ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 47 Nr kol. 1586

Marek MALARSKI[1]

INŻYNIERIA RUCHU W LOTNICZYM SYSTEMIE TRANSPORTOWYM

Streszczenie. Problemy inżynierii ruchu są częścią zagadnień analizy lotniczego systemu transportowego. W artykule przeanalizowano wybrane zagadnienia: model formalny lotniczego systemu transportowego, identyfikację strumieni ruchu samolotów, problem wyznaczania pojemności sektora kontroli oraz zagadnienie płynności ruchu.

TRAFFIC ENGINEERING IN AIRCRAFT TRANSPORTATION SYSTEM

Summary. Air traffic engineering is a case of analysis of aircraft transportation system. This paper contains descriptions of investigations into the problems: model of aircraft transportation system, air traffic flow parameter identification, problem of determining the sector capacity, air traffic smoothness.

1. WPROWADZENIE

Pojęcie inżynierii ruchu pojawiło się i rozwinęło w Stanach Zjednoczonych AP w pierwszej połowie XX wieku w odniesieniu do ruchu drogowego w zatłoczonych aglomeracjach miejskich. W Polsce dla ruchu drogowego po pionierskich pracach prof. J. Podoskiego po raz pierwszy pojęcie inżynierii ruchu całościowo zdefiniował prof. W. Suchorzewski [7] (1969). Za podsumowanie wiedzy w dyscyplinie naukowej – inżynierii ruchu drogowego w Polsce można uznać pracę zbiorową profesora S. Datki i in. [3]. Dla transportu kolejowego podstawy inżynierii ruchu sformułował prof. J. Woch [10] uogólniając je dla szeroko rozumianych gęstych sieci transportowych [9]. Dla transportu lotniczego w Polsce bardzo długo nie wychodzono poza zastosowanie teorii sterowania optymalnego (w tym sterowania i optymalizacji wielopoziomowej) dla sterowania ruchem obiektów opisanych klasyczną mechaniką (dynamiką) lotu. Przy stosunkowo niewielkiej wielkości ruchu wystarczyło egzekwowanie szczegółowych przepisów ruchu lotniczego przez odpowiednie przeszkolone i wyposażone służby kontroli ruchu. Ogólne zasady kontroli ruchu lotniczego wyrosły z doświadczeń lotnictwa wojskowego szczególnie w okresie II wojny światowej, gdzie głównym celem naziemnej kontroli lotów było zabezpieczenie możliwości bezpiecznego wykonania odpowiednich manewrów poszczególnym statkom powietrznym (samolotom). Dopiero od kilku (kilkunastu) lat praktycy (kontrolerzy) ruchu lotniczego w Polsce zaczynają dostrzegać możliwość praktycznego wykorzystania doświadczeń z badania ruchu dla większych intensywności ruchu. Przełomem było tu włączenie polskiej przestrzeni

[1] Wydział Transportu, Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, telefon +22 660 7339, e-mail mma@it.pw.edu.pl

powietrznej (FIR Warszawa) do europejskiej przestrzeni kontrolowanej i Zarządzanie Przepływem Potoków Ruchu Lotniczego z Centrum ATFM (Air Traffic Flow Management) w Brukseli.

2. LOTNICZY SYSTEM TRANSPORTOWY

Przedmiotem zainteresowania tego artykułu jest transport osób i ładunków z wykorzystaniem przestrzeni powietrznej w sposób charakterystyczny dla współczesnego lotnictwa. Obszar zainteresowania ograniczona wyłącznie do problematyki transportu (przewozu) rozumianego jako **usługa** – produkt sprzedawany przez przedsiębiorstwo nabywcom na rynku usług transportowych. W ten sposób poza obszarem zainteresowania pozostawia się specjalne, pozakomunikacyjne zastosowania lotnictwa, jak na przykład wojskowe, ratownicze, rolnicze.

Zbiór podmiotów oferujących **lotnicze usługi transportowe** na rynku usług transportowych i podlegających pewnym wspólnym regułom (prawnym, handlowym, technicznym) może być traktowany jak system, który można nazwać **lotniczym systemem transportowym** (**LST**) i traktować jako segment rynku usług transportowych. Obszarem działania systemu jest obszar zainteresowań (także w sensie przestrzennym) nabywców i dostawców lotniczych usług transportowych.

3. OPIS FORMALNY MODELU LST

W zależności od obiektu i celu badań zdefiniowany uprzednio LST (lotniczy system transportowy) może obejmować swoim zasięgiem światowy, krajowy lub regionalny system lotnictwa komunikacyjnego lub też wydzielone części systemu – drogę lotniczą, sektor ATC, obszar powietrzny portu lotniczego, sam port lotniczy lub jego fragment. Powyższe wynika z przyjęcia założenia, że wydzielona część systemu (podsystem) zawsze może być traktowana jako system. Kontrola ruchu lotniczego (kontrola operacyjna) w LST integruje problemy planowania (organizowania) ruchu z problemami kierowania ruchem.

Wprowadzimy oznaczenia:

G - graf struktury systemu, $\mathbf{G} = \langle \mathbf{W}, \Lambda \rangle$, gdzie **W** jest zbiorem węzłów, a Λ jest zbiorem łuków opisującym związki pomiędzy węzłami w notacji Berge'a,

$\mathbf{F_w}$ - zbiór funkcji określonych na zbiorze **W** i przyjmujących wartości w zbiorze liczb rzeczywistych **R**, $f(i)\colon \mathbf{W} \rightarrow \mathbf{R}$, przy $f(i) \in \mathbf{F_w}$ oraz $i \in \mathbf{W}$,

$\mathbf{F}_\Lambda$ - zbiór funkcji określonych na zbiorze Λ i przyjmujących wartości w zbiorze liczb rzeczywistych **R**, $f(i, j)\colon \Lambda \rightarrow \mathbf{R}$, przy $f(i, j) \in \mathbf{F}_\Lambda$ oraz $\langle i, j \rangle \in \Lambda$.

Korzystając z tych oznaczeń możemy zapisać model LST w postaci:

$$\langle \mathbf{G}, \mathbf{F_w}, \mathbf{F}_\Lambda \rangle \tag{1}$$

Dla różnych celów badań w modelu odwzorowywane mogą być w różnym zakresie jego elementy i ich własności (atrybuty). Dla modeli LST charakterystyczne są następujące wybory:

- $\mathbf{I_T}$ - infrastruktura techniczna LST, $\mathbf{I_T} = \{ < o^i, A^i_o > \}$, gdzie o^i – i-ty obiekt techniczny LST (rozmieszczony geograficznie) - lotniska, samoloty, pomoce nawigacyjne ... , A^i_o - zbiór atrybutów opisujących i-ty obiekt,
- jednocześnie $\mathbf{I_T} = \{ \mathbf{I_S}, \mathbf{I_Z} \}$, gdzie $\mathbf{I_S}$ zbiór obiektów technicznych o charakterze stałym, a $\mathbf{I_Z}$ zbiór obiektów - samolotów - tworzących strumień ruchu,
- $\mathbf{I_S} = \{ \mathbf{L}, \mathbf{DL}, \mathbf{R_{naw}} \}$, gdzie **L** - zbiór lotnisk komunikacyjnych, **DL** - zbiór dróg lotniczych powiązanych geograficznie, $\mathbf{R_{naw}}$ - zbiór pomocy nawigacyjnych,
- $\mathbf{I_D}$ - infrastruktura decyzyjna LST, $\mathbf{I_D} = \{ < D^j, A^j_D > \}$, gdzie D^j - j-ty decydent (rozmieszczone terytorialnie stanowisko ATC), A^j_D - zbiór atrybutów opisujących j-tego decydenta,
- zbiór decydentów $\mathbf{D} \subset \mathbf{I_D}$, $\mathbf{D} = \{ \mathbf{D_{TWR}}, \mathbf{D_{TMA\text{-}CTR}}, \mathbf{D_{ACC}}, \mathbf{D_{FM}}, \mathbf{D_{\Rightarrow}} \}$, gdzie $\mathbf{D_{TWR}}$ - zbiór stanowisk kontroli lotnisk, $\mathbf{D_{TMA\text{-}CTR}}$ - zbiór stanowisk kontroli zbliżania, $\mathbf{D_{ACC}}$ - zbiór stanowisk kontroli obszaru, $\mathbf{D_{FM}}$ - nadrzędne stanowisko ATFM, $\mathbf{D_{\Rightarrow}}$ - zbiór innych stanowisk decyzyjnych nie mających bezpośredniego wpływu na ruch lotniczy, np. komórka planowania, briefing, inne,
- **I** - infrastruktura LST, $\mathbf{I} = \{ \mathbf{I_T}, \mathbf{I_D} \}$.

Opis dynamicznych własności LST ma postać procesu. Charakterystyczne dla LST są następujące procesy traktowane jako podprocesy ogólnego procesu systemowego:

- $\mathbf{P_W}$ - zbiór procesów zachodzących wewnątrz LST,
- $\mathbf{P_Z}$ - zbiór procesów zachodzących w systemie gospodarczym kraju wraz z istniejącymi między nimi powiązaniami, które wymuszają działanie LST lub odwrotnie,
- $\mathbf{P_W} = \{ \mathbf{P^d_W}, \mathbf{P^{rl}_W} \}$, gdzie $\mathbf{P^d_W}$ - zbiór procesów decyzyjnych, określonych przez ograniczenia narzucone przez otoczenie ekonomiczno–polityczno–wojskowe i jego zapotrzebowania oraz ograniczenia techniczne, ekonomiczne i organizacyjne, $\mathbf{P^{rl}_W}$ - zbiór procesów ruchu lotniczego,
- $\mathbf{P^d_W} = \{ \mathbf{U}, \mathbf{U_N} \}$, gdzie **U** - zbiór procesów decyzyjnych celowych (wraz z istniejącymi między nimi powiązaniami), $\mathbf{U_N}$ - zbiór decyzji nie związanych bezpośrednio z przelotami samolotów.

Te zbiory procesów decyzyjnych przedstawimy bardziej szczegółowo

$$\mathbf{U} = \{ \mathbf{U_{FM}} \{ \mathbf{U_{ACC}} \{ \mathbf{U_{TMA\text{-}CTR}}, \mathbf{U_{TWR}} \} \} \} \tag{2}$$

gdzie:

- $\mathbf{U_{TWR}}$ - zbiór procesów decyzyjnych kontroli TWR lotniska,
- $\mathbf{U_{TMA\text{-}CTR}}$ - zbiór procesów decyzyjnych kontroli TMA-CTR zbliżania,
- $\mathbf{U_{ACC}}$ - zbiór procesów decyzyjnych kontroli ACC obszaru,
- $\mathbf{U_{FM}}$ - zbiór procesów decyzyjnych zarządzania ATFM przelotem samolotów,
- $\mathbf{U_N}$ - zbiór decyzji nie związanych bezpośrednio z przelotem samolotu.

$$\mathbf{U_N} = \{ U^{I\sim}_N, U^{I\Downarrow}_N, U^{Pwe}_N, U^{Sz}_N, U^{M}_N, U^{PI}_N, U^{0}_N \} \tag{3}$$

gdzie:

- $U^{I\sim}_N$ - procesy decyzyjne związane ze zmianą infrastruktury technicznej,
- $U^{I\Downarrow}_N$ - procesy decyzyjne wynikające z zawodności sprzętu,
- U^{Pwe}_N - procesy decyzyjne wynikające ze zmiany zapotrzebowań na przelot,
- U^{Sz}_N - procesy decyzyjne wynikające ze szkolenia personelu ATC (kontrolerów),
- U^{M}_N - procesy decyzyjne związane z różnego rodzaju uzgodnieniami,
- U^{PI}_N - procesy planowania ruchu lotniczego,
- U^{0}_N - inne, nie wyróżnione procesy decyzyjne.

W zbiorze procesów ruchu lotniczego P^{rl}_W zachodzących w sferze technologicznej LST wyróżnimy następujące podzbiory:

- P^T_W - zbiór procesów przelotu samolotu wraz ze startem i lądowaniem

$$P^T_W = \{ P^p_W, P^c_W, P^m_W \} \tag{4}$$

gdzie: P^p_W - procesy przelotów pasażerskich, P^c_W - procesy przelotów cargo i poczty, P^m_W - inne przeloty, np. wojskowe.

- P^{nT}_W - procesy nietransportowe zachodzące wewnątrz LST, które wywołują zmiany stanu systemu, ale nie są procesami przelotu samolotu

$$P^{nT}_W = \{ P^{o=}_W, P^{o\sim}_W, P^{o\Rightarrow}_W \} \tag{5}$$

gdzie: $P^{o=}_W$ - procesy rekonstrukcji elementów stałych i wyposażenia, $P^{o\sim}_W$ - procesy okresowych przeglądów, napraw i konserwacji samolotów, $P^{o\Rightarrow}_W$ - procesy modernizacji I_T.

Lotniczy system transportowy LST można przedstawić również w dekompozycji na podsystem decyzyjny S^d_{LK} i podsystem technologiczny S^t_{LK}

$$LST = < S^d_{LK}, S^t_{LK} > \tag{6}$$

Istotną częścią systemu LST jest podsystem ruchu lotniczego S_{RL}, który także można przedstawić w dekompozycji na podsystem decyzyjny S^d_{RL} i podsystem technologiczny S^t_{RL}

$$S_{RL} = < S^d_{RL}, S^t_{RL} > \tag{7}$$

Problemy badawcze w sferze S^d_{LK}:

- określenie metod i wskaźników oceny pracy S^d_{LK} i S^d_{RL},
- analiza struktury decyzyjnej I_D - określenie najlepszej przy danych P_{WE} (zadaniach, kosztach mikro, makro),
- analiza wewnętrznych procesów decyzyjnych P^d_W i określenie wymaganego stopnia automatyzacji przy danym P_Z.

Problemy badawcze w sferze StLK:

- określenie właściwych kryteriów oceny S^t_{LK},
- określenie najlepszej I_T ze względu na efektywność, ekonomikę, niezawodność i bezpieczeństwo,
- analiza procesów ruchu lotniczego P^t_W pod kątem ATFM, planowania bieżącego, doboru I_D przy ustalonych I_T i P_{WE},
- analiza stabilności S^t_{LK} i S^t_{RL} w zależności od P_Z,
- dobór właściwych technik badawczych dla analizy S^t_{LK} (modelowanie, badanie analityczne, wnioskowanie statystyczne).

Problemy badawcze w sferze LST:

- prognozowanie zapotrzebowań P_{WE},
- prognozowanie wielkości ruchu lotniczego S_{RL} w skali mikro i makro.

Problemy badawcze w sferze SRL :

- określenie wielkości charakteryzujących S_{RL} (wskaźniki, korelacje, ...); praktyczna weryfikacja wskaźników - pomiary rzeczywiste i modelowe,
- dobór metod prognozowania ruchu lotniczego P^t_W na trasach i w skali makro,
- określenie zasad projektowania i modernizacji systemów ATC,
- określenie podstawowych praw (zasad) inżynierii ruchu lotniczego,

- opracowanie metod określania prawidłowej $\mathbf{I_T}$ dla ustalonego $\mathbf{P_z}$:
  - lotniska: wybór dróg kołowania, miejsc postojowych,
  - CTA: wybór tras, rozmieszczenie pomocy radionawigacyjnych,
- opracowanie metod określania prawidłowej $\mathbf{I_D}$ dla ustalonych $\mathbf{P_z}$,
- opracowanie metod doboru podziału $\mathbf{I_D}$ na strefy $\mathbf{D}$
  $\mathbf{D} = \{ \mathbf{D_{TWR}}, \mathbf{D_{TMA\text{-}CTR}}, \mathbf{D_{ACC}}, \mathbf{D_{FM}}, \mathbf{D_{\Rightarrow}} \}$ (prawidłowe rozmieszczenie służb ATC),
- psychofizyczne uwarunkowania pracy człowieka w $\mathbf{P^d_W}$,
- opracowanie prawidłowych przepisów i instrukcji w $\mathbf{P^d_W}$ (ATC),
- dobór parametrów $\mathbf{P^{nT}_W}$ (np. łączność),
- określenie poziomu automatyzacji $\mathbf{P^d_W}$ dla ustalonego $\mathbf{P_z}$,
- opracowanie metod planowania ruchu lotniczego w $\mathbf{S_{RL}}$ i systemu przetwarzania planów lotów, a w tym:
  - predykcja konfliktów,
  - planowanie lotów uwzględniające $\mathbf{P^d_W}$,
- opracowanie metod analizy i oceny wybranych podsystemów $\mathbf{P^d_W}$, w tym opracowanie metod analizy i oceny stanowisk ATC,
- określenie zasad modelowania $\mathbf{S_{RL}}$,
- dobór struktury funkcjonalnej $\mathbf{P^d_W}$ w zależności od $\mathbf{I_D}$,
- opracowanie systemu przetwarzania informacji $< \mathbf{I_T}, \mathbf{I_D} >$ w $\mathbf{S_{RL}}$,
- analiza stabilności $\mathbf{S_{RL}}$ w zależności od $\mathbf{P_z}$.

Podział na $\mathbf{S^d_{LK}}$ i $\mathbf{S^t_{LK}}$ ma znaczenie wyłącznie metodologiczne, podobnie jak $\mathbf{S^d_{RL}}$ i $\mathbf{S^t_{RL}}$. Wzajemnie uwikłane powiązanie obu podsystemów $\mathbf{S^d_{LK}}$ i $\mathbf{S^t_{LK}}$ implikuje konieczność łącznej (lub przynajmniej mieszanej) analizy zagadnień z tego zakresu. Różnorodność problemów badawczych w LST praktycznie wyklucza możliwość stworzenia uniwersalnej metodologii badawczej. Każde zadanie badawcze wymaga opracowania odpowiednich metod badawczych indywidualnie. Wszystkie tu wymienione zagadnienia tworzą razem inżynierię ruchu lotniczego.

4. INŻYNIERIA RUCHU LOTNICZEGO

Nie siląc się na niepotrzebną oryginalność, inżynierię ruchu lotniczego można zdefiniować przez analogię do definicji przyjętej dla ruchu drogowego na konferencji Komitetu Transportu PAN i SITkom we Wrocławiu w 1987. Inżynieria ruchu lotniczego jest więc dziedziną inżynierii (dyscypliną naukową) zajmującą się badaniami procesów ruchu lotniczego i praktycznym zastosowaniem wiedzy o ruchu w planowaniu, projektowaniu, realizacji i eksploatacji systemów transportu lotniczego oraz urządzeń i systemów organizacji i sterowania ruchem lotniczym (kontroli ruchu lotniczego). Podstawowym celem inżynierii ruchu lotniczego jest zapewnienie bezpiecznego, sprawnego i ekonomicznego przemieszczania osób i towarów (cargo) przy bezwzględnym zapewnieniu bezpieczeństwa ruchu i ograniczeniu ujemnego wpływu transportu lotniczego na środowisko.

Istotą inżynierii ruchu jest podejście systemowe uwzględniające, że w ruchu lotniczym współdziałają ludzie: piloci i kontrolerzy ruchu, urządzenia: samoloty (statki powietrzne) oraz naziemne i pokładowe urządzenia i systemy nawigacyjne, infrastruktura lotnicza: sieć lotnisk i dróg lotniczych wraz odpowiednia organizacją obszarów kontrolowanych lotnisk (rejon startu i podejście do lądowania). Podkreślić należy, że inżynieria ruchu jest nauką empiryczną. Wszystkie prawa, zasady i metody formułowane są na podstawie wyników obserwacji ruchu, szczególnie dla ekstremalnych wielkości ruchu w rejonie lotniska

(w przypadku Polski – lotniska Okęcie). Dalej przedstawione zostaną trzy wybrane przykłady zadań inżynierii ruchu lotniczego analizowane przez autora. Więcej przykładów podanych jest w [5].

5. IDENTYFIKACJA STRUMIENI RUCHU SAMOLOTÓW

Identyfikację strumieni ruchu przeprowadzono poprzez weryfikację hipotez dotyczących rozkładów. Ponieważ dla strumieni ruchu nie są znane zarówno rozkłady, jak i ich parametry, przyjęto metodę estymacji nieznanych parametrów. Dla rozkładów: normalnego, logarytmo - normalnego, Poissona, wykładniczego, Raileigha, Maxwella, Weibulla i gamma przyjęto metodę największej wiarygodności. Dodatkowo dla rozkładu gamma do estymacji parametrów k i λ zastosowano metodę momentów. Dla realizacji zadania identyfikacji strumieni zgłoszeń do systemu ATC uruchomiono zestaw programów przetwarzających dane zebrane w Agencji Ruchu Lotniczego na lotnisku Okęcie. W wyniku otrzymano histogramy, dystrybuanty oraz estymatory parametrów rozkładu empirycznego metodą największej wiarygodności (jako parametry zadanego rozkładu teoretycznego). Dla zidentyfikowanych rozkładów teoretycznych wyznaczono ich histogramy i dystrybuanty, a następnie dystrybuanty te wykorzystano do testowania modeli ruchu lotniczego.

Tablica 1

Przykładowe wyniki testów czasów zgłoszeń do kontroli samolotów w sektorze

	Rozkłady				
	Logarytmo-normalny	Poissona	wykładniczy	Weibulla	gamma
Lp=295 E(x)=1.432 V(x)=4.193	T (α=0.999) Ex_{ln}= 0.0137 Vx_{ln}= 0.5484	T (α=0.1) λ=0.932	T (α=0.1) λ=0.698	T (α=0.05) *alfa*=1.102 *beta*= 0.639	T (α=0.1) k = 1.593 λ = 1.112

Oznaczenia:
T – zgodność co najmniej na poziomie istotności α =0.05 (α= – wartość max poziomu istotności, na którym uzyskano zgodność rozkładów),
Lp – liczność próbki,
E(x) – wartość średnia z próbki,
V(x) – wariancja z próbki,
Ex_{ln}, Vx_{ln}, k, λ, *alfa*, *beta* – wartości parametrów odpowiednich rozkładów.

Wyniki dla rozkładów normalnego, Raileigha i Maxwella pominięto ze względu na uzyskane wyniki: brak zgodności na poziomie istotności α =0.05. Do identyfikacji rozkładu empirycznego wykładniczego wykorzystano test zgodności χ^2 Pearsona. Dla potrzeb zastosowanego do badania zgodności testu Kołmogorowa-Smirnowa zebrane dane pogrupowano w przedziały o szerokości 5 min.

Z analizy wyników stwierdzono, że następstwo czasów w strumieniu ruchu w TMA Warszawa najlepiej opisuje rozkład logarytmo-normalny. O dużej zgodności rozkładów empirycznych i teoretycznych najlepiej świadczy fakt, że nawet dla poziomu ufności 1-α = 0.1 (a w niektórych przypadkach dla 1- α = 0.001) nie istniały podstawy do odrzucenia hipotezy o rozkładzie logarytmo - normalnym. Względnie dobrze można aproksymować rozkłady empiryczne za pomocą rozkładów gamma (średnio α =0.1) i wykładniczego (średnio α =0.05). Zestawienie wyników testu przedstawiono w tabl.1. Jako najmniejszy możliwy przyjęto poziom istotności α=0.05.

6. KONTROLA RUCHU LOTNICZEGO – POJEMNOŚĆ SEKTORA KONTROLI

Elementarną realizacją procesu ruchu lotniczego jest przelot samolotu przez sektor ATC, który inicjuje ciąg zgłoszeń do kontrolera sektora ATC. Każde zgłoszenie wymaga czasu niezbędnego na jego obsługę i absorbuje kontrolera przez określony czas. Wielkością charakteryzującą obciążenie pracą kontrolera jest łączny czas obsługi wszystkich zgłoszeń występujących w ciągu jednej godziny. Istnieje zależność stochastyczna pomiędzy natężeniem ruchu lotniczego a obciążeniem pracą kontrolera sektora ATC. Dla ruchu o określonym natężeniu czas obsługi jest wielkością losową, zależną od złożoności sytuacji ruchowej. Struktura przepływu strumieni samolotów, zakłócenia zewnętrzne mają decydujący wpływ na możliwości występowania sytuacji konfliktowych, których rozwiązanie wymaga nakładu dodatkowego czasu pracy kontrolera.

Praktyka pracy kontrolera ruchu lotniczego dopuszcza chwilowe przeciążenie pracą bez ujemnego wpływu na efektywność pracy i bezpieczeństwo ruchu. Dla bezpieczeństwa ruchu lotniczego niebezpieczne są sytuacje długotrwałego przeciążenia pracą, czemu w przybliżeniu odpowiada przekroczenie odpowiedniej granicy godzinnego obciążenia pracą kontrolera sektora ATC.

Zależność obciążenia pracą kontrolera ruchu lotniczego od natężenia ruchu w sektorze można analizować poprzez odpowiednie rozkłady brzegowe dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T). Prowadzi to do definicji pojemności sektora kontroli jako odpowiedniego kwantyla rozkładu brzegowego. Uwzględniając zależność obciążenia pracą kontrolera od natężenia ruchu lotniczego w sektorze ATC, można określić pewne graniczne wartości natężenia x_p i obciążenia t_p, dla których prawdopodobieństwo realizacji dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T) poza obszarem określonym przez (x_p, t_p) będzie niewiększe od ustalonej wartości p_{XT}

$$p_{XT} = F_{XT}(x_p, t_p) \tag{8}$$

gdzie: F_{XT} - dystrybuanta dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T).

Par (x_p, t_p) spełniających powyższy warunek może być wiele, a więc wyznaczenie (x_p, t_p) nie jest jednoznaczne. Dlatego też w praktyce bardziej użyteczne okazuje się określenie x_p i t_p jako parametrów pozycyjnych odpowiednich rozkładów brzegowych zmiennej losowej X i zmiennej losowej T w rozkładzie dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T).

Niech x_p będzie kwantylem rzędu p_X, a t_p będzie kwantylem rzędu p_T, tzn. ze względu na założony skokowy typ zmiennej losowej X:

$$\{ x_p : [p(X \le x_p) \ge p_X] \wedge [p(X \ge x_p) \ge 1 - p_X]\} \tag{9}$$

$$\{ t_p : F_T(t_p) = p_T \} \tag{10}$$

Wyznaczona wartość kwantyla x_p określa pojemność sektora ATC, którą można zdefiniować następująco: „pojemność sektora ATC przy danej organizacji systemu jest kwantylem x_p rzędu p_X rozkładu liczby samolotów przebywających w sektorze ATC w czasie jednej godziny (kwantylem natężenia ruchu), które mogą być obsłużone przez system ATC przy danym dopuszczalnym obciążeniu kontrolera ruchu, mierzonym kwantylem t_p rzędu p_T rozkładu obciążenia" [5].

Do określenia wartości obciążenia pracą kontrolera sektora ATC konieczne jest zdefiniowanie elementarnej jednostki miary. Zdefiniowana jest ona przez średnią ilość pracy kontrolera niezbędną do kontroli lotu standardowego samolotu (planowego rejsowego)

przelatującego przez sektor ATC. Za lot samolotu standardowego przyjęto przelot samolotu przez sektor ATC bez zmiany wysokości i odchyleń od założonej trasy. Każda dodatkowa zmiana warunków lotu lub każda interwencja kontrolera spowodowana sytuacją w ruchu, wymaga dodatkowej kontroli (odpowiednio wyliczonej zwiększonej pracy).

Wartość granicznego obciążenia pracą kontrolera ruchu t_P nie jest w dostępnej literaturze światowej jednoznacznie ustalona, można ją jedynie szacować na podstawie eksperymentów dla empirycznie ustalonego natężenia ruchu lotniczego. Przy zadanych charakterystykach systemu ATC można metodą symulacji komputerowej uzyskać próbkę statystyczną o wystarczającej liczności par (X,T). Z próbki tej można estymować kwantyle rozkładów brzegowych X oraz T.

W trakcie pomiarów rzeczywistego ruchu lotniczego w FIR Warszawa rejestrowano liczby samolotów przebywających w każdym sektorze na początku każdego przedziału Δt_M = 2 min. Na ich podstawie wyznaczano średnią liczbę samolotów przebywających w sektorze ATC w i-tym przedziale czasu Δt_M:

$$n_i = NINT\left[\frac{n_i' + n_i''}{2.0} + 0.1\right] \tag{11}$$

gdzie: n_i' , n_i'' - liczby samolotów na początku i końcu i-tego przedziału czasu.

Metoda wyznaczania pojemności sektora poprzez kwantyle rozkładów brzegowych wynika z założenia o dyskretności zmiennej losowej X - natężenia ruchu lotniczego. W prostych przypadkach jest tak istotnie, natężenie ruchu lotniczego jest całkowitą liczbą samolotów przebywających w sektorze ATC w czasie jednej godziny. W praktyce samoloty przelatują pomiędzy sektorami, startują lub lądują w sektorze, zmieniają podporządkowanie organowi kontroli (np. ACC $\Rightarrow$ APP). W ogólnym przypadku można więc w analizie przyjąć, że obie zmienne losowe rozkładu dwuwymiarowego: T - obciążenie pracą i X - natężenie ruchu lotniczego są zmiennymi losowymi typu ciągłego. Pomiary parametrów rzeczywistego ruchu lotniczego i eksperymenty numeryczne na modelu wykazały, że rozkłady brzegowe obu zmiennych losowych wykazują dużą zgodność z rozkładami normalnymi. Można więc przyjąć, że otrzymana łączna zmienna losowa ma rozkład dwuwymiarowy normalny. Jej gęstość określona jest wzorem:

$$f(x,t) = \frac{1}{2\pi\,\delta_x\delta_t\sqrt{1-\rho^2}}\, e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left\{\frac{(x-m_X)^2}{\delta_X^2} - 2\frac{\rho(x-m_X)(t-m_t)}{\delta_X\delta_t} + \frac{(t-m_t)^2}{\delta_t^2}\right\}} \tag{12}$$

gdzie: m_x, m_t - wartości przeciętne rozkładów brzegowych odpowiednio natężenia ruchu lotniczego i obciążenia pracą kontrolera,

δ_x , δ_t - odchylenia standardowe tych rozkładów brzegowych,

ρ - współczynnik korelacji zmiennych losowych natężenia ruch i obciążenia pracą.

Dysponując próbką dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T) o odpowiedniej liczności możemy wszystkie te jej parametry wyznaczyć jedną ze standardowych metod wyznaczania parametrów rozkładów brzegowych.

Wiemy, że gęstość warunkowa zmiennej losowej t przy założeniu X = x

$$f(t \mid x) = \frac{f(x,t)}{f_1(x)} \tag{13}$$

gdzie: $f_1(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t)dt$ - brzegowa funkcja gęstości.

Więc gęstość warunkowa zmiennej losowej obciążenia pracą kontrolera przy danej realizacji natężenia ruchu lotniczego (warunek X=x) wyraża się zależnością:

$$f(t \mid x) = \frac{1}{\delta_t \sqrt{2\pi(1-\rho^2)}} e^{-\frac{1}{2\delta_t^2(1-\rho^2)}\left\{t-\left(m_t+\frac{\rho\delta_t}{\delta_x}(x-m_x)\right)\right\}^2} \tag{14}$$

Oznaczając przez $m(x)$ warunkową wartość oczekiwaną obciążenia pracą (zmienna losowa T) przy danej realizacji ruchu lotniczego (warunek X = x), oraz analogicznie przez $\delta(x)$ - warunkowe odchylenie standardowe zmiennej losowej T przy warunku X = x, otrzymujemy:

$$m(x) = m_t + \frac{\rho\delta_t}{\delta_x}(x - m_x) \tag{15}$$

$$\delta(x) = \delta_t\sqrt{(1-\rho^2)} \tag{16}$$

Zależność $m(x)$ jest równaniem krzywej regresji typu pierwszego obciążenia pracą kontrolera względem natężenia ruchu lotniczego. Dysponujemy więc bezpośrednią zależnością liniową pomiędzy natężeniem ruchu lotniczego (x) a obciążeniem pracą kontrolera ruchu E(t). Pozwala to zdefiniować pojemność sektora ATC bezpośrednio od granicznego obciążenia pracą kontrolera (np. t_P = 80%).

Metodę tą przetestowano dla rzeczywistego ruchu lotniczego w FIR Warszawa analizując rozkłady parametrów charakteryzujących strukturę przepływu strumieni samolotów. Przyjmując te dane wygenerowano plan lotów i symulowano ruch dla przyjętej intensywności 285 samolotów w FIR w ciągu doby. Weryfikację zależności przeprowadzono dla: odcinka drogi lotniczej B-20, przelotu nad punktem kontrolnym GRU. Dla tych punktów zidentyfikowano rzeczywiste charakterystyki na bazie pomiarów ruchu lotniczego wykonanych dla 5 kolejnych poniedziałków czerwca 1999. W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano informacje o doświadczalnie wyznaczonych pojemnościach w aktualnie funkcjonujących w FIR Warszawa sektorach. Z pomiarów zidentyfikowano parametry rozkładu dwuwymiarowego m_t, m_x, δ_t, δ_x, a z analizy zmiennych losowych (X, T) zidentyfikowano krzywą regresji – prawie idealną prostą odpowiadającą równaniu prostej (15).

Sprawdzając praktyczną użyteczność wyznaczonej zależności obciążenia pracą i natężenia ruchu lotniczego, przeprowadzono iteracyjną serię eksperymentów symulacyjnych, badających wpływ zmian intensywności ruchu na obciążenie pracą kontrolera. Przy natężeniu 295 samolotów na dobę stwierdzono zgodność obciążenia pracą kontrolera sektora SUW z przyjętym obciążeniem porównawczym t_P = 80% +2%. Z gęstości warunkowej wyznaczono wartość x_P = 27 sam/h (pojemność sektora SUW).

Nie jest to oczywiście jedyne podejście do wyznaczania pojemności sektora kontroli ruchu lotniczego. Inne podane są m.in. w [5], [6].

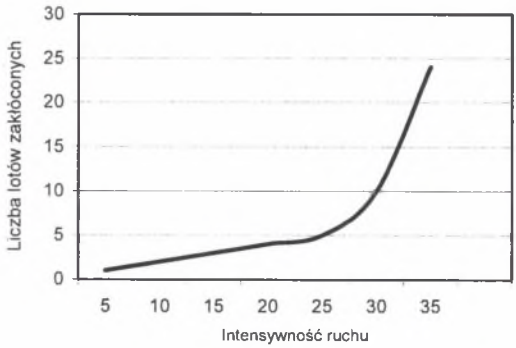
7. PŁYNNOŚĆ RUCHU A POJEMNOŚĆ SEKTORA

Pojęcie płynności ruchu jako miernika oceny jakości ruchu sformułował werbalnie prof. J. Węgierski [8]. Sformalizowane ujęcie związków pomiędzy płynnością i intensywnością ruchu przedstawił prof. J. Woch [9] początkowo dla ruchu kolejowego, a następnie w dalszych latach dla ogólnie traktowanego potoku ruchu.

Bezpośrednie przeniesienie do lotnictwa definicji ruchu płynnego nie jest możliwe. Wynika to ze specyfiki ruchu lotniczego, gdzie nie jest możliwe np. zatrzymanie statku powietrznego będącego w powietrzu. Także występująca w ruchu np. drogowym odległość między pojazdami, która może ulegać zmianom wraz ze zmianami średniej prędkości poruszania się pojazdów, w ruchu lotniczym jest ściśle określona przepisami i nie może być mniejsza niż tzw. separacja minimalna $\mathbf{d_{min}}$ [1], [2].

Jako miarę płynności ruchu lotniczego przyjęto stosunek liczby lotów zakłóconych $\mathbf{L_Z}$ do liczby lotów ogółem **L**. Jako lot zakłócony przyjęto lot samolotu, któremu zmieniono parametry (wysokość, prędkość, czas minięcia punktu kontrolnego itp.) ze względu na konieczność zachowania wymogów separacji określonych przepisami ruchu lotniczego, lub koniecznością ominięcia niebezpiecznych stref np. obszarów burzowych.

Zależność między liczbą lotów zakłóconych a liczbą lotów ogółem została zbadana empirycznie w okresie pierwszego półrocza 2002 roku w obszarze TMA Warszawa (rys.1).

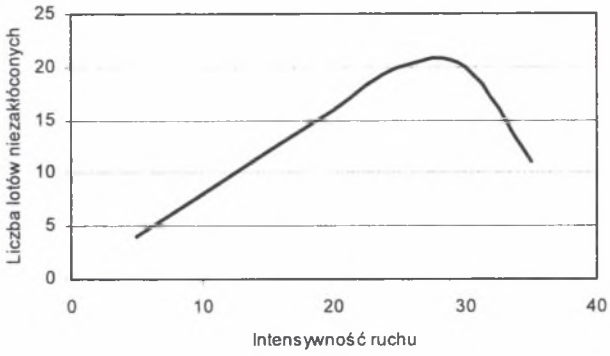


Rys. 1. Zależność między liczbą lotów zakłóconych a intensywnością ruchu
Fig. 1. Relation between the number of disturbed flights and the traffic intensity

Zależność ta wskazuje, iż przy niewielkiej intensywności ruchu liczba lotów zakłóconych jest proporcjonalna do liczby lotów i jest ogólnie niewielka. Przy wzroście natężenia ruchu liczba lotów zakłóconych znacząco wzrasta. Można teraz dokonać pewnej modyfikacji powyższego wykresu, to znaczy przedstawić zależność między liczbą lotów niezakłóconych (przebiegających płynnie) a liczbą lotów ogółem (rys.2).

Jak widać, zależność ta charakteryzuje się występowaniem jednego maksimum (LP_{max}). Nasuwa się tu bardzo wyraźna analogia ze znanym wykresem oczekiwanej płynności ruchu w funkcji gęstości ruchu wyprowadzonym teoretycznie [9]. Analogia ta nie jest jednak

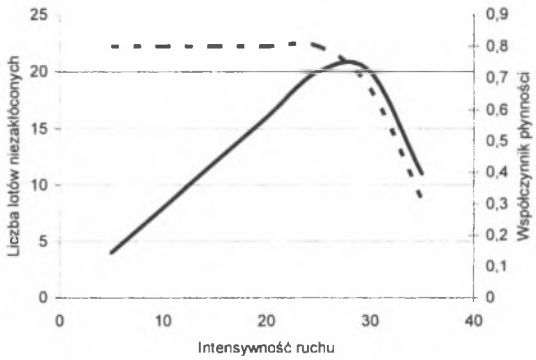
pełna również ze względu na inne charakterystyki występujących w ruchu lotniczym rozkładów. Zidentyfikowana zależność empiryczna pokazuje, iż być może istnieje optymalna intensywność ruchu, dla której liczba lotów płynnych jest maksymalna, co pozwalałoby określać m.in. pojemność analizowanego sektora kontroli. Należy jednak prowadzić dalsze badania ruchu. Liczność próbki pomiarowej dla bardzo dużych natężeń ruchu jest niewielka. Ze względu na ograniczenia nakładane przez służby ATFM na wielkość ruchu w sektorze, pozyskanie większej próbki jest bardzo utrudnione. Pomocne mogą tu być badania symulacyjne przy wykorzystaniu odpowiednich modeli ruchu.



Rys. 2. Zależność między liczbą lotów niezakłóconych a intensywnością ruchu
Fig. 2. Relation between the number of undisturbed flights and the traffic intensity

Analizując dalej liczbę lotów płynnych można ją odnieść do liczby lotów ogółem. Otrzymuje się wówczas współczynnik płynności ruchu lotniczego *WP*:

$$WP = \frac{L - L_Z}{L} \tag{17}$$



Rys. 3. Optymalna intensywność ruchu
Fig. 3. Optimum traffic intensity

Współczynnik płynności ruchu (rys.3 - krzywa przerywana) wskazuje, że dla pewnego zakresu intensywności ruchu, ruch ten jest płynny i charakteryzuje się w miarę stałą wartością zakłóceń. Po przekroczeniu pewnej wartości granicznej (X_b) następuje gwałtowne obniżenie płynności. Nałożenie wykresów współczynnika płynności ruchu oraz liczby lotów niezakłóconych pokazuje, iż wartość graniczna X_b jest bliska wartości LP_{max}. W przedstawionym przykładzie wynosi ona około 22 samolotów na godzinę. Współczynnik płynności ruchu może więc stanowić także podstawę do wymiarowania istotnych parametrów ruchu.

Literatura

1. Instrukcja o ruchu lotniczym kontrolowanym IL-4444, Ministerstwo Transportu, Żeglugi i Łączności, GILC, Warszawa 1989.
2. Szczegółowe przepisy ruchu lotniczego cywilnych statków powietrznych: Zasady ruchu lotniczego (PL-2), Służby ruchu lotniczego (PL-11), Ministerstwo Komunikacji, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 1980.
3. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa 1989 (wydanie 2 – 1997).
4. Heideman D.: A queueing theory approach to speed-flow-density relationships, [w:] Transportation and Traffic Theory, Pergamon 1996.
5. Malarski M.: Modelowanie procesów ruchu lotniczego dla kontroli i planowania lotów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, Transport, Warszawa 2002.
6. Malarski M., Skorupski J.: Problem prognozowania pojemności lotniska a bezpieczeństwo ruchu lotniczego. KONBIN '99, Zakopane 1999.
7. Suchorzewski W.: Wybrane zagadnienia inżynierii ruchu. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1969 (i wydania następne).
8. Węgierski J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. WKiŁ, Warszawa 1971.
9. Woch J.: Kształtowanie płynności ruchu w gęstych sieciach transportowych. Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1998.
10. Woch J.: Podstawy inżynierii ruchu kolejowego. WKŁ, Warszawa 1983.

Abstract

In the paper some problems of air traffic engineering are presented. Air traffic takes place in suitably organized airspace (FIR) in keeping with precise rules and is subject to air traffic control (ATC). Air traffic is a case of aircraft transportation system. Air traffic in FIR is initially planned and coordinated. The air traffic control services watch out for the safety of this traffic and to take measures to eliminate collision hazards. Air traffic is a large dynamic and complex hierarchical system. Traffic control processes are of a discrete nature. They are carried out by the ATC services. The main problem they encounter is aircraft congestion in the airspace. This paper contains descriptions of investigations into the problems: model of aircraft transportation system, air traffic flow parameter identification, problem of determining the sector capacity, air traffic smoothness.