

Piotr Andrzej DMOCHOWSKI, Jacek SKORUPSKI¹

METODA OCENY PŁYŃNOŚCI RUCHU LOTNICZEGO KONTROLOWANEGO

Streszczenie. Jednym z najważniejszych parametrów oceny jakości ruchu lotniczego jest płynność. W artykule przedstawiono pojęcie płynności. Omówiono podstawowe zasady zarządzania płynnością ruchu lotniczego. Następnie przedstawiono pewną metodę oceny płynności. Metoda ta może być zastosowana do wspomagania służb zarządzania przepływem strumieni ruchu lotniczego.

METHOD FOR EVALUATION OF CONTROLLED AIR TRAFFIC SMOOTHNESS

Summary. One of the most important parameters of air traffic quality evaluation is smoothness. In the paper idea of smoothness is presented. General rules of air traffic smoothness management are described. Then a method for air traffic smoothness is presented. This method can be used to aid in air traffic flow management services tasks.

1. WPROWADZENIE

Ruch lotniczy to zorganizowany i uporządkowany ruch statków powietrznych w ściśle określonych przestrzeniach powietrznych i naziemnych. Podlega on kontroli ze strony odpowiednich, uprawnionych organów państwowych. Istnieje wiele kryteriów oceny ruchu lotniczego. Spośród nich najważniejsze jest kryterium bezpieczeństwa. Istnieje możliwość oceny bezpieczeństwa ruchu przy wykorzystaniu pojęcia jakości ruchu. Jakość ruchu jest definiowana przy wykorzystaniu wskaźników, których podstawą są kryteria ekonomiczne (ważne głównie dla użytkowników przestrzeni powietrznej – linii lotniczych) oraz kryteria związane z czasem podróży (ważne zwłaszcza dla pasażerów). Definicje tych wskaźników przyjmują, że bezpieczeństwo jest „na właściwym poziomie”. Służby kontroli ruchu lotniczego dążą do ekstremalizacji tych wskaźników, jednak wcześniej dbają o spełnienie wszystkich przepisów ruchu.

Istnieje ścisły związek między jakością ruchu a jego bezpieczeństwem. Ruch o dobrej jakości jest jednocześnie ruchem bezpiecznym. Wystarczy bowiem zauważyć, że ruch bezpieczny to ruch płynny, zgodny z wcześniejszym planem, nie podlegający interwencji kontrolera. Taki ruch jednocześnie jest tani, gdyż trajektoria lotu odpowiada optymalnym charakterystykom lotnym samolotów, to znaczy ma wysoką jakość z punktu widzenia przewoźników. Analogicznie ruch płynny gwarantuje dotarcie samolotów do miejsca

¹ Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, (22) 660-7339, jsk@it.pw.edu.pl

przeznaczenia w zaplanowanym wcześniej czasie, to znaczy ruch taki ma wysoką jakość z punktu widzenia pasażerów, gdyż minimalizuje opóźnienia.

Jakość ruchu lotniczego jest funkcją jego wielkości. Przy dużym ruchu jego jakość, a także bezpieczeństwo spadają. Aby wyznaczyć optymalną wielkość ruchu, konieczne jest właściwie zwymiarowanie płynności tak, aby móc określić wpływ zmian wielkości ruchu na płynność.

2. POJĘCIE PŁYNNOŚCI RUCHU LOTNICZEGO

Oznaczmy planowaną trajektorię ruchu i -tego samolotu w sektorze kontroli przez $M_{P_i}^*$. Jest to zazwyczaj trajektoria optymalna ze względu na zużycie paliwa, czas przelotu i charakterystyki lotne samolotu. Trajektoria $M_{P_i}^*$ jest wyznaczona przez uporządkowany ciąg pozycji samolotu, określający położenie charakterystycznych punktów trasy, czasy przelotu przez te punkty oraz wektory prędkości w chwili przelotu przez te punkty. Zatem

$$M_{P_i}^* = \{W_1^*, V_1^*, t_1^*\}, \{W_2^*, V_2^*, t_2^*\}, \dots, \{W_{N_i}^*, V_{N_i}^*, t_{N_i}^*\}, \quad (1)$$

gdzie N_i jest liczbą definiowanych punktów trasy dla samolotu i -tego, W_i^* , V_i^* to wektory określające planowane położenie i prędkość samolotu i -tego.

Dla zadanego przedziału czasu (np. doby) przewidywany plan lotu jest zbiorem planowanych trajektorii $M_{P_i}^*$ dla wszystkich samolotów:

$$M^* = \{M_{P_i}^*\}, \text{ dla } i=1, \dots, LS \quad (2)$$

Plan lotu może być zakłócany przez liczne zewnętrzne czynniki o charakterze losowym: meteorologiczne, ruchowe itp. Rzeczywistą realizację planu lotu i -tego samolotu oznaczmy przez M_{P_i} . Określa ją ciąg rzeczywistych punktów charakterystycznych trasy (punktów kontrolnych) wraz z rzeczywistym czasem przelotu i wektorem prędkości w chwili przelotu przez te punkty:

$$M_{P_i} = \{W_1, V_1, t_1\}, \{W_2, V_2, t_2\}, \dots, \{W_{M_i}, V_{M_i}, t_{M_i}\}, \quad (3)$$

gdzie M_i jest liczbą punktów kontrolnych rzeczywiście miniętych przez i -ty samolot.

Jeżeli $M_{P_i}^* = M_{P_i}$, wówczas mówimy, że przelot i -tego samolotu był zgodny z planem (był płynny). Oczywiście mówiąc o równości $M_{P_i}^*$ i M_{P_i} konieczne jest tu dopuszczenie pewnej tolerancji, zwłaszcza odnośnie do czasu przelotu nad poszczególnymi punktami.

Przeloty, w których $M_{P_i}^* \neq M_{P_i}$, nazwiemy przelotami zakłóconymi. Do najbardziej typowych przypadków przelotów zakłóconych należą:

- opóźnienie przelotu,
- zmiana poziomu przelotu,
- zmiana trasy przelotu,
- wykonywanie nieplanowanych manewrów,
- inne.

Płynność ruchu może stanowić podstawę do oceny bezpieczeństwa ruchu w dłuższym horyzoncie czasowym. Ocena ta może bazować na stwierdzeniu, iż ruch płynny jest ruchem bezpiecznym. Plany lotów są wstępnie koordynowane, tzn. zapewniona jest bezkolizyjność

dla przypadku, gdy wszystkie samoloty lecą zgodnie ze swoimi planami. Oznacza to, że dla każdego samolotu z planu, dla każdego z punktów na trasie tych samolotów spełnione są wszystkie wymagane separacje. Jest zatem rzeczą oczywistą, że taki ruch jest w pełni bezpieczny. Każde omówione powyżej zakłócenie płynności, spowodowane czynnikami zewnętrznymi, stanowi pewne zagrożenie dla ruchu. Konieczne jest bowiem podejmowanie działań przez kontrolera ruchu lotniczego zmierzających do rozwiązania sytuacji potencjalnie konfliktowej. Działania te, podejmowane w warunkach stresu i deficytu czasu, mogą być błędne. Ponadto zajmowanie uwagi kontrolera sprawdzaniem, czy odstępstwo od planu (zakłócenie płynności) może doprowadzić do naruszenia separacji, powoduje odwrócenie jego uwagi od innych zadań i także może stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa. Oczywiście stopień tego zagrożenia zależy od wielu czynników, takich jak: wielkość obciążenia pracą, doświadczenie i kwalifikacje zawodowe kontrolera itp. Można więc przyjąć, że zagrożenie bezpieczeństwa jest proporcjonalne do stopnia naruszenia płynności. Zatem, aby wykorzystać pojęcie płynności do oceny bezpieczeństwa konieczne jest zwymiarowanie płynności.

Możliwe są dwa podejścia: dwuwartościowe i wielowartościowe. W każdym z tych przypadków miarą płynności byłby stosunek liczby lotów płynnych (niezakłóconych) do liczby lotów ogółem:

$$F = \frac{LS - L_z}{LS} = 1 - \frac{L_z}{LS} \quad (4)$$

Szczegółowo miary płynności wykorzystujące binarną funkcję płynności, wielowartościową funkcję płynności oraz wielowartościową ważoną funkcję płynności omówiono w [1].

3. ZARZĄDZANIE PŁYNNOCIĄ RUCHU LOTNICZEGO

Obecnie w regionie europejskim spiętrzeniom w ruchu lotniczym komunikacyjnym przeciwdziała CFMU (Central Flow Management Unit – Centralna Jednostka Zarządzania Przepływem Ruchu Lotniczego). To CFMU w trójfazowym procesie ATFCM (ATFCM Air Traffic Flow and Capacity Management – Zarządzanie Pojemnością i Przepływem Ruchu Lotniczego) przeprowadza obróbkę danych uzyskiwanych z planów lotów nadając tworzonemu strumieniom parametry, odpowiadające przepisom, infrastrukturze i możliwościom techniczno – ekonomicznym statków powietrznych i obszarów, przez które ruch ten ma przepływać.

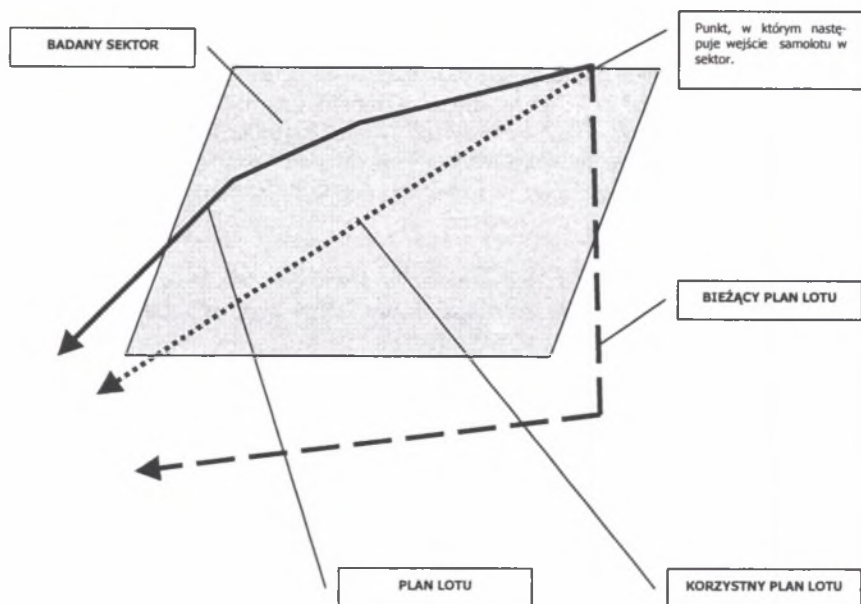
Strumień ruchu lotniczego to uporządkowany w czasie zbiór wszystkich samolotów, które w badanym okresie (godzinie) weszły w granicę badanej przestrzeni.

Plan lotu to określone informacje dotyczące zamierzonego lotu lub części lotu statku powietrznego dostarczone przed lotem organom służb ruchu lotniczego.

Biejący (rzeczywisty) plan lotu to plan lotu z ewentualnymi zmianami wynikającymi z kolejnych zezwoleń.

Korzystny (optymalny) plan lotu to plan, w którym parametry lotu przyjmują wartości bezpieczne i korzystne z punktu widzenia ekonomiki lotu. Doskonałym przykładem jest lot statku powietrznego „po prostej”. Odbyna się on zazwyczaj poza drogami lotniczymi po możliwie najkrótszej trasie. Sytuacja ta z jednej strony oznacza wystąpienie rozumianego w potocznym tego słowa znaczeniu zakłócenia (więcej pracy ma kontroler i pilot, zmianie ulegają parametry lotu), lecz z drugiej strony może oznaczać zysk (np. czasu, gdy statek powietrzny przybędzie na lotnisko przeznaczenia wcześniej niż to zakładano!). „Skrót” może oznaczać duże, wymierne, obliczalne oszczędności finansowe (dla przewoźników lotniczych

oznacza on między innymi: oszczędności paliwa, krótszy czas przebywania maszyn i personelu w powietrzu itd.). Wszystko to powoduje, że piloci niezwykle chętnie korzystają z możliwości lotu „po prostej” („skrótów”), traktując to jako doskonałe narzędzie poprawy ekonomiki lotu. Może się zdarzyć sytuacja, w której parametry lotu z planu lotu pokrywać się będą z parametrami z bieżącego i/lub korzystnego planu lotu.



Rys. 1. Graficzna ilustracja planu lotu, bieżącego planu lotu i korzystnego planu lotu
 Fig. 1. Graphical illustration of flight plan, current flight plan, advantageous flight plan

4. METODA OCENY PŁYNNOCI RUCHU LOTNICZEGO

Aby ocenić płynność ruchu lotniczego kontrolowanego, należy przeprowadzić szereg pomiarów parametrów statków powietrznych przebywających w okresie badania w obserwowanym sektorze. Sam proces oceny podzielony został na cztery etapy.

Etap 1 – umożliwia ocenę stanu, w jakim znajduje się statek powietrzny w pewnej chwili (jest to wartość liczbową otrzymaną z porównania parametrów lotu statku powietrzego uzyskanych z planu lotu, bieżącego planu lotu i korzystnego planu lotu i w przypadku wystąpienia różnic rozpoznawania ich powodów).

Etap 2 – odpowiada za określenie stanu grupy statków powietrznych przebywających w pewnej chwili w badanym sektorze (średnia z danych uzyskanych w etapie 1).

Etap 3 – umożliwia ocenę parametru opisującego stan panujący w sektorze dla określonych odcinków czasu (okres badania podzielony jest na podokresy; działanie takie służy uchwyceniu trendu panującego w sektorze).

Etap 4 – odpowiada za ocenę płynności ruchu lotniczego kontrolowanego w badanym sektorze dla całego okresu badania (średnia z danych uzyskanych w etapie 3).

Założenia:

1. Okres badania zamyka się w czasie jednej godziny (jednostka czasu może być w zależności od potrzeb zmieniana, może wynosić np. dwie, trzy godziny itd.).
2. Obszarem swym badanie obejmuje jedynie obserwowany sektor.
3. Zdarzenia, które miały wpływ na parametry lotu, lecz wydarzyły się przed wejściem statku powietrznego w badany sektor, nie są brane pod uwagę. Liczy się więc chwila wejścia statku powietrznego w sektor. Od tej chwili jest on poddany obserwacji, od tej też chwili rejestrowane są wszelkie zmiany jego parametrów lotu i trwa to aż do chwili wyjścia samolotu z sektora (w obu przypadkach liczy się chwila przekroczenia granicy).
4. Dla samolotu wchodzącego w sektor (w punkcie i chwili, gdzie i gdy wejście następuje) otrzymujemy następującą informację:
 - plan lotu – są to zamiary pilota na chwilę wejścia samolotu w sektor, tracą więc wszelkie znaczenie wszystkie plany i zmiany zachodzące przed wejściem samolotu do badanego sektora, a samo wejście w sektor (chwila przekroczenia jego granicy) oznacza punkt zerowy (początek zainteresowania tym samolotem);
 - plan lotu korzystny (optymalny), czyli jak powinna w tym sektorze wyglądać optymalna, najlepsza ze względu na ekonomikę, bezpieczna trasa lotu.
5. Dopiero w trakcie badania (lotu) otrzymujemy plan lotu bieżący (rzeczywisty).
6. Badaniu podlegają przede wszystkim kurs (trasa lotu) i poziom lotu. Ostatni z parametrów, czas, będzie badany (porównywany) tylko w sytuacjach, gdy rzeczywista trasa lotu pokrywa się z planowaną lub korzystną trasą lotu. Porównywanie danych odbywa się zgodnie z zamieszczonymi poniżej tabelą 1 i rys. 2.
7. Pomiar odbywa się co minutę.
8. Chwila wejścia/wyjścia samolotu do/z sektora przyporządkowywana jest do najbliższej pełnej minuty, dzięki czemu nie zostaje zachwiana płynność pomiaru i obliczeń.
9. Takim samym pomiarem poddawane są wszystkie statki powietrzne, które w badanej chwili, okresie przebywają w sektorze.

Proces oceny płynności ruchu lotniczego kontrolowanego podzielony został na cztery etapy (opisane wyżej). Etapom tym odpowiadają cztery moduły liczące.

MODUŁ I (odpowiada etapowi 1) ocenia stan statku powietrznego dla pewnej chwili. Polega to na porównaniu parametrów lotu statku powietrznego uzyskanych z planu lotu, bieżącego planu lotu i korzystnego planu lotu. Jeśli wystąpiła różnica, to rozpoznawane zostają jej powody. Stąd pochodzi wartość liczbowa opisująca stan statku powietrznego w chwili badania. Parametr ten opisuje więc zmianę położenia statku powietrznego w chwili bieżącej względem planu lotu (przewidywań) i planu korzystnego. Pomiar taki powtarzany jest co minutę dla całego okresu badania i dotyczy wszystkich statków powietrznych przebywających wówczas w badanym sektorze. Odbywa się on zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2 i z wartościami podanymi w tab. 1.

Oznaczenia:

PAR_PL – parametry z planu lotu dla badanej chwili,

PAR_RZ – rzeczywiste (bieżące) parametry z planu lotu dla badanej chwili,

PAR_OP – korzystne (optymalne) parametry z planu lotu dla badanej chwili,

ZAKŁ – zakłócenie,

KORZ. – parametr w chwili badania przyjął wartość korzystną.

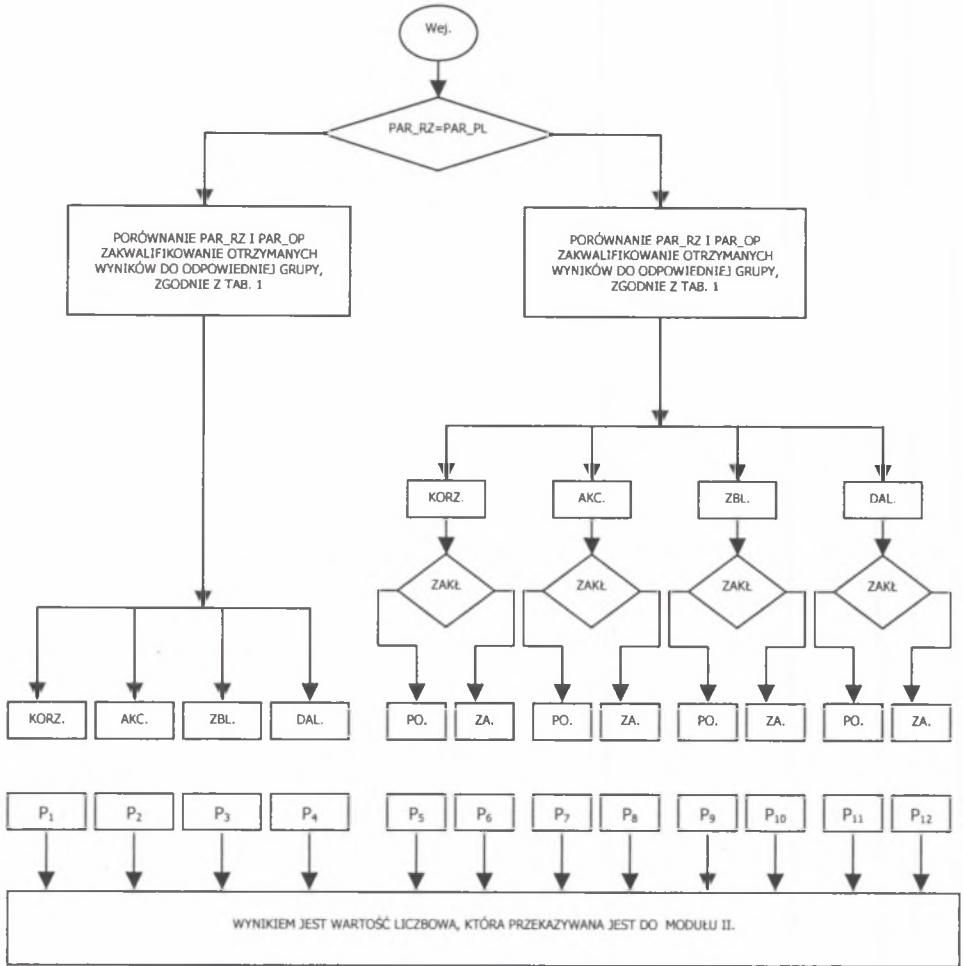
AKC. – parametr w chwili badania przyjął wartość akceptowalną.

ZBL. – parametr w chwili badania przyjął wartość zbliżoną.

DAL. – parametr w chwili badania przyjął wartość daleką.

PO. – zmiana parametru ze względu na chęć ich poprawy (niewymuszone),

ZA. – zmiana parametru ze względu na konieczność zachowania bezpieczeństwa lotu (wymuszona, zakłócenie).



Rys. 2. MODUŁ I, szacujący parametr opisujący stan statku powietrznego
 Fig. 2. MODULE I, determining parameter describing aircraft status

Tabela 1

Zakres zmian parametrów lotu

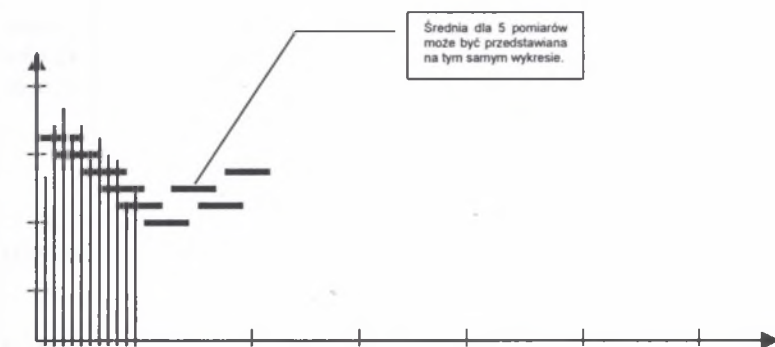
	OPTIMALNY	AKCEPTOWALNY	ZBLIŻONY	DALEKI
KURS (TRASA)	0 - +/- 1°	+/- 2° - +/- 3°	+/- 4° - +/- 5°	OD +/- 6°
POZIOM LOTU	0 - +/- 3 FL	+/- 4FL - -10 FL	+/- 11FL - -20 FL	OD -21 FL
CZAS	0 - +/- 1'	+/- 2' - +/- 3'	+/- 4' - +/- 5'	OD +/- 6'

Źródło: opracowanie własne

Parametrem P_n (wartość liczbowa określająca stan statku powietrznego w pewnej chwili) – przyporządkować należy konkretne wartości liczbowe [%], np.: $P_1 - 100$, $P_2 - 95$, $P_3 - 90$, $P_4 - 85$, $P_5 - 70$, $P_6 - 60$, $P_7 - 50$, $P_8 - 40$, $P_9 - 30$, $P_{10} - 20$, $P_{11} - 10$, $P_{12} - 0$.

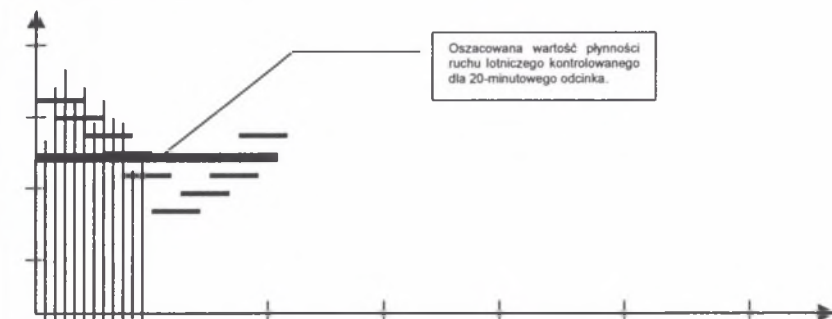
MODUŁ II (odpowiada etapowi 2) odpowiada za określenie stanu grupy statków powietrznych w pewnej chwili. Co minutę z MODUŁU I podawane są dane (wartości liczbowe) opisujące stany poszczególnych statków powietrznych znajdujących się w kolejnych chwilach badania w sektorze. Wartości otrzymywane z MODUŁU II są na bieżąco nanoszone na wykres (powstaje w ten sposób wizualizacja sytuacji panującej w sektorze w okresie badania – narzędzie pracy służby FMP) i równoległe przesyłane do MODUŁU III.

MODUŁ III (odpowiada etapowi 3) odpowiedzialny jest za przygotowanie parametrów umożliwiających dokonanie oceny płynności ruchu lotniczego dla badanego sektora i określonego okresu. Tym ostatnim parametrem jest (przedstawiony na rysunku w postaci grubej czarnej kreski) parametr opisujący stan panujący w sektorze dla określonych odcinków czasu (tu pięciominutowych, ich długość jest dowolna i zależy od potrzeb). Odcinki te częściowo zawierają się w poprzednim i kolejnym odcinku. Takie podejście pozwala na uchwycenie trendu panującego w sektorze.



Rys. 3. Wizualizacja sytuacji panującej w sektorze w okresie badania (na poziomie MODUŁU III)
Fig. 3. Visualisation of situation in sector during research (MODULE III level)

MODUŁ IV (odpowiada etapowi 4) odpowiedzialny jest za przeprowadzenie oceny płynności ruchu lotniczego kontrolowanego w badanym sektorze i okresie. Przeprowadzenie oceny umożliwiają parametry opisujące stan panujący w sektorze dla określonych odcinków czasu (z MODUŁU III).



Rys. 4. Wizualizacja sytuacji panującej w sektorze w okresie badania płynności ruchu lotniczego dla 20-minutowego okresu badania (na poziomie MODUŁU IV)
Fig. 4. Visualisation of situation in sector during research - air traffic smoothness for 20-minute research (MODULE IV level)

5. PODSUMOWANIE

Służba FMP dysponuje obecnie narzędziem szacującym bieżącą i spodziewaną siłę strumieni ruchu lotniczego. Umożliwia jej to na dość elastyczne działania przy konfigurowaniu aktywnych (otwieraniu, zamykaniu) sektorów kontroli ruchu lotniczego w zależności od zaistniałych potrzeb. Opisywana metoda oceny płynności ruchu lotniczego kontrolowanego może stanowić dodatkowe narzędzie usprawniające pracę FMP przez dookreślenie (dokładniejsze rozpoznanie) trendów mających panować w obserwowanej przestrzeni powietrznej. To z kolei powinno umożliwić zwiększenie przepływu strumieni ruchu lotniczego kontrolowanego, zwiększenie możliwości przepustowych sektorów kontroli, bowiem wzrost uporządkowania ruchu lotniczego odpowiada wzrostowi możliwości przepustowych systemów kontroli. To powoduje znaczne zwiększenie elastyczności działania służb odpowiedzialnych za przepływ strumieni ruchu lotniczego i przez to zwiększa możliwości jej działania, czyli w rzeczywistości możliwości przepustowe przestrzeni powietrznej. Umiejętność szacowania bieżącej i przyszłej płynności ruchu lotniczego znacznie usprawnia działanie służby FMP, przez co poprawia się wykorzystanie przestrzeni i personelu.

Wyniki uzyskiwane przy zastosowaniu tej metody wskazują na jej przydatność również przy szacowaniu maksymalnych (nieprzekraczalnych) wartości pojemności sektorów kontroli ruchu lotniczego. Przez to może np. wskazywać, kiedy następuje konieczność rekonfiguracji budowy przestrzeni powietrznej (resektoryzacji, nowej siatki dróg itd.).

Literatura

1. Skorupski J.: Wymiarowanie płynności ruchu lotniczego. Prace Naukowe Politechniki Radomskiej, seria Transport Nr 2 (20), Katowice 2004.
2. IL4444 (2004) – Instrukcja o ruchu lotniczym kontrolowanym, ULC, Warszawa.
3. Dmochowski P. A., Malarski M. (2004) Wyznaczanie dopuszczalnych wielkości ruchu lotniczego [w]: *Badania operacyjne i systemowe 2004. Zastosowania*, Warszawa, s. 329 – 340.
4. ATFCM User Manual, Edition No. 10.0, 25 – Oct – 2004.
5. General & CFMU Systems, Edition No. 8.0, 18 – Mar – 2002.
6. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Wyd. Szumacher, Kielce 1998.
7. Skorupski J.: Traffic safety dimensioning. The Archives of Transport vol. XV, No. 3, Warsaw 2003.