

Sylwester Gładys, Marek Malarski, Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska

ANALIZA OBciążENIA PRACĄ KONTROLERA W ZALEŻNOŚCI OD NATĘŻENIA RUCHU LOTNICZEGO

ANALYSIS OF CONTROLLER WORKLOAD RELATED TO AIR TRAFFIC DENSITY

АНАЛИЗ РАБОЧЕЙ НАГРУЗКИ ДИСПЕТЧЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ АВИАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę zależności obciążenia pracą kontrolera ruchu T od natężenia ruchu lotniczego X . Zależność tę można analizować poprzez odpowiednie rozkłady brzegowe. Prowadzi to do definicji pojemności sektora kontroli jako odpowiedniego kwantyla rozkładu brzegowego dwuwymiarowej zmiennej losowej.

Można także traktować zmiennosowe X i T łącznie. Udowodniono, że zmienna losowa (X, T) ma rozkład dwuwymiarowy normalny.

Summary: In this paper analysis of a controller workload T related to air traffic density X is presented. This relation may be analysed using appropriate edge distributions. This leads to a definition of air traffic sector capacity as a quantile of edge distribution of two-dimensional random variable.

Резюме: В статье представлен анализ зависимости рабочей нагрузки диспетчера движения T от интенсивности движения X . Эту зависимость можно анализировать используя соответствующие краевые распределения. Это ведет к определению объема сектора контроля как соответствующего квантиля краевого распределения двумерной случайной величины. Можно также подходить к случайным величинам X и T совместно. Показано, что случайная величина (X, T) имеет двумерное нормальное распределение.

1. Wstęp

Problem badania zależności obciążenia pracą kontrolera i natężenia ruchu lotniczego pojawił się wraz z podjęciem badań nad analizą systemów sterowania ruchem lotniczym pod kątem projektowania nowych i modernizacji istniejących systemów sterowania ruchem lotniczym - systemów ATC. Wiąże się to ściśle z zagadnieniem wyznaczania pojemności projektowanych sektorów ATC.

Wielkością charakteryzującą ruch lotniczy w sektorze ATC jest natężenie ruchu (liczba statków powietrznych przebywających w sektorze w ciągu godziny). Czynniki meteorologiczne i inne występujące ograniczenia ruchowe powodują, że proces ruchu lotniczego jest procesem losowym, a charakteryzujące go natężenie ruchu oznaczone przez X jest w prostym przypadku zmienną losową typu skokowego. Przelot statku powietrznego przez sektor ATC inicjuje ciąg zgłoszeń do kontrolera sektora (ciąg sterowań) absorbując go przez określony (zależny od sytuacji) czas. Wielkością charakteryzującą obciążenie pracą kontrolera jest łączny czas obsługi wszystkich zgłoszeń (T) występujących w ciągu jednej godziny. Natężenie ruchu lotniczego i obciążenie pracą kontrolera można traktować jako zmienne losowe wzajemnie zależne o odpowiednim łącznym rozkładzie prawdopodobieństwa.

Zależność obciążenia pracą od natężenia ruchu lotniczego można analizować poprzez odpowiednie rozkłady brzegowe. Prowadzi to do definicji pojemności sektora kontroli jako odpowiedniego kwantyla rozkładu brzegowego dwuwymiarowej zmiennej losowej. Przy analizie przybliżonej natężenie ruchu lotniczego można traktować jako zmienną losową typu ciągłego. Pomiar parametrów rzeczywistego ruchu lotniczego i eksperymenty numeryczne na modelu wykazały, że dwuwymiarowa zmienna losowa (X, T) o otrzymanym łącznym rozkładzie prawdopodobieństwa ma liniową funkcję regresji. Zaś rozkłady brzegowe obu zmiennych losowych

wykazują dużą zgodność z rozkładami normalnymi. Można więc przyjąć, że otrzymana łączna zmienna losowa ma rozkład dwuwymiarowy normalny.

Wykaz podstawowych definicji użytych w opracowaniu.

Intensywność ruchu lotniczego - liczba samolotów wlatujących w przestrzeń powietrzną kontrolowaną kraju (FIR) w ciągu doby [1/doba].

Kontrola ruchu lotniczego ATC (termin przyjęty zwyczajowo w lotnictwie polskim - bardziej prawidłowy termin - sterowanie w systemie ruchu lotniczego) - obejmuje: kontrolę aktualnej sytuacji ruchowej każdego obiektu sterowanego, podejmowanie i przekazywanie obiektom decyzji mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa lotów.

System sterowania ruchem lotniczym (ATCS) - system wzajemnie oddziałujących na siebie i na ruch lotniczy służb kontroli ruchu ATC.

Natężenie ruchu lotniczego - liczba samolotów przebywających w sektorze ATC w ciągu godziny [1/godz.].

Obciążenie pracy kontrolera sektora ATC - stosunek łącznego czasu obsługi wszystkich zgłoszeń do sektora ATC występujących w danym przedziale czasu do długości tego przedziału (w %).

Płynność ruchu lotniczego - własność ruchu charakteryzująca się możliwie dokładnym dopasowaniem parametrów lotu każdego samolotu do wzorcowej jego trajektorii (przy minimalnej liczbie wymuszonych zmian parametrów lotu).

Pojemność sektora ATC - zdolność przepustowa - dopuszczalna liczba samolotów przebywających w obszarze kontrolowanym w danym okresie czasu, dla których możliwe jest zapewnienie obsługi zgodnie z przepisami międzynarodowej organizacji ruchu lotniczego ICAO [12].

Strumień samolotów - ciąg kolejno przelatujących samolotów o określonych parametrach (realizacja procesu ruchu lotniczego na określonej drodze lotniczej w zadanym czasie).

2. Problem pojemności sektora kontroli ruchu lotniczego

Ruch lotniczy cywilnego lotnictwa komunikacyjnego, odbywający się w odpowiednio zorganizowanych przestrzeniach powietrznych (FIR), regulowany jest ściśle określonymi przepisami i podlega sterowaniu przez służby kontroli ruchu lotniczego (ATC). Ruch lotniczy w FIR jest z wyprzedzeniem planowany i koordynowany, lecz jego realizacja podlega wielu losowym zakłóceniom. Służby ATC śledzą zyczliwie realizację tego ruchu zapewniając jego bezkolizyjność. Postacią centralną systemu sterowania ruchem lotniczym jest kontroler ruchu, osoba bezpośrednio odpowiedzialna za bezpieczeństwo w całej podległej sobie części przestrzeni powietrznej - sektorze ATC. Stanowi on jednocześnie "wąskie gardło" tego systemu. Kontroler ruchu lotniczego musi utrzymywać stałą łączność z wieloma statkami powietrznymi, przewidywać rozwój sytuacji operacyjno - ruchowej oraz wykonywać szereg innych pracochłonnych czynności. Jeżeli natężenie tych czynności zaczyna przekraczać granice pojemności pamięci i podzielności uwagi człowieka, rośnie prawdopodobieństwo, że decyzje podejmowane przez kontrolera mogą w pewnych okolicznościach nie zapewniać pełnego bezpieczeństwa lotów.

W celu ograniczenia obciążenia kontrolerów sektorów wprowadzono sterowanie przepływem strumieni samolotów (FLOW CONTROL) w większych obszarach, obejmujących kilkanaście sektorów ATC. Służba sterowania przepływem strumieni samolotów (ATFM) dba, aby w żadnym sektorze ATC nie przekroczono jego zdolności przepustowej, nazywanej pojemnością sektora. Potrzeba opracowania dokładnej metody szacowania pojemności projektowanych w FIR Warszawa nowych sektorów ATC stanowiła podstawę podjęcia badań nad tym problemem.

W literaturze światowej problemy sterowania przepływem strumieni samolotów (ATFM) i określania pojemności sektorów ATC występują w różnych aspektach. Powszechnie przyjmuje się, że zdolność przepustowa sektora ATC zależy przede wszystkim od najbardziej ograniczającego elementu systemu, którym jest kontroler ruchu lotniczego. Brak jest jednak jednoznacznej metody określenia dopuszczalnego obciążenia pracą kontrolera, określającego zdolność przepustową (pojemność) sektora ATC. Jednym z pierwszych modeli oceniających obciążenie pracą kontrolera

był model Arada [1]. W modelu tym przyjęto, że decydującym elementem mającym wpływ na obciążenie pracą kontrolera jest liczba statków powietrznych przebywających w sektorze.

Inny sposób wyznaczania poziomu obciążenia pracą został zaproponowany przez Directorate of Operational Research and Analysis (DORA) w Wielkiej Brytanii [11]. Do oceny obciążenia pracą kontrolera w określonych dwuminutowych przedziałach czasu wykorzystano doświadczonego kontrolera ruchu. Opracowana przez DORA metoda została wykorzystana do oceny i porównywania rzeczywistego ruchu w sektorach podległych Centrum w Maastricht [14]. Po zatwierdzeniu przez ICAO stała się zalecaną metodą wyznaczania pojemności istniejących sektorów ATC [12]. Wymienione opracowania wyznaczają pojemności dla istniejących sektorów ATC, dla których na bazie pomiarów oblicza się wymagane charakterystyki. Propozycję metody wyznaczania pojemności planowanego sektora ATC dla dużych natężeń ruchu lotniczego i rozwiązywania przez kontrolera występujących sytuacji konfliktowych, opracowano w Instytucie Transportu PW [4], [8]. W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizę zależności natężenia ruchu lotniczego od obciążenia pracą kontrolera ruchu lotniczego, stanowiącą uogólnienie wyników prac zespołu nie tylko nad problemem pojemności sektorów ATC.

Wielkością charakteryzującą ruch lotniczy w sektorze ATC jest natężenie ruchu zdefiniowane poprzez liczbę samolotów przebywających w sektorze ATC w ciągu godziny. Rozkład natężenia ruchu jest w sposób zasadniczy zależny od realizacji planu lotów. Realizacja planu lotów podlega wielu zakłóceniom. Czynniki meteorologiczne i inne występujące ograniczenia ruchowe powodują, że proces ruchu lotniczego jest procesem losowym, a charakteryzujące go natężenie ruchu, oznaczone przez X , jest zmienną losową typu skokowego [3], [5].

Elementarną realizacją procesu ruchu lotniczego jest przelot statku powietrznego 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. Wzrost natężenia ruchu powoduje zwiększenie liczby zgłoszeń, a więc i czasu obsługi kontrolowanego ruchu lotniczego. Dla ruchu o określonym natężeniu czas obsługi jest wielkością losową, zależną od złożoności sytuacji ruchowej. Struktura przepływu strumieni statków powietrznych, zakłócenia zewnętrzne mają decydujący wpływ na możliwość występowania sytuacji konfliktowych, których rozwiązanie wymaga nakładu dodatkowego czasu pracy kontrolera.

Sterowanie w sektorze ATC (rozumiane jako obsługa zgłoszeń od statków powietrznych w nim przebywających) jest więc procesem losowym zależnym od realizacji procesu ruchu. Zatem obciążenie pracą kontrolera sektora ATC, oznaczone przez T , jest zmienną losową zależną od natężenia ruchu lotniczego. Natężenie ruchu lotniczego i obciążenie pracą kontrolera można traktować jako zmienne losowe wzajemnie zależne o odpowiednim łącznym rozkładzie prawdopodobieństwa. Dla prawidłowego wykonywania zadań związanych z obsługą ruchu lotniczego, łączny czas obsługi zgłoszeń pochodzących od wszystkich statków powietrznych znajdujących się w ciągu każdej godziny w sektorze ATC nie powinien przekraczać ustalonej wartości [10]. 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.

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_x}, t_{p_t}) będzie nie większe od ustalonej wartości p_{XT} .

tzn:

$$P_{XT} = F_{XT}(x_{p_x}, t_{p_t})$$

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

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

Niech x_{p_x} będzie kwantylem rzędu p_x a t_{p_t} będzie kwantylem rzędu p_t , tzn. ze względu na założony skokowy typ zmiennej losowej X :

$$\{x_{p_x} : [P(X \leq x_p) \geq p] \wedge [P(X \geq x_p) \geq 1-p]\}$$

$$\{t_{p_t} : F_T(t_{p_t}) = p_t\}$$

Wyznaczona wartość kwantyla x_{p_x} określa pojemność sektora ATC, którą można więc zdefiniować następująco:

Pojemność sektora ATC przy danej organizacji systemu jest kwantylem x_{p_x} 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_t} rzędu p_t rozkładu obciążenia [4], [11].

Dla zadanej struktury przepływu strumieni samolotów, organizacji przestrzeni powietrznej, metody prowadzenia kontroli ruchu, pojemność sektora ATC jest podstawową wielkością porównawczą dla różnych systemów ATCS.

3. Obciążenie pracą kontrolera w zależności od natężenia ruchu lotniczego

Parametry pozycyjne rozkładów brzegowych zmiennej (X,T) : (x_{p_x}, p_x) i (t_{p_t}, p_t) mogą stanowić podstawę do porównywania innych projektowanych organizacji systemów ATC z punktu widzenia pojemności sektora. Pomiar i eksperymenty prowadzone w Centrum Kontroli Ruchu Lotniczego FIR Warszawa doprowadziły do empirycznego oszacowania dopuszczalnej wartości natężenia ruchu w poszczególnych sektorach ATC dla istniejącej organizacji przestrzeni, funkcjonującej metody prowadzenia kontroli ruchu i struktury przepływu strumieni statków powietrznych. Wyznaczone wartości dopuszczalnych natężeń ruchu przyjęto jako pojemności poszczególnych sektorów ATC. Stwierdzono, że przekroczenie przyjętych pojemności sektorów powoduje w wielu przypadkach wystąpienie przeciążenia pracą.

Z uwagi na złożoność systemu ATCS, a także bezwzględną konieczność zapewnienia bezpieczeństwa lotów, niemożliwe jest prowadzenie eksperymentów w realnie działającym systemie. Charakter systemu wyklucza możliwość ingerencji w jego pracę w celach badawczych. W celu realizacji opracowanej przez autorów metody został zbudowany model symulacyjny systemu ATCS. Model ten pozwala na szacowanie poziomu obciążenia pracą kontrolera w określonych przedziałach czasu Δt dla różnych organizacji systemu ATCS [3].

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 statku powietrznego (planowego rejsowego

statku powietrznego), przelatującego przez sektor ATC [1], [8], [11]. Za lot standardowego statku powietrznego przyjęto przelot statku powietrznego przez sektor ATC bez zmiany wysokości i odchylenia od założonej trasy.

Każda dodatkowa zmiana warunków lotu lub każda interwencja kontrolera spowodowana sytuacją w ruchu, wymaga dodatkowego sterowania (zwiększonej pracy). Określono standardowe przyrosty podstawowej jednostki pracy odpowiadające ogólnym zasadom sterowania zalecanym przez ICAO. Tak więc dla określonego przedziału czasu Δt , stosując standardowe współczynniki wagowe S_i , można określić dla j-tego statku powietrznego wielkość:

$$W_j = \sum_{i=1}^{N_j} S_i$$

gdzie: W_j - współczynnik wzrostu podstawowej jednostki pracy związanej ze sterowaniem j-tego statku powietrznego,

S_i - wagowy współczynnik wzrostu podstawowej jednostki pracy dla i-tej zmiany warunków lotu,

N_j - liczba zmian warunków lotu j-tego statku powietrznego.

Każda podstawowa jednostka pracy jest wykonywana w ciągu średniego czasu τ . Czas ten jest ustalony dla określonego sposobu sterowania w systemach ATC. Zależy on jedynie od stopnia automatyzacji sterowania i od czasu przebywania statku powietrznego w sektorze. Przykładowo, dla statków powietrznych przebywających w sektorze powyżej 12 min., przy proceduralnej metodzie prowadzenia kontroli ruchu z ręcznym wypisywaniem pasków postępu lotu, czas τ wynosi 120 sek. (60 %), przy proceduralnej metodzie z zobrazowaniem radarowym - 80 sek. (50 %) a w sektorach z kontrolą radarową - 65 sek. (44 %). W nawiasach podano procent czasu zużyty na bezpośrednią łączność radiową: kontroler - statek powietrzny. Podane wielkości zaczerpnięto z literatury [10], [13], [14]. Każdemu statkowi powietrznemu znajdującemu się w sektorze ATC (w przedziale czasu Δt_w) odpowiada czas pracy t_w , przeznaczony przez kontrolera na sterowanie:

$$t_{w_j} = W_j \cdot \tau$$

Całkowity czas pracy kontrolera w badanym przedziale Δt_w jest równy:

$$t_w = \sum_{j=1}^m t_{w_j}$$

gdzie m - liczba statków powietrznych w sektorze podlegających sterowaniu w czasie Δt_w .

Porównanie wyliczonej wartości t_w z długością przedziału czasu pozwala na określenie obciążenia pracą kontrolera ruchu lotniczego w sektorze w danym przedziale czasu:

$$T = \frac{t_w}{\Delta t_w} \cdot 100\%$$

Obciążenie pracą można podawać w procentach albo zgodnie z zaleceniami DORA w czterestopniowej skali [11]. Przyjęte przez autorów w tym artykule procentowe obciążenie pracą kontrolera sektora ATC może być w prosty sposób przetransponowane na skalę używaną w metodzie DORA w następujący sposób:

- T > 100% poziom A+ kontroler niebezpiecznie przeciążony
- T = 100% poziom A kontroler bardzo zajęty
- 50% < T < 100% poziom A- kontroler zajęty

$T < 50\%$ poziom B kontroler nie w pełni zajęty.

Przyjmując przedział czasu $\Delta t_w = 1$ godzina, otrzymuje się obciążenie pracą, które można powiązać z występującym w danej godzinie natężeniem ruchu lotniczego.

W opracowanej przez autorów metodzie wyznaczania pojemności sektora kontroli ruchu lotniczego [4], w etapie I, dla rzeczywistego ruchu wyznaczane są interesujące nas parametry pozycyjne rozkładów brzegowych zmiennej (X, T) . Wartość granicznego obciążenia pracą kontrolera ruchu t_{p_r} 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 ATCS w polskiej przestrzeni powietrznej kontrolowanej - FIR Warszawa, można metodą symulacji komputerowej uzyskać próbkę statystyczną o wystarczającej liczności par (X, T) . Z próbki tej można estymować kwantyle dowolnego rzędu rozkładów brzegowych X oraz T .

Jeżeli przyjmiemy pojemność sektora $X = x_{p_x}$ (np. dla sektora zachodniego FIR Warszawa empirycznie wyznaczono $x_{p_x} = 12$ sam/h), to na bazie otrzymanej próbki statystycznej można określić rząd tego kwantyla - p_x . Analogicznie, w przypadku obciążenia pracą kontrolera, można dla dowolnego (ustalonego) obciążenia estymować jakiego rzędu jest on kwantylem. Przyjmując więc nominalne, dopuszczalne obciążenie pracą $T = t_{p_r}$ tego kontrolera, można określić rząd tego kwantyla - p_r . Uzyskane wartości (x_{p_x}, p_x) i (t_{p_r}, p_r) mogą stanowić podstawę do porównywania innych projektowanych organizacji systemów ATC z punktu widzenia zdefiniowanej uprzednio pojemności sektora.

W Centrum Kontroli Ruchu Lotniczego FIR Warszawa (W-wa Okęcie) zostały empirycznie wyznaczone pojemności x_{p_x} istniejących sektorów ATC. W wyniku eksperymentów symulujących rzeczywisty proces ruchu lotniczego w zachodnim sektorze ATC, otrzymano próbkę statystyczną z populacji generalnej o rozkładzie łącznym (X, T) - (natężenie ruchu w sektorze ATC, obciążenie pracą kontrolera). Ponadto przyjęto ustaloną wartość graniczną obciążenia pracą kontrolera sektora ATC - t_{p_r} . Z dystrybuanty rozkładu brzegowego obciążenia pracą kontrolera wyznaczono, którego rzędu (p_r) kwantylem jest założona wartość obciążenia t_{p_r} . Z dystrybuanty rozkładu brzegowego natężenia ruchu wyznaczono, którego rzędu (p_x) kwantylem jest przyjęta wartość x_{p_x} .

Przyjęto, że wartość kwantyla t_{p_r} i jego rząd p_r są wartościami stałymi, zależnymi jedynie od organizacji systemu ATCS. Założenie to, empirycznie uzasadnione, jest bazą do statystycznego badania i wnioskowania o pojemności sektorów ATC w zmienionych warunkach organizacyjnych (np. po modernizacji systemu).

Dla aktualnych warunków rzeczywistych i ustalonej w praktyce pojemności istniejącego sektora x_{p_x} , wynikiem przeprowadzenia eksperymentu symulacyjnego etapu I opracowanej metody [4] są:

- założona wartość obciążenia pracą kontrolera sektora ATC - t_{p_r} ,
- prawdopodobieństwo p_r wystąpienia obciążenia pracą kontrolera sektora ATC, nie przekraczającego wartości t_{p_r} :

$$p_r = P(T \leq t_{p_r})$$

- prawdopodobieństwo p_x wystąpienia natężenia ruchu lotniczego nie przekraczającego pojemności sektora x_{p_x} :

$$\{x_{p_x} : [P(X \leq x_{p_x}) \geq p_x] \wedge [P(X \geq x_{p_x}) \geq 1 - p_x] \}$$

Ustalona wartość t_{p_x} i wyznaczone wartości p_x i p_x umożliwiają wyznaczenie pojemności dowolnych sektorów ATC. W metodzie oceny pojemności sektora ATC przyjęto, że wartości p_x i p_x są ustalone i niezależne od organizacji systemu ATCS.

Analizując kolejno wloty i wyloty statków powietrznych w sektorze ATC, rejestrowano liczby statków powietrznych przebywających w każdym sektorze na początku każdego przedziału $\Delta t_w = 2$ min. Na ich podstawie wyznaczano średnią liczbę statków powietrznych przebywających w sektorze ATC w i -tym przedziale czasu Δt_w :

$$n_i = \text{NINT} \left[\frac{n_i + n_i}{2.0} + 0.1 \right]$$

gdzie: n_i , n_i - liczby statków powietrznych na początku i końcu i -tego przedziału czasu.

W podobny sposób wyznaczano średnie liczby statków powietrznych przebywających w sytuacji ruchowej każdego sektora i statków powietrznych znajdujących się w systemie ATCS. Wyznaczano również częstotliwości występowania tej samej liczby statków powietrznych w każdym sektorze ATC w przedziałach czasu $\Delta t_w = 2$ min oraz wartość średnią tej liczby w czasie Δt_w . Wyliczono również natężenie ruchu w każdej godzinie symulowanego przedziału czasu.

Przełot statku powietrznego przez sektor ATC generuje ciąg zgłoszeń do systemu kontroli ATCS. Obsługa każdego zgłoszenia zajmuje kontrolera sektora ATC na pewien określony przedział czasu. Metoda wyznaczania czasu zajętości kontrolera na podstawie analizy rejestrowanych zgłoszeń bazuje na przyjęciu elementarnej jednostki miary odpowiadającej średniej wartości pracy kontrolera niezbędnej do podejmowania decyzji sterujących lotem standardowego statku powietrznego i wyznaczeniu współczynników wzrostu tej jednostki, wynikłych ze zmiany warunków lotu lub ingerencji kontrolera.

Przyjęto następujące współczynniki wzrostu podstawowej jednostki miary oraz zdarzenia im odpowiadające:

- za lot standardowego statku powietrznego przyjęto przełot statku rozkładowego linii lotniczych, znajdującego się w powtarzalnym planie lotów, bez zmiany wysokości i odchylenia od założonej trasy - jednostka miary 1.00
- przełot cywilnego nierozkładowego statku powietrznego + 0.20
- przełot wojskowego statku powietrznego + 0.50
- zmiana poziomu lotu (wznoszenie, zniżanie) 0.24
- przekazanie kontroli pomiędzy służbami ACC (kontrola obszaru) + 0.26
- przekazanie kontroli ze służbami APP lub TWR (zbliżanie, kontrola lotniska) + 0.38
- meldunek pozycyjny + 0.30

Dla każdego sektora ATC poszczególnym chwilom czasu pracy kontrolera przyporządkowano współczynniki wzrostu jednostki miary. Daje to podstawę wyznaczania obciążenia pracą kontrolera w każdej symulowanej godzinie.

Oszacowanie pojemności sektorów w projektowanych systemach ATCS (etap II metody) polega na przeprowadzeniu eksperymentów symulujących działanie projektowanego systemu. Przyjmując zadaną organizację przestrzeni, metodę prowadzenia kontroli ruchu oraz strukturę

przepływu strumieni samolotów należy symulować ruch o tak dobranej intensywności, aby prawdopodobieństwo wystąpienia obciążenia pracą kontrolera sektora ATC nie przekraczające w przybliżeniu wartości t_{p_x} wynosiło p_x . Następnie należy tak wyznaczyć natężenie x_{p_x} , aby prawdopodobieństwo jego przekroczenia nie było większe od $1-p_x$. Tak wyznaczona wartość x_{p_x} określa pojemność projektowanego sektora kontroli ruchu lotniczego [4]. Zastosowanie przedstawionej metody umożliwi porównywanie obciążenia pracą kontrolerów sektorów ATC przy tej samej intensywności ruchu oraz pomiar pojemności sektorów ATC, w zależności od przyjętej organizacji lub innych przedsięwzięć modernizacyjnych.

Metodę tę wszechstronnie przetestowano dla warunków FIR W-wa [4], [8], w pełni potwierdzając jej użyteczność. Wadą metody jest jej znaczna pracochłonność, wynikająca z konieczności wielokrotnego powtarzania procesu symulacji dla uzyskania niezbędnej liczności próbki rozkładu dwuwymiarowej zmiennej losowej (X,T) , przy iteracyjnym doborze parametrów.

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 statków powietrznych przebywających w sektorze ATC w czasie jednej godziny. W praktyce statki powietrzne przelatują pomiędzy sektorami, startują lub lądują w sektorze, zmieniają podporządkowanie organowi kontroli (np. ACC \Rightarrow APP). W czasie godziny pomiarowej część statków powietrznych znajduje się więc tylko częściowo pod kontrolą analizowanego organu ATC sektora.

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. Pomiarów parametrów rzeczywistego ruchu lotniczego i eksperymenty numeryczne na modelu wykazały, że dwuwymiarowa zmienna losowa (X,T) o otrzymanym łącznym rozkładzie prawdopodobieństwa ma liniową funkcję regresji. Zaś 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:

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

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 ruchu i obciążenia pracą.

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

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

$$f(t|_{X=x}) = \frac{f(x,t)}{f_1(x)}$$

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

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

$$f(t|_{x=x}) = \frac{1}{\delta_x \sqrt{2\pi(1-\rho^2)}} e^{-\frac{1}{2\delta_x^2(1-\rho^2)} \left\{ t - \left(m_x + \frac{\rho\delta_x}{\delta_x} (x - m_x) \right) \right\}^2}$$

Jest to wartość przeciętna obciążenia pracą kontrolera w funkcji natężenia ruchu lotniczego.

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:

$$m(x) = m_x + \frac{\rho \delta_x}{\delta_x} (x - m_x)$$

$$\delta(x) = \delta_x \sqrt{1 - \rho^2}$$

Zależność $m(x)$ jest równaniem krzywej regresji typu pierwszego obciążenia pracą kontrolera względem natężenia ruchu lotniczego. Równanie to wyznaczyliśmy również bezpośrednio badając regresję zmiennych losowych X i T .

Oznacza to, że dysponujemy 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 $t_p = 80\%$, a nie poprzez kwantyle rozkładów brzegowych.

Nowym problemem jest tu metoda generowania odpowiedniej próbki losowej (X, T) dla projektowanego sektora ATC, o zadanych parametrach brzegowych. Proponuje się tu następujący algorytm postępowania:

1. Ustalenie parametrów brzegowych (m_x, δ_x) i warunkowych ($m(x), \delta(x)$) rozkładu dwuwymiarowej zmiennej losowej natężenia ruchu lotniczego i obciążenia pracą kontrolera, z numerycznego testowania modelu rzeczywistego ruchu lotniczego w bazowym sektorze ATC.
2. Wygenerowanie y jako zmiennej losowej z generatora $N(0,1)$.
3. Wyznaczenie zmiennej losowej $x = y \cdot \delta_x + m_x$.
4. Wygenerowanie z jako zmiennej losowej z generatora $N(0,1)$.
5. Wyznaczenie zmiennej losowej $t = z \cdot \delta(x) + m(x)$.

4. Podsumowanie

Przeprowadzono pomiary i eksperymenty, które pozwoliły pozytywnie zweryfikować stwierdzone zależności obciążenia pracą kontrolera od natężenia ruchu lotniczego. Na podstawie analizy rzeczywistego ruchu lotniczego opracowano rozkłady parametrów charakteryzujących strukturę przepływu strumieni statków powietrznych w FIR Warszawa. Przyjmując te dane wygenerowano plan lotów i symulowano ruch dla przyjętej intensywności 245 samolotów w obszarze w ciągu doby. Weryfikację zależności przeprowadzono dla:

- a) odcinka drogi lotniczej B-20 Suwalki - Słubice,
 - b) przelotu nad punktem kontrolnym GRU (Grudziądz) na skrzyżowaniu dróg lotniczych B-20 i R-23 (punkt, nad którym przelatuje największa liczba statków powietrznych w FIR Warszawa).
- Dla tych punktów zidentyfikowano rzeczywiste charakterystyki na bazie pomiarów ruchu lotniczego wykonanych dla 5 kolejnych poniedziałków. Analogiczne charakterystyki uzyskano z realizacji przebiegów modelu symulacyjnego dla ruchu lotniczego o zbliżonej intensywności. W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano informacje o doświadczalnie wyznaczonych pojemnościach w obu aktualnie funkcjonujących w FIR Warszawa sektorach. Wyznaczano nie tylko pojemność sektora ATC, ale również obciążenie pracą kontrolera ruchu lotniczego w zależności od zmian organizacji systemu ATCS.

Sprawdzając praktyczną użyteczność wyznaczonej zależności obciążenia pracą i natężenia ruchu lotniczego, przeprowadzono iteracyjną serię eksperymentów badających wpływ zmian intensywności ruchu na obciążenie pracą kontrolera projektowanego południowego sektora ATC. Przy intensywności 200 samolotów na dobę stwierdzono zgodność obciążenia pracą kontrolera projektowanego sektora z przyjętym obciążeniem porównawczym $t_p = 80\% + 2\%$. Z rozkładu zmiennej (X,T) otrzymanego dla ruchu o takich parametrach wyznaczono wartość kwantyla $x_p = 13$ sam/h (pojemność projektowanego południowego sektora ATC).

Opracowana i przebadana symulacyjnie zależność obciążenia pracą i natężenia ruchu lotniczego jest efektywnym narzędziem wymiernej oceny organizacji systemów ATCS. Można ją zastosować do:

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

LITERATURA

- [1] Arad B.A.: The Control Load and Sektor Design. Controller, 1972, 11, N 1-4, p.20-27.
- [2] Field A.: International Air Traffic Control. Pergamon Press, 1985.
- [3] 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.
- [4] Gładys S., Malarski M.: Model Estimation of Air Traffic Control (ATC) Sectors Capacity for Solving the Air Traffic Flow Management Task. Archives of Transport, 1990, v.2, N 1, p.7-19.
- [5] Goodwin J.L., Ford R.L.: Random Air Traffic Generation for Computer Models. Journal of Navigation, Vol.38, No 2, 1985.
- [6] Machol R.E.: Effectiveness of the Air Traffic Control System. Journal of the Operational Research Society, Vol.30, No 2, 1979.
- [7] Malarski M., Havel K. Budouci system rizeni letoveho provozu - Doprava, Bratislava, Vol.28, No 2, 1986.
- [8] Malarski M., ed.: Wybrane zagadnienia analizy i rozwoju systemów sterowania ruchem i procesami transportowymi w transporcie lotniczym. Centralny Program Badań Podstawowych nr 02.19.02, Warszawa, 1990.
- [9] Stein E. Graphic Simulation for air traffic control development - Proc. Summer Comput. Simul. Conf. Chicago Ill, July 22 - 24, 1985, San Diego Calif.
- [10] Stein E. The advantages of simulation of the study of air traffic controller workload - automated measurement techniques - Proc. Summer Comput. Simul. Conf. Boston Mass., July 23-24, 1984.
- [11] -: A Method of Estimating the Capacity of Air Traffic Sektors - An Interim Report. CAA(UK) DORA Research Paper 7301, 7402.
- [12] -: Air Traffic Management Table for the Eurregion 1981 - 1985. Part 5 ATM, ICAO 26/4/85.
- [13] -: Guideline for the Statistical Coverage of the Daily and Hourly Control Load of ATC Depending on Traffic Density. Messerschmitt - Bolkow - Blohm GmbH: TN-FE 323 - 1/75.
- [14] -: Re - assessment of the capacity of the control sectors of Maastricht UAC. Eurocontrol, Ref. OPS/131/4, 1984.
- [15] -: The Air Traffic Controller's Contribution to ATC System Capacity in Manual and Automated Environments. Stanford Research Institute Report No. FAA-RD 72-63.

Recenzent: Prof.dr h.inż. Eugeniusz Toczyłowski

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

Abstract:

A problem of determining air traffic control capacity is found during an analysis of air traffic control systems in view of design of new and modernisation of existing control systems. Sector capacity is a function of controller workload in relation to air traffic density.

In this paper analysis of controller workload T related to air traffic density X is presented. This relation may be analysed using appropriate edge distributions. This leads to a definition of air traffic sector capacity as a quantile of edge distribution of two-dimensional random variable.

During the approximate analysis, air traffic density can be treated as a continuous random variable. Real air traffic observations and numerical experiments on the model proved that two-dimensional random variable (X, T) with given joint probability distribution has a linear regressive function. Edge distributions of both random variables can be very well approximated by normal distribution. So we may assume, that the obtained random variable has two-dimensional normal distribution.