jest odzwierciedleniem sterowania ruchem, w którym zapewniony jest ciągły dostęp informacji o sytuacji ruchowej w systemie taki, jaki może uzyskać kontrola ACC korzystająca z radaru. Wersja druga realizuje działanie systemu proceduralnego opartego wyłącznie na łączności radiowej ze statkiem powietrznym. W systemie takim informacje o pozycji statku powietrznego napływają tylko w momencie jego przelotu nad radiolatarnią. Tak więc wersje te różnią się jedynie realizacją zdarzenia KONTROLA. Zdarzenie to jest zarazem najbardziej rozbudowane ze wszystkich zdarzeń modelu. Szczegółowy algorytm zdarzenia KONTROLA opracowany został na bazie "Zasad ruchu lotniczego PL-2".

### 3.3 Wyniki eksperymentów numerycznych

Budowa dwóch wersji modelu symulującego odcinek drogi lotniczej umożliwiła porównanie działania systemu proceduralnego i radarowego. W celu porównania obu wersji modelu wyznaczone zostały przykładowe zależności charakteryzujące ruch lotniczy:

- maksymalna przepustowość,
  - średni czas przelotu STP,
  - współczynnik manewru  $IWM = ISM/LS$ ,
- gdzie: ISM - liczba samolotów, które musiały wykonać manewr,  
 LS - liczba wszystkich samolotów,
- wektor zajętości poziomów.

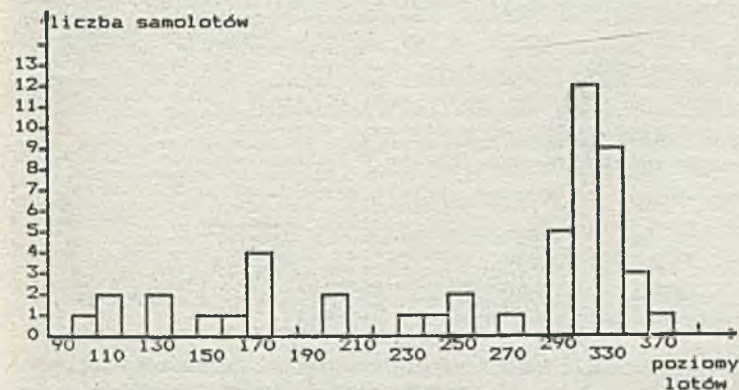
Zrealizowane przebiegi symulacyjne obejmowały jeden dzień pracy systemów o aktualnym natężeniu ruchu oraz jedną godzinę szczytową o znacznie zwiększonym natężeniu. Analiza ruchu lotniczego w okresie największych przewozów wykazała, że średnio dziennie drogą lotniczą przelatuje 45 samolotów. Dla takich też warunków przeprowadzona została symulacja działania kontroli proceduralnej i radarowej.

Otrzymane wyniki są identyczne dla obu wersji:

- średni czas przelotu - 18.8 min.
- współczynnik manewru 6%

Zajętość poziomów przedstawia rys.2:

Natężenie 45 samolotów w ciągu doby jest stosunkowo małe. Ruch odbywa się w sposób płynny przy małej liczbie koniecznych manewrów. Kontroler w systemie proceduralnym dysponuje czasem, w którym może precyzyjnie ustalić położenie samolotów. Dzięki temu podejmowane decyzje są optymalne, takie jak w kontroli radarowej. Przy takim natężeniu ruchu system proceduralny całkowicie spełnia swoje zadanie.



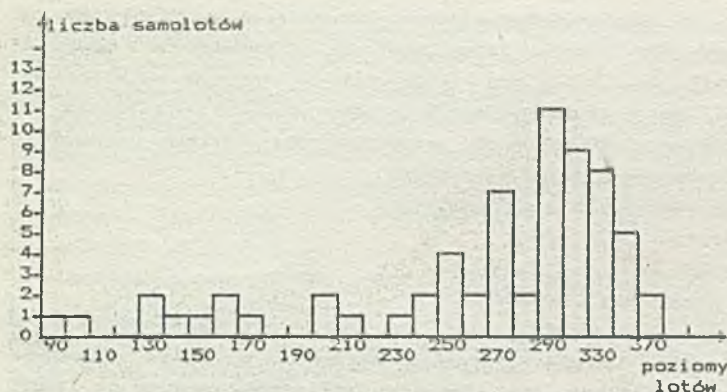
Rys.2. Zajętość poziomów w ciągu doby

Fig.2. Number of occupied flight levels in a day

W celu zbadania działania systemów przy dużym natężeniu ruchu symulacja ograniczona została do jednej godziny szczytowej. Sztucznie zwiększono liczbę samolotów do 45 w ciągu godziny (około 1100 samolotów na dobę).

Wyniki działania systemu radarowego:

- średni czas przelotu - 12.3 min.
- współczynnik manewru - 44 %



Rys.3. Zajętość poziomów w czasie godziny szczytowej

Fig.3. Number of occupied flight levels in rush-hour.

Zajętość poziomów przedstawia rys.3. System działał sprawnie przy tak dużym natężeniu ruchu lotniczego. Wystąpiła jednak sytuacja, w której konieczne było równoczesne wykonanie manewru przez cztery samoloty. Niewielkie zwiększenie liczby samolotów mogło więc zatrzymać działanie programu. Natężenie 45 samolotów na godzinę może być przyjęte jako maksymalna przepustowość odcinka drogi lotniczej w systemie kontroli radarowej.

Działanie systemu proceduralnego zostało przerwane wskutek niemożności wykonania kolejnego wlotu w przestrzeń odcinka drogi lotniczej. Natężenie ruchu okazało się zbyt duże dla tego systemu sterowania. Porównanie działania systemów dla jednakowego obciążenia okazało się możliwe po obniżeniu natężenia ruchu do 35 samolotów na godzinę. Dla tego natężenia oba systemy pracowały zadowalająco. Uzyskano wyniki:

	System proceduralny	System radarowy
Średni czas przelotu	10.9 min	10.7 min
Współczynnik manewru	28 %	2 %
Maksymalna przepustowość	35 sam/h	45 sam/h

Organizacja ruchu wyglądała odmiennie w obu systemach. Kontrola proceduralna prowadzona była bardzo asekuracyjnie. Przestrzeń powietrzna nie była właściwie wykorzystana, co prowadziło do niepotrzebnego zajmowania wielu poziomów lotu i wykonywania dużej liczby zbędnych manewrów. Mimo to przepustowość systemu była bardzo duża.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych eksperymentów, należy stwierdzić, że system sterowania ruchem lotniczym w obrębie odcinka drogi lotniczej tak proceduralny, jak i radarowy umożliwia obsługę bardzo dużej liczby samolotów, znacznie większej niż przepustowość całego systemu ATC. Drogi

lotnicze nie są więc wąskim gardłem systemu sterowania ruchem lotniczym.

#### 4. Model symulacyjny skrzyżowania dróg lotniczych

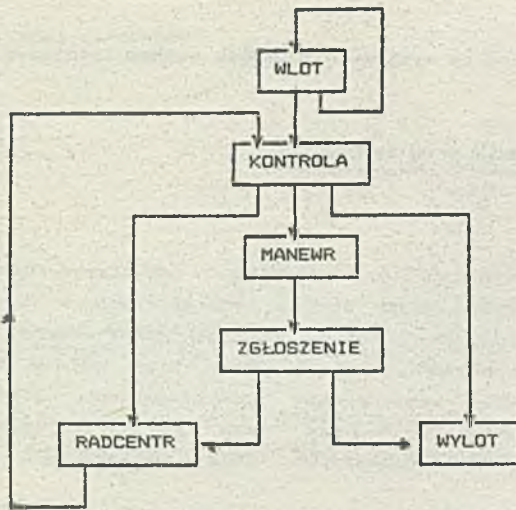
##### 4.1 Następowstwo zdarzeń

Pierwszym etapem realizacji modelu było określenie wszystkich zdarzeń, koniecznych do odzwierciedlenia ruchu statków powietrznych w obrębie skrzyżowania dróg lotniczych oraz czynności wykonywanych przez służbę ACC. Po wyodrębnieniu zdarzeń określono ich następowstwo oraz zmiany stanu systemu, realizowane w czasie występowania poszczególnych zdarzeń. Modelowane skrzyżowanie zawiera co najmniej trzy odcinki o wspólnej radiolatarni, nad którą kontrolowana przestrzeń tworzy skrzyżowanie dróg lotniczych.

Pierwszym zdarzeniem programu symulacyjnego jest zdarzenie WLOT odzwierciedlające pojawienie się statku powietrznego nad radiolatarnią zewnętrzną. W zdarzeniu tym następuje przekazanie do organu ACC meldunku pozycyjnego zawierającego znak rozpoznawczy, pozycję, prędkość, poziom lotu i następną pozycję. Następnie realizowane jest zdarzenie KONTROLA. Organ ACC analizując sytuację powietrzną, sprawdza możliwość kontynuowania lotu na dotychczasowych warunkach. Jeżeli lot jest możliwy, ACC wyraża zgodę na kontynuowanie lotu na dotychczasowych warunkach, nakazując zgłoszenie osiągnięcia następnego punktu meldunkowego. Punktem tym jest radiolatarnia centralna skrzyżowania, po osiągnięciu której statek powietrzny przekazuje do ACC meldunek pozycyjny - zdarzenie RADCENTR. Po otrzymaniu meldunku ACC dokonuje analizy nowej sytuacji w powietrzu i podejmuje odpowiednie decyzje. Czynności te wykonywane są w ramach zdarzenia KONTROLA. Jeżeli ze względów bezpieczeństwa lub organizacji ruchu, kontynuowanie lotu przy niezmiennych warunkach jest niemożliwe, ACC nakazuje statkowi powietrznemu wykonanie manewru zmiany poziomu lub rzadziej zmiany prędkości lotu. W zdarzeniu MANEWR statek powietrzny rozpoczyna wykonywanie odpowiedniego manewru nakazanego uprzednio przez ACC, po zakończeniu którego przekazuje meldunek o jego wykonaniu, co jest realizowane w zdarzeniu ZGŁOSZENIE. Zdarzenie WYLOT następuje po osiągnięciu radiolatarni zewnętrznej.

Upływ czasu w modelu realizowany jest metodą kolejnych zdarzeń.

Schemat blokowy następowstwa zdarzeń przedstawia rys.4.



Rys.4. Schemat blokowy modelu skrzyżowania dróg lotniczych.

Fig.4. Flow-diagram of cross-airway model.

Zdarzenia realizowane w modelu można podzielić na dwie grupy dotyczące:

1. ruchu - zdarzenia związane z przemieszczaniem się statków powietrznych (WLOT, MANEWR, RADCENTR, WYLOT),
2. sterowania ruchem - zdarzenia związane z kontrolą i sterowaniem ruchem lotniczym (KONTROLA, ZGŁOSZENIE).

Najbardziej rozbudowanym jest zdarzenie KONTROLA, w którym sprawdzane i rozwiązywane są wszystkie możliwe sytuacje konfliktowe.

#### 4.2 Wyniki eskperymentów numerycznych

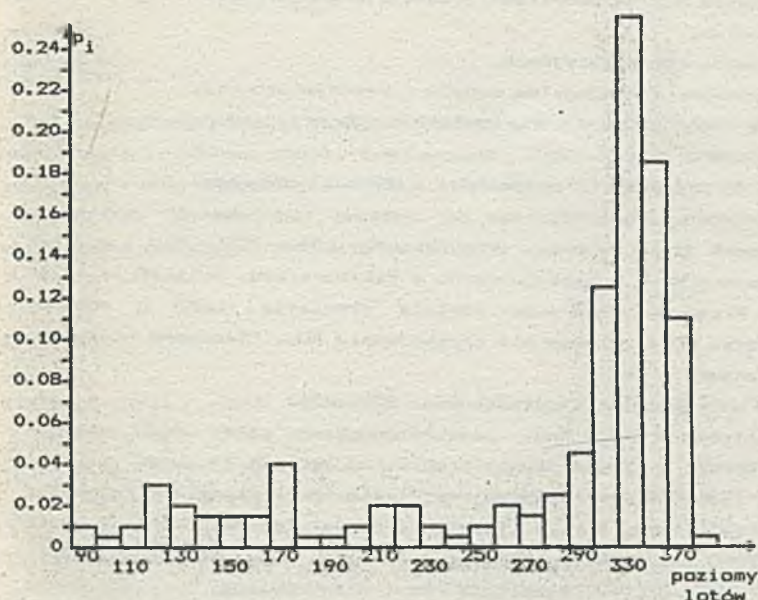
Przeprowadzono analizę statystyczną poziomów, prędkości i tras lotu w obrębie skrzyżowania. Przegląd planu lotów wykazał, że w FIR Warszawa przewiduje się zajmowanie 26 poziomów lotu (od 90 do 390). Rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych poziomów lotu przedstawia rys.5.

Rozkład prawdopodobieństwa występowania poszczególnych prędkości wyraźnie zależy od poziomu lotu (samoloty szybsze - ruch międzynarodowy i tranzytowy - zajmują poziomy wyższe). Charakterystyki takie sporządzono dla wszystkich poziomów lotu. Ocenę modelu symulacyjnego skrzyżowania dróg lotniczych przeprowadzono poprzez:

- sprawdzenie zgodności prowadzenia ruchu lotniczego w modelu z obowiązującymi przepisami,



- porównanie rzeczywistego ruchu z wynikami eksperymentów symulacyjnych przy jednakowym natężeniu ruchu.



Rys.5. Rozkład prawdopodobieństwa zajętości poziomów lotu w FIR Warszawa.  
Fig.5. Probability distribution of occupied flight levels in FIR Warsaw.

W chwili obecnej w Polsce sterowanie ruchem lotniczym prowadzi się w sposób proceduralny na drogach R23 i B41 oraz metodą radarową na pozostałych drogach lotniczych. W zrealizowanym modelu sterowanie ruchem prowadzi się w sposób aktywny, a tablicę sytuacji ruchowej, z której czerpane są informacje o pozycjach statków powietrznych, traktować można jako wizualizację ruchu lotniczego na ekranie radaru. Aktywny sposób prowadzenia kontroli w modelu symulacyjnym polega na: przeliczaniu pozycji samolotów, obliczaniu miejsca wyminięcia się statków powietrznych, sprawdzeniu możliwości wykonania manewrów, co pewien określony czas (krok), wyznaczaniu zapasów separacji itd. Ze względu na awaryjność radaru i związaną z tym konieczność natychmiastowego przejścia na sterowanie proceduralne kontrolę w modelu symulacyjnym prowadzi się przy proceduralnych minimach separacyjnych.

Konserwacja radaru w Poznaniu pozwoliła na weryfikację modelu symulacyjnego poprzez porównanie rzeczywistego ruchu z ruchem symulowanym, gdyż kontrola ruchu metodą proceduralną w zachodnim sektorze ATC była

prowadzona z Centrum Kontroli Ruchu Lotniczego w Warszawie. Porównanie przeprowadzono dla skrzyżowania LDZ i dotyczyło ono:

- czasów osiągnięcia poszczególnych radiolatarni,
- sposobów reagowania ACC na określone sytuacje w powietrzu,
- wydawanych zezwoleń,
- przyjmowanych meldunków pozycyjnych.

Uzyskano pełną zgodność funkcjonalną modelu z rzeczywistością.

Jako parametry oceny jakości ruchu lotniczego przyjęto:

- współczynnik manewru IWM,
  - niedopasowanie do trajektorii optymalnej - NDTO (uśrednione),
- Analiza rzeczywistego ruchu lotniczego w okresie największych przewozów wykazała, że średnio dziennie przez skrzyżowania LDZ, JED, GRU, a więc skrzyżowania o największym natężeniu ruchu w FIR Warszawa, przelatuje od 60 do 80 samolotów. Przeprowadzona więc została symulacja ruchu o dobowym natężeniu wynoszącym 70 samolotów dla skrzyżowania GRU. Otrzymano wyniki:
- współczynnik manewru - 5%,
  - niedopasowanie do trajektorii optymalnej - 200 stóp.

Natężenie 70 samolotów w ciągu doby jest stosunkowo małe. Ruch statków powietrznych przebiega w sposób płynny przy małej liczbie manewrów.

Badania dla ruchu o zwiększonym natężeniu przeprowadzono stosując metodę podziału czasu, przy stałej liczbie statków powietrznych. Badanie ruchu przeprowadzono dla skrzyżowań LDZ, JED, GRU. Dla skrzyżowań tych symulację ograniczono do 40 samolotów pojawiających się w modelowanej przestrzeni w ciągu 5, 4, 3, 2.5, 2, 1.5, 1 godziny przy ustalonych parametrach wejściowych. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić praktycznie prawie liniową zależność zmian współczynnika manewru i niedopasowania do trajektorii optymalnej w funkcji natężenia ruchu (przykładowe wyniki dla skrzyżowania trzyodcinkowego LDZ podano w tabeli).

natężenie ruchu (liczba sam/h)	8	10	13	16	20	27	40
współczynnik manewru (%)	5	7	20	25	30	45	50
niedopasowanie do traj. optymalnej (setki stóp)	2	3	9	10	11	16	18

Z modelowego porównania ruchu na skrzyżowaniach o różnej liczbie odcinków wynika, że większa liczba odcinków skrzyżowania pozwala na pełniejszą realizację prawidłowego sterowania. Mniejsze natężenie ruchu lotniczego na każdym z odcinków powoduje pełniejsze wykorzystanie przestrzeni powietrznej. Kontroler dysponuje wtedy dużymi zapasami separacji.

Proponowany model symulacyjny dróg lotniczych umożliwia poznanie

mechanizmu zjawisk zachodzących w podsystemie ACC systemu sterowania ATC. Umożliwia on przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących jakości ruchu lotniczego oraz analizy pracy organów kontroli obszaru.

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań - eksperymentów numerycznych wynika, że zrealizowane cząstkowe modele symulacyjne umożliwiają ocenę jakości ruchu lotniczego tylko w wąskim zakresie. Modele umożliwiają ocenę optymalnego wykorzystania przestrzeni powietrznej na podstawie stopnia zapełnienia systemu oraz zajętości poszczególnych poziomów.

## 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 1989.
- [3] Malarski M. i zespół "Wybrane zagadnienia analizy, projektowania i modernizacji systemów sterowania ruchem lotniczym". RI.20.02.05., 1985.
- [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 inż. T.Czachórski

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30

## MODEL TESTS OF AIRWAY SEGMENT AND AIRWAYS CROSSING

### S u m m a r y

Air Traffic of Civil Aviation is organized in Control Areas. They consist of airways connecting Terminal Areas and Control Zones. In the paper simulation models of basic elements of airways network i.e. airway segment and airways crossing are presented. Investigations concerning these models are also considered.

## МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРЕЗКА И ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

## Р е з ю м е

Авиационное движение происходит в чётко организованных частях воздушного пространства, охватывающих также сеть воздушных линий, соединяющих контрольные зоны аэропортов. В статье рассмотрены симуляционные модели основных элементов сети воздушных линий: отрезка и пересечения. Проведён анализ определённых параметров модели.