

Piotr Andrzej Dmochowski

Polska Agencja Żeglugi Powietrznej

Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

MODEL SEKTORA KONTROLI OBSZARU DO BADANIA PŁYNNOŚCI RUCHU LOTNICZEGO

Rękopis dostarczono, kwiecień 2012

Streszczenie: Stały wzrost wielkości ruchu lotniczego zmusza do poszukiwania metod zwiększających efektywność zarządzania ruchem i przestrzenią powietrzną. Działania takie są podejmowane od lat przez służby zarządzania ruchem lotniczym i ośrodki badawcze. Stosunkowo nową koncepcją lepszego wykorzystania dostępnej przestrzeni powietrznej jest idea poprawy płynności ruchu lotniczego. Wydaje się, że zwiększenie płynności ruchu lotniczego powinno poprawić możliwości przepustowe sektorów, gdyż kontroler ruchu lotniczego jest w stanie obsłużyć większą liczbę samolotów gdy przechodzą one przez sektor równomiernie i bez zakłóceń. Dzieje się tak przede wszystkim dlatego, że ruch taki nie wymaga wielu koordynacji ze strony kontrolera. Zachodzi jednak pytanie o ilościową zależność między płynnością ruchu a przepustowością przestrzeni powietrznej. Odpowiedź na nie wymaga badań modelowych, gdyż ze względów bezpieczeństwa nie sposób prowadzić badań na rzeczywistym systemie.

W artykule przedstawiono model sektora kontroli ruchu lotniczego obszaru oparty na niestosowanym dotąd w literaturze sposobie opisu struktury sektora w postaci siatki nieaktywnych i aktywnych punktów. Struktura sektora jest odwzorowana tak, by uwzględnić zapotrzebowania użytkowników wobec przestrzeni wynikające z koncepcji FUA. Model uwzględnia również losowe zmiany dostępności przestrzeni (np. zmiany pogody). Może zostać wykorzystany do zbudowania narzędzia badawczego w postaci programu komputerowego, który pozwoli na badanie ilościowej zależności między płynnością ruchu a przepustowością sektora.

Słowa kluczowe: płynność ruchu lotniczego, przepustowość sektora kontroli, zarządzanie ruchem lotniczym

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach daje się zauważyć ogólna tendencja stałego wzrostu wielkości ruchu lotniczego. Wymusza ona poszukiwanie metod zwiększających efektywność zarządzania przestrzenią powietrzną i ruchem lotniczym. Interesująca z tego punktu widzenia wydaje

się kwestia poszukiwania ilościowej zależności między płynnością ruchu a przepustowością przestrzeni powietrznej. Zakładamy, że zwiększenie płynności ruchu lotniczego powinno poprawić możliwości przepustowości przestrzeni powietrznej. Za ruch płynny uznajemy ruch zgodny z wcześniejszym planem, nie podlegający dodatkowym, poza standardowymi, ingerencjom kontrolera w planowaną trasę lotu samolotu [2, 3]. Zaś przepustowość sektora określona jest jako maksymalna liczba samolotów w sektorze, którą w jednostce czasu kontroler może obsłużyć [4].

Uporządkowanie ruchu powinno poprawić efektywność wykorzystania przestrzeni, ponieważ kontroler ruchu lotniczego będzie w stanie obsłużyć większą liczbę samolotów gdy przechodzą one przez sektor równomiernie i bez zakłóceń. Ruch taki nie wymaga bowiem wielu koordynacji ze strony kontrolera. Poza tym jest tańszy i ma wysoką jakość z punktu widzenia przewoźnika, ponieważ trajektoria lotu jest bliższa optymalnym parametrom lotu samolotów. Ma również wysoką jakość z punktu widzenia pasażerów, ponieważ gwarantuje dotarcie samolotu do miejsca przeznaczenia w zaplanowanym czasie (punktualność) i przy jak najmniejszej liczbie manewrów (komfort).

Weryfikacja przedstawionego założenia wymaga badań modelowych. Ze względów bezpieczeństwa nie można bowiem prowadzić badań na rzeczywistym systemie. Pierwszym krokiem takich badań jest budowa modelu analizowanej przestrzeni, to jest modelu sektora kontroli ruchu lotniczego obszaru. Kolejnym będzie model ruchu lotniczego przepływającego przez badaną przestrzeń. Narzędzie łączące oba te modele pozwoli na analizę zależności ilościowej między płynnością a przepustowością.

W artykule przedstawiono model sektora obszaru oparty na niestosowanym dotąd w literaturze sposobie opisu jego struktury w postaci siatki punktów. Punkty te w zależności od potrzeb dzielą się na aktywne i nieaktywne. Zastosowana metoda daje możliwość elastycznego odwzorowania struktury sektora tak, by uwzględnić zmieniające się zapotrzebowania użytkowników wobec przestrzeni, także te wynikające z koncepcji FUA [1], czy losowe zmiany dostępności przestrzeni (wynikające np. ze zmian pogody).

Artykuł opisuje fragment pracy mającej na celu określenie ilościowej zależności między płynnością ruchu lotniczego a przepustowością sektora. Istotność tej zależności tkwi w tym, że brak jest syntetycznych wskaźników (kryteriów) oceny ruchu lotniczego, które można zastosować przy poszukiwaniu jak najlepszych algorytmów sterowania ruchem lotniczym. Wskaźnikiem takim może stać się właśnie płynność ruchu. W przypadku identyfikacji charakteru relacji między płynnością ruchu a przepustowością przestrzeni, możliwe będzie opracowanie praktycznych, łatwych do realizacji, algorytmów sterowania ruchem, maksymalizujących przepustowość dzięki maksymalizacji płynności. Jest to istotne również z tego powodu, że płynność może być uważana za syntetyczny wskaźnik opisujący bezpieczeństwo ruchu lotniczego w dłuższym horyzoncie czasowym [6].

W dalszej perspektywie opisywany tu model zostanie wykorzystany do zbudowania aplikacji komputerowej, wspomagającej proces sterowania ruchem, z wykorzystaniem wyników analizy zależności między płynnością ruchu a przepustowością sektora.

2. OBIEKT MODELOWANIA

Sektor kontroli ruchu lotniczego obszaru to przestrzeń powietrzna w kształcie wielościanu o wytyczonych granicach pionowych i poziomych umożliwiająca bezpieczny i ekonomiczny przelot samolotów. Strukturę sektora definiują stałe i elastyczne elementy przestrzeni powietrznej.

Zasadniczo w sektorze obszaru ruch odbywa się w ramach wytyczonych dróg lotniczych. W drogach lotniczych definiuje się bramy wejściowe i wyjściowe sektora, punkty meldowania i punkty z pomocami radionawigacyjnymi, czyli punkty charakterystyczne umożliwiające bliższe określenie trasy samolotu. Nad jednym punktem ziemi znajdować się może równocześnie kilka samolotów na różnych poziomach lotu. Zmiany trasy, poziomu czy kierunku lotu mogą być dokonywane w trakcie jego trwania i mogą powodować, że rzeczywista trajektoria lotu jest inna niż założono w planie lotu. Po skoordynowaniu, lot może się odbywać niezależnie od dróg [7]. Nie następuje to jednak bezwarunkowo. Zgoda na takie odstępstwo zależy m.in. od zachowania separacji, operacyjnej dostępności przestrzeni i zdolności obsługi ruchu przez odpowiednie służby. Zatem przy korzystnych warunkach atmosferycznych, ruchowych i dostępnej przestrzeni, ruch lotniczy może być dość swobodnie dostosowany do potrzeb przewozowych. Jednak wraz z pogorszeniem tych warunków zmniejsza się również swoboda w kształtowaniu potoku ruchu lotniczego.

W sektorze obszaru zapewniana jest służba kontroli obszaru ACC (*Area Control Centre*). Kontroler w czasie rzeczywistym zapewnia zachowanie separacji (zapobiega kolizjom), a także utrzymuje uporządkowany przepływ ruchu lotniczego (poprawia ekonomikę) w przestrzeni, za którą jest odpowiedzialny. Działania kontrolera można opisać jako ciągły proces (ciąg powtarzalnych i sformalizowanych procedur, czynności, obsług) polegający na identyfikowaniu i rozwiązaniu sytuacji potencjalnie niebezpiecznych i zmierzający do poprawy ekonomiki ruchu lotniczego w podległej przestrzeni powietrznej (sektorze).

3. ZAŁOŻENIA MODELOWANIA

Przedmiotem modelowania jest sektor kontroli ruchu lotniczego obszaru. Podstawowym założeniem przyjętym przy określaniu postaci modelu jest dążenie do uzyskania opisu, umożliwiającego łatwe odwzorowanie dowolnego sektora kontroli ruchu lotniczego obszaru - tak pod względem rozmiarów jak i struktury wewnętrznej, ale także zachodzących w nim procesów. Celem tworzenia modelu jest przyszła analiza ilościowa zależności płynność-przepustowość.

Sektor obszaru to wydzielona część przestrzeni kontrolowanej, w której na kontrolera nałożono odpowiedzialność za bezpieczeństwo realizowanego tam ruchu. Kontroler stosując odpowiednie przepisy ruchu lotniczego dostosowuje przepływ (parametry) ruchu w sektorze do dostępnej przestrzeni. Dostępność przestrzeni determinują zdefiniowane elementy stałe i zmienne, opisane w koncepcji FUA, ale również zjawiska i zdarzenia

o charakterze losowym, powodujące wyłączenie pewnych fragmentów przestrzeni sektora z użytkowania przez lotnictwo komunikacyjne (np. silne turbulencje czy chmury CB). Kontroler ma niewielki wpływ na zwiększenie dostępności przestrzeni. Stanowi ona raczej ograniczenie dla generowanych przez niego decyzji sterujących.

Sektor obszaru jest złożonym systemem o wielu wzajemnie na siebie oddziałujących elementach, charakteryzujących się zmiennością parametrów. Zgodnie z koncepcją FUA, składa się on z przestrzeni o różnie zdefiniowanym przeznaczeniu, które mogą być zajmowane, na określonych warunkach, przez użytkowników przestrzeni innych niż przewoźnicy realizujący komunikacyjny ruch lotniczy [5]. Liczba, rodzaj, aktywność elementów przestrzeni sprawia, że mamy tu do czynienia ze skomplikowanym systemem dynamicznym. W prezentowanym modelu zastosowano pewne uproszczenia w opisie sektora. Uwzględnia się bowiem tylko elementy niezbędne, ze względu na założony cel modelowania (badanie zależności płynność-przepustowość). Oprócz elementów zdefiniowanych w koncepcji FUA model uwzględnia również zdarzenia losowe mogące zaistnieć w sektorze, a powodujące ograniczenie dostępności przestrzeni dla ruchu komunikacyjnego. Nie różni się ich szczegółowo, ale grupuje w zbiory, zawierające punkty o podobnym charakterze. Najistotniejszym kryterium tego grupowania jest dostępność lub niedostępność obszaru dla ruchu komunikacyjnego w sektorze.

3.1. KONCEPCJA FUA

Sektor kontroli ruchu lotniczego obszaru składa się ze stałych i elastycznych elementów przestrzeni powietrznej zdefiniowanych w koncepcji elastycznego użytkowania przestrzeni powietrznej FUA (*Flexible Use of Airspace*). Zasady użytkowania poszczególnych elementów przestrzeni różnią się. Zasadnicza różnica polega na stałym charakterze jednych (co umożliwia planowanie operacji lotniczych) oraz zmiennym charakterze drugich (co umożliwia ich zamienne, racjonalne wykorzystanie przez lotnictwo cywilne lub wojskowe) przy zastosowaniu koordynacji w czasie rzeczywistym.

Tabela 1

Stale i elastyczne elementy przestrzeni powietrznej

Elementy przestrzeni powietrznej	
Stale	Elastyczne
CTR – strefy kontrolowane TMA – rejony kontrolowane AWY – sieć dróg lotniczych CDR 1 – drogi warunkowe kategorii 1 P – strefy zakazane R – strefy ograniczone ATZ – strefy ruchu lotniskowego ADIZ – strefa identyfikacji obrony powietrznej RMZ – strefa obowiązkowej łączności	CDR 2 – drogi warunkowe kategorii 2 CDR 3 – drogi warunkowe kategorii 3 TSA – strefy czasowo wydzielone TRA – strefy czasowo rezerwowane TFR – korytarze dolotowe do TSA EA – strefa ćwiczeń MRT – trasy lotnictwa wojskowego ATZ – strefy ruchu lotniskowego MATZ – wojskowe strefy ruchu lotniskowego D – strefy niebezpieczne RCA – przestrzeń powietrzna o zredukowanej koordynacji

Stałym elementem przestrzeni jest np. strefa kontrolowana lotniska CTR (*Control Zone*), czyli część przestrzeni kontrolowanej, w której wykonuje się manewry związane bezpośrednio ze startami i lądowaniami samolotów. Elementem elastycznym jest np. strefa czasowo wydzielona TSA (*Temporary Segregated Area*). Zamówienie (aktywowanie) większości z elastycznych elementów automatycznie wyłącza te przestrzenie (na zamówiony czas) z możliwości korzystania z nich przez lotnictwo komunikacyjne.

Koncepcja ta oparta jest na założeniu że przestrzeń należy użytkować zgodnie z rzeczywistymi potrzebami. Jej podstawowym celem jest uporządkowanie współpracy między cywilnymi i wojskowymi użytkownikami przestrzeni. Zatem definiowanie elastycznych elementów w przestrzeni powietrznej ma racjonalne uzasadnienie. Na przykład w pobliżu lotnisk wojskowych powinny znajdować się obszary umożliwiające swobodne wykonanie założonych zadań przez samoloty wojskowe. Jednak z punktu widzenia służb zarządzających ruchem lotniczym, tak zdefiniowana przestrzeń powoduje ograniczenie możliwości przepustowych sektora przez zajęcie (wyłączenie) jej fragmentów. Gdy elementy elastyczne nie są aktywne przepustowość sektora utrzymuje się na maksymalnym poziomie, jednak gdy zostaną zamówione (aktywowane) przepustowość sektora może ulec zmniejszeniu.

3.2. SEPARACJE

W celu zapewnienia bezpieczeństwa lotów samolotów wprowadzono wymóg zachowywania określonych minimalnych odległości między nimi – separacji. Separacje radarowe są zapewniane przy użyciu urządzeń radionawigacyjnych oraz sprzężonych z nimi systemów informatycznych. Pozycja samolotu określana jest głównie na podstawie wskazań urządzeń radarowych. Szczególną uwagę przy określaniu minimum separacyjnego zwraca się na: prędkość samolotu, masę (turbulencja w śladzie), względne kierunki lotu, techniczne ograniczenia radaru, trudności wynikające z przecięcia łączności.

Podstawową techniką zapewnienia separacji radarowej jest wektorowanie. Polega ono na przekazaniu pilotowi odpowiedniej instrukcji w postaci ciągu kursów, które pozwolą mu utrzymywać nakazaną linię drogi w celu uniknięcia kolizji lub naruszenia separacji.

Minimum separacji radarowej w FIR Warszawa, wynosi:

- 7 NM (pozioma),
- 300 m (1000 stóp) poniżej poziomu lotu FL (*Flight Level*) 410,
- 600 m (2000 stóp) na i powyżej FL 410 (pionowa).

Wysokość na której znajduje się samolot, jego poziom lotu (FL), można określić dzięki ustawieniu znajdującego się na pokładzie wysokościomierza barometrycznego na ciśnieniu 1013,2 hPa. Poziom lotu jest więc definiowany jako powierzchnia o stałym ciśnieniu atmosferycznym odniesiona do szczególnej wartości ciśnienia atmosferycznego 1013,2 hPa i oddzielona od innych takich powierzchni określonymi różnicami ciśnienia. Poziom lotu jest podawany w setkach stóp.

Do poziomu FL 410 używane są wszystkie poziomy (co 1000 stóp) czyli np. 100, 110, 120 itd., a powyżej FL 410 co drugi (tzn. co 2000 stóp) czyli 430, 450, 470 itd. Samolotom

z kursami od 0° do 179° (na wschód) przydziela się poziomy lotu nieparzyste, a od 180° do 359° (na zachód) parzyste.

Minima separacji odgrywają w omawianym modelu sektora istotną rolę. Na przecięciach płaszczyzn, usytuowanych w przestrzeni w odległościach zgodnych z minimami separacji poziomej i pionowej, można określić punkty, które wykorzystywane są do opisu struktury sektora. Punkty te mogą, w zależności od potrzeb, przyjmować kilka stanów, z których najistotniejsze są dwa:

- aktywne, to znaczy takie, które mogą być wykorzystane do planowania przelotu samolotu,
- nieaktywne, czyli takie przez które przelot samolotu jest niemożliwy, np. gdy punkt stanowi część elementu elastycznego przestrzeni zamówionego przez innego użytkownika przestrzeni.

Tak opisana przestrzeń sektora:

- znacznie ułatwia analizę zarządzania przestrzenią, szczególnie w zakresie zamykania fragmentów sektora dla ruchu komunikacyjnego,
- umożliwia dokładne odwzorowanie jego granic, bryły i struktury,
- upraszcza zdefiniowanie procedury prowadzenia kontroli ruchu.

4. MODEL SEKTORA KONTROLI

Przestrzeń powietrzną P można przedstawić jako pewien obszar w przestrzeni trójwymiarowej. Można w niej zdefiniować podziałkę odwzorowującą minima separacji poziomej i pionowej. Poprzez wyznaczenie płaszczyzn oddalonych od siebie o wartość podziałki uzyskamy trójwymiarową siatkę, umożliwiającą swobodne określenie przestrzeni o skomplikowanych kształtach. W modelu przyjęto, że podziałka w poziomie (na osiach x i y) wynosi 5 NM, a w pionie (na osi z) 300 m czyli 1000 stóp. Na przecięciach płaszczyzn powstaną punkty p , które będą wykorzystywane do opisu modelowanego obszaru:

$$P = \{p(x_i, y_i, z_i)\} \quad (1)$$

gdzie z oznacza poziom lotu (wysokość) a x i y to pozostałe współrzędne określające położenie w kartezjańskim układzie współrzędnych o określonym początku. W modelu zredukowano minima separacji poziomej z 7 do 5 mil (zgodne z trendem wedle którego w celu zwiększenia przepustowości sektorów dąży się do takiej redukcji); powyżej FL 410 zredukowano minima separacji pionowej do 1000 stóp. Dzięki temu możliwe jest dokładniejsze odwzorowanie przestrzeni, a jednocześnie uzyskano jednolitość w całym modelowanym obszarze. Przyjęto, że maksymalną wysokością sektora będzie poziom FL 500 zaś minimalną poziom FL 100.

Przy takich założeniach przyjęto, że współrzędne x , y i z są dyskretne i mogą przyjmować wartości:

$$x = 0, 5, 10, \dots, x_i, 600 \text{ [NM]}$$

$$y = 0, 5, 10, \dots, y_i, 600 \text{ [NM]}$$

$$z = 100, 110, \dots, z_i, 500 \text{ [FL]}$$

Jak wspomniano wcześniej punktom p przypisuje się pewne cechy (stany), w zależności od ich charakteru w opisywanej przestrzeni. Podstawową kwestią jest ich stała dostępność (lub nie) dla ruchu komunikacyjnego. W związku z tym definiuje się funkcję a aktywności punktu w przestrzeni, w sposób następujący:

$$a: P \rightarrow \{0,1\} \quad (2)$$

gdzie:

$a(p(x_i, y_i, z_i)) = 1$ oznacza, że punkt $p(x_i, y_i, z_i)$ jest stałe dostępny dla ruchu komunikacyjnego (inaczej aktywny), zaś

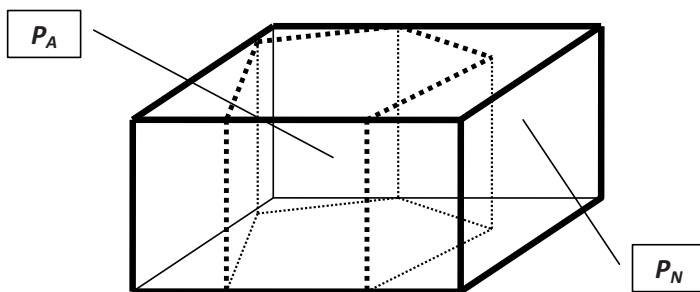
$a(p(x_i, y_i, z_i)) = 0$ oznacza, że punkt $p(x_i, y_i, z_i)$ jest stałe niedostępny dla ruchu komunikacyjnego (nieaktywny).

Dla wygody będziemy posługiwali się oznaczeniami (rys. 1):

P_A – przestrzeń powietrzna dostępna dla ruchu lotniczego (aktywna), P_N – przestrzeń powietrzna niedostępna dla ruchu lotniczego gdzie:

$$P_A = \{p(x_i, y_i, z_i): a(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (3)$$

$$P_N = \{p(x_i, y_i, z_i): a(p(x_i, y_i, z_i)) = 0\} \quad (4)$$



Rys. 1. Przestrzeń powietrzna P z wyznaczonymi granicami między przestrzenią dostępną P_A i niedostępną P_N dla ruchu lotniczego

Właściwym obszarem analizy w niniejszym opracowaniu jest wydzielony fragment przestrzeni powietrznej P , przyjmujący kształty wynikające z aktualnej konfiguracji przestrzeni powietrznej, zawierający w sobie określone (ustanawiane w zależności od potrzeb) stałe lub elastyczne elementy przestrzeni (Tabela 1). Konfiguracja, a za nią przepustowość przestrzeni powietrznej jest wypadkową potrzeb przewoźników lotniczych i możliwości służb zarządzających ruchem lotniczym. Dynamika zdarzeń ruchowych oraz stanu środowiska powoduje, że przepustowość ulega ciągłym zmianom, zaś służby zarządzające ruchem lotniczym podejmują działania by tym zmianom sprostać. Elementem

tych działań jest aktywne dostosowywanie konfiguracji sektorów kontroli obszaru do zmieniającej się sytuacji. Polega ono na łączeniu sektorów elementarnych (gdy ruch jest mały i nieskomplikowany), podziale sektorów na mniejsze (gdy odwrotnie) lub aktywacji określonych elastycznych elementów przestrzeni.

Poniżej zostanie opisany sposób odwzorowania tych działań w modelu sektora. Ich efektem jest określenie aktualnego obszaru dostępnego dla ruchu komunikacyjnego oraz stanu poszczególnych punktów należących do niego.

W przypadku sektora kontroli obszaru, typowo w przestrzeni P_N znajdują się wszystkie stałe elementy przestrzeni powietrznej z wyjątkiem stałych dróg lotniczych AWY i dróg warunkowych pierwszej kategorii CDR1, które należą do przestrzeni P_A . By wykonać lot w przestrzeni kontrolowanej należy złożyć plan lotu. Opisuje on planowane położenie samolotu w czasie i przestrzeni. Trasy lotu dobierane są przez przewoźników lotniczych, tak, by były one jak najlepsze ze względu na ekonomikę lotu (najkrótsze i wykonywane na właściwych poziomach lotu, wynikających z możliwości technicznych samolotów). Trasa w planie lotu opisana jest kodami dróg lotniczych. W drogach lotniczych definiuje się punkty umożliwiające bliższe określenie pozycji samolotu, takie jak: bramy wejściowe i wyjściowe sektora, punkty meldowania i punkty nad pomocami radionawigacyjnymi. W modelu uwzględniono te wszystkie punkty charakterystyczne, wyróżniając dwie kategorie: bramy (łącznie wlotowe i wylotowe) oraz pozostałe punkty zdefiniowane w drodze, określane w planie lotu. Pozostałe aktywne punkty przestrzeni P_A , to punkty niezdefiniowane.

Definiujemy zatem funkcję b :

$$b: P \rightarrow \{0,1\} \quad (5)$$

określającą przynależność punktu w przestrzeni do zbioru P_B bram wejściowych i wyjściowych sektora:

$$P_B = \{p(x_i, y_i, z_i): b(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (6)$$

Dodatkowo definiujemy funkcję d :

$$d: P \rightarrow \{0,1\} \quad (7)$$

określającą przynależność punktu w przestrzeni do zbioru P_D pozostałych zdefiniowanych punktów w drogach lotniczych - punktów meldowania i punktów nad pomocami nawigacyjnymi:

$$P_D = \{p(x_i, y_i, z_i): d(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (8)$$

Zgodnie z koncepcją FUA, w modelu sektora obszaru należy obok stałych elementów przestrzeni zdefiniować elementy elastyczne, składające się na przestrzeń P_E . Są to zbiory punktów p , które gdy zostaną aktywowane, albo zwiększają przestrzeń dostępną dla ruchu komunikacyjnego (drogi warunkowe CDR2 i CDR3), albo zmniejszają ją, określając przestrzeń czasowo wyłączoną z możliwości przelotu przezeń samolotów.

Definiujemy zatem funkcję e^+ :

$$e^+: P \rightarrow \{0,1\} \quad (9)$$

określającą przynależność punktu w przestrzeni do zbioru P_E^+ obszarów dodatkowo udostępnionych dla ruchu komunikacyjnego, ze względu na aktywację elastycznego elementu przestrzeni powietrznej:

$$P_E^+ = \{p(x_i, y_i, z_i): e^+(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (10)$$

Definiujemy również funkcję e^- :

$$e^-: P \rightarrow \{0,1\} \quad (11)$$

określającą przynależność punktu w przestrzeni do zbioru P_E^- obszarów niedostępnych dla ruchu komunikacyjnego, ze względu na aktywację elastycznego elementu przestrzeni powietrznej:

$$P_E^- = \{p(x_i, y_i, z_i): e^-(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (12)$$

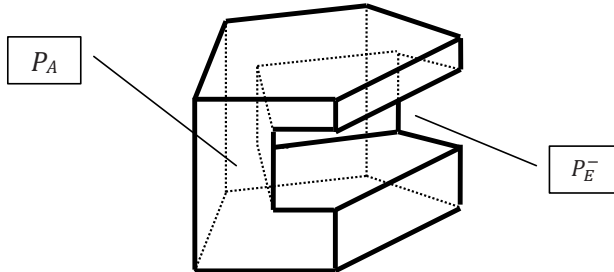
Punkty obszaru $P_E = P_E^+ \cup P_E^-$ mogą należeć zarówno do zbioru punktów dostępnych P_A jak i niedostępnych P_N , gdyż bardzo często leżą one na granicy tych obszarów. Zakładamy jednak, że $P_E^+ \cap P_E^- = \emptyset$.

Tabela 2

Elementy przestrzeni powietrznej w modelu

l.p.	Rzeczywiste elementy przestrzeni powietrznej	Elementy przestrzeni powietrznej w modelu
ELEMENTY STAŁE		
1.	Sieć stałych dróg lotniczych (górne <i>Upper Airway – UA</i> WY, dolne <i>Airway – A</i> WY i nawigacji obszarowej <i>RNAV – A</i> WY)	P_A
2.	Warunkowe drogi lotnicze kategorii pierwszej <i>CDR1</i>	
3.	Rejony kontrolowane lotnisk cywilnych i/lub wojskowych <i>TMA</i>	P_N
4.	Strefy kontrolowane lotnisk cywilnych i wojskowych <i>CTR</i>	
5.	Strefy ruchu lotniskowego lotnisk cywilnych <i>ATZ</i> .	
6.	Strefy ruchu lotniskowego lotnisk wojskowych <i>MATZ</i>	
7.	Strefy identyfikacji obrony powietrznej <i>ADIZ</i>	
8.	Strefa zakazana <i>P</i>	
ELEMENTY ELASTYCZNE		
1.	Drogi warunkowe <i>CDR 2, 3</i>	P_E^+
2.	Rejon czasowo wydzielony <i>TSA</i>	P_E^-
3.	Korytarze dolotowe do stref czasowo wydzielonych <i>TFR</i>	
4.	Przestrzeń powietrzna o zredukowanej koordynacji <i>RCA</i>	
5.	Obszary przekraczania granicy <i>CBA</i>	
6.	Strefy ograniczone (<i>R</i>)	
7.	Strefy niebezpieczne (<i>D</i>)	

Istotę niedostępnych punktów przestrzeni wynikających z wydzielenia elastycznych elementów przestrzeni powietrznej przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Sektor kontroli ruchu lotniczego obszaru P_A z aktywnymi (wydzielonymi) elementami elastycznymi przestrzeni P_E^-

Ograniczenia dostępności przestrzeni powietrznej w sektorze obszaru, oprócz opisanych wyżej, wynikających z koncepcji FUA, mogą być również generowane przez trudne do przewidzenia zdarzenia losowe, np. pogodę. Przestrzeń taką nazwiemy przestrzenią z działającym zakłóceniem P_Z . Występowanie tego rodzaju obszarów może powodować konieczność wykonania lotu poza drogami lotniczymi, gdy zakłócenie wystąpi w drodze lotniczej i należy je omijać.

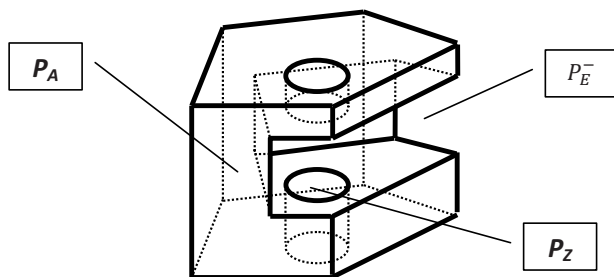
Możemy zdefiniować funkcję zakłóceń z :

$$z: P \rightarrow \{0,1\} \quad (13)$$

określającą przynależność punktu w przestrzeni do zbioru P_Z obszarów niedostępnych dla ruchu komunikacyjnego, ze względu na występujące ograniczenie o charakterze środowiskowym, zazwyczaj meteorologicznym, ale również związanym z innego rodzaju zjawiskami, np. aktywnością ptaków:

$$P_Z = \{p(x_i, y_i, z_i): z(p(x_i, y_i, z_i)) = 1\} \quad (14)$$

Dla przykładu przedstawiono działające zakłócenie w postaci chmury CB (Rys. 3).



Rys. 3. Sektor kontroli ruchu P_A z aktywnymi elastycznymi elementami przestrzeni P_E^- i występującym zakłóceniem P_Z , czyli tzw. struktura ostateczna S_A

Korzystając z poprzednich oznaczeń możemy zapisać przestrzeń punktów dostępnych dla ruchu komunikacyjnego S_A następująco:

$$S_A = (P_A \cup P_E^+) \cap \overline{P_Z} \cap \overline{P_E^-} \quad (15)$$

zaś przestrzeń punktów niedostępnych S_N jako:

$$S_N = (P_A \cap \overline{P_E^+}) \cup P_E^- \cup P_Z \quad (16)$$

Zdefiniujmy zbiór cech (stanów) poszczególnych punktów przestrzeni Ω :

$$\Omega = \Omega_A \cup \Omega_N \quad (17)$$

gdzie $\Omega_A = \{\omega_B, \omega_D, \omega_E^+, \omega_A\}$, zaś $\Omega_N = \{\omega_E^-, \omega_Z, \omega_N\}$.

Poszczególne cechy mają następującą interpretację:

ω_B - punkty aktywne, dostępne dla ruchu komunikacyjnego, wyróżnione jako bramy wlotowe i wylotowe do sektora,

ω_D - punkty aktywne, dostępne dla ruchu komunikacyjnego, wyróżnione jako punkty charakterystyczne w drogach lotniczych,

ω_E^+ - punkty aktywne, dostępne dla ruchu komunikacyjnego dzięki aktywacji elementu elastycznego przestrzeni powietrznej typu droga warunkowa CDR2 lub CDR3,

ω_A - pozostałe punkty aktywne, dostępne dla ruchu komunikacyjnego, należące do stałych elementów przestrzeni powietrznej,

ω_E^- - punkty nieaktywne, niedostępne dla ruchu komunikacyjnego ze względu na aktywację elementu elastycznego przestrzeni powietrznej, powodującą rezerwację tego elementu dla innego użytkownika,

ω_Z - punkty nieaktywne, niedostępne dla ruchu komunikacyjnego ze względu na stan środowiska (głównie zakłócenia meteorologiczne)

ω_N - pozostałe punkty nieaktywne, niedostępne dla ruchu komunikacyjnego,

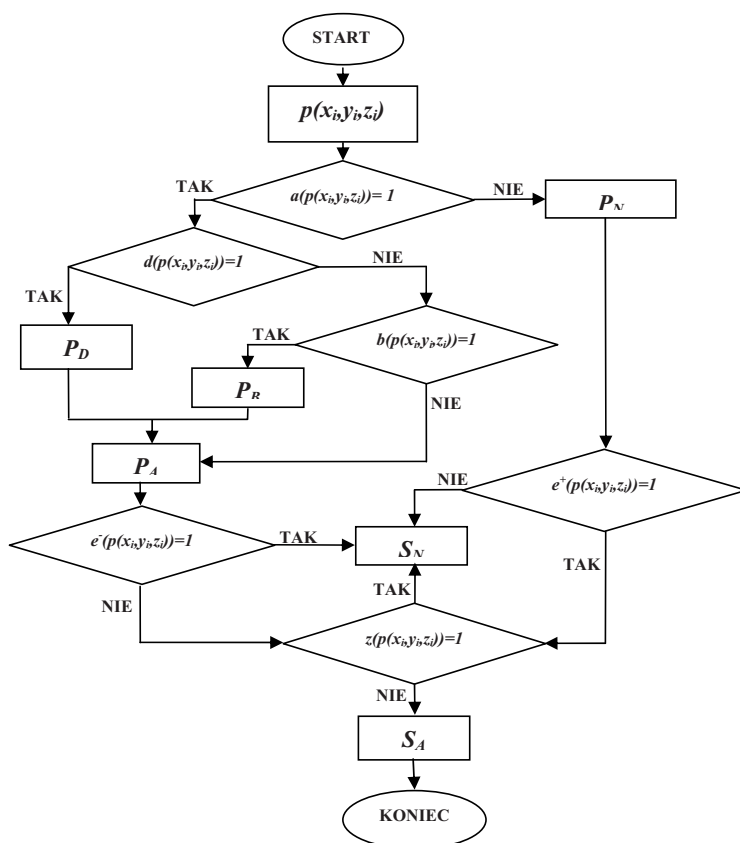
Ostateczną strukturę modelu sektora ruchu lotniczego do badania zależności płynność-przepustowość określa funkcja s , która poszczególnym punktom w modelowanej przestrzeni przypisuje dynamicznie stany (cechy), określona następująco:

$$s: P \rightarrow \Omega$$

$$s(p(x_i, y_i, z_i)) = \begin{cases} \omega_B, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in (P_A \cup P_E^+) \cap P_B \cap \overline{P_Z} \cap \overline{P_E^-} \\ \omega_D, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in (P_A \cup P_E^+) \cap P_D \cap \overline{P_Z} \cap \overline{P_E^-} \\ \omega_E^+, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in P_E^+ \cap \overline{P_B} \cap \overline{P_D} \cap \overline{P_Z} \cap \overline{P_E^-} \\ \omega_A, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in P_A \cap \overline{P_B} \cap \overline{P_D} \cap \overline{P_Z} \cap \overline{P_E^-} \\ \omega_E^-, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in P_E^- \\ \omega_Z, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in P_Z \cap \overline{P_E^-} \\ \omega_N, \text{ jeśli } p(x_i, y_i, z_i) \in P_N \cap \overline{P_E^-} \cap \overline{P_Z} \end{cases} \quad (18)$$

A zatem, sektor kontroli obszaru, czyli przestrzeń o ustalonych granicach i strukturze wewnętrznej w postaci zdefiniowanych stałych elementów przestrzeni, czyli dróg lotniczych, z uwzględnieniem aktywnych elastycznych elementów przestrzeni oraz zakłóceń o charakterze środowiskowym, opisany jest zbiorem punktów S_A , których cechy należą do zbioru $\Omega_A = \{\omega_B, \omega_D, \omega_E^+, \omega_A\}$. Struktura sektora, a zatem zbiór punktów S_A oraz cechy Ω_A przypisane punktom tego zbioru, ulega zmianom w czasie - zgodnie z procesem zarządzania przestrzenią powietrzną. Ten sposób opisu sektora pozwala na odwzorowanie nawet skomplikowanych jego kształtów, jeżeli ze względu na potrzeby ruchowe taka konfiguracja będzie niezbędna.

Na potrzeby przyszłych badań symulacyjnych, odnośnie ilościowej zależności między płynnością ruchu a przepustowością sektora, opracowano aplikację komputerową. W zakresie odwzorowania struktury sektora kontroli ruchu lotniczego realizowane zadania przedstawia algorytm pokazany na rysunku 4.



Rys. 4. Algorytm tworzenia opisu sektora kontroli ruchu lotniczego w aplikacji komputerowej do analizy zależności płynność-przepustowość

5. PODSUMOWANIE

Opisany model sektora kontroli ruchu lotniczego obszaru zostanie wykorzystany do badania zależności występujących między przepustowością przestrzeni powietrznej a płynnością przepływającego przez niego ruchu lotniczego. Stały wzrost wielkości ruchu wymusza prowadzenie badań nad zwiększeniem efektywności zarządzania ruchem lotniczym i przestrzeniami powietrznymi. Wydaje się, że lepsze poznanie tej zależności pozwoli na poprawę efektywności zarządzania przestrzenią i ruchem. Będzie to możliwe dzięki sformułowaniu funkcji celu sterowania ruchem, opartej na maksymalizacji płynności. Płynność jest łatwiejsza do jednoznacznej oceny w warunkach pracy ciągłej w czasie rzeczywistym niż przepustowość. W przypadku wykazania jednoznacznej

zależności między płynnością a przepustowością, możliwe będzie sterowanie przepustowością poprzez sterowanie płynnością. Opisany tu model to jedynie pierwszy etap większego projektu. Kolejnymi będą: model przepływu ruchu oraz kontroli ruchu w opisanym tu środowisku. Modele te zostaną zintegrowane w postaci aplikacji komputerowej, która będzie stanowiła narzędzie, pozwalające na weryfikację przyjętych też badawczych oraz opracowanie strategii sterowania wykorzystującej pojęcie płynności ruchu.

Bibliografia

1. European Commission: Commission Regulation (EC) No 2150/2005 of 23 December 2005 laying down common rules for the flexible use of airspace. Official Journal of European Union. L 342/20, 2005.
2. Dmochowski P.A., Skorupski J.: Metoda oceny płynności ruchu lotniczego kontrolowanego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Transport (ISSN 0209-3324), z. 58, str. 91-98, Gliwice 2005.
3. Dmochowski P.A., Skorupski J.: Pewna metoda oceny płynności ruchu lotniczego, Badania Operacyjne i Systemowe, Analiza systemowa w globalnej gospodarce opartej na wiedzy (ISBN 83-60434-21-2), str. 277-286, Wyd. EXIT, Warszawa 2006.
4. Malarski M.: Metoda wyznaczania przepustowości sektora kontroli ruchu lotniczego, Journal of Aeronautica Integra, Nr. 1, p. 43-49, Rzeszów 2007.
5. Eurocontrol specification for the application of the Flexible Use of Airspace (FUA). Eurocontrol 2009.
6. Skorupski J.: Air traffic smoothness as a measure of air traffic safety. Reliability Risk and Safety (ISBN 978-0-415-60427-7), Taylor & Francis Group/Balkema, London 2010, pp. 707-713.
7. Piątek M.: Metoda wyznaczania niekolizyjnej trajektorii lotu nietrasowego w przestrzeni kontrolowanej, rozprawa doktorska, WT PW, 2010.

MODEL OF AIR TRAFFIC CONTROL SECTOR FOR ANALYSIS OF AIR TRAFFIC SMOOTHNESS

Summary: The constant increase in air traffic volume forces to seek methods of improving the effectiveness of air traffic and airspace management. Such actions are undertaken for years by the air traffic management and research centres. A relatively new concept leading to better utilisation of available airspace is to improve air traffic smoothness. It seems that the increase in air traffic smoothness should improve the capacity of the airspace, as the air traffic controller can handle a larger number of planes as they pass through the sector evenly and smoothly. This is primarily because such a traffic does not require much of the coordination by the controller. There is however the question about quantitative relationship between traffic smoothness and airspace capacity. The answer requires model research, as for safety reasons it is impossible to conduct research on the real system.

This paper presents a model of air traffic control sector area based on unused in the literature method describing the structure of the sector in the form of inactive and active grid points. Sector structure is modelled to take account of any demand to the space from users under the concept of FUA. Model takes into account the random changes in the availability of airspace (e.g. because of the weather). It can be used to build a research tool in the form of a computer program, which will allow the study of quantitative relationship between traffic smoothness and capacity of the sector.

Keywords: flow of air traffic, control sector capacity, air traffic management