

Artur FLOROWSKI¹, Jacek SKORUPSKI²

KONCEPCJA IMPLEMENTACJI SYSTEMU OCENY PROCESU SZEREGOWANIA SAMOLOTÓW LĄDUJĄCYCH

Streszczenie. Organizacja ruchu w rejonach lotnisk jest jednym z trudniejszych zadań dla służb zarządzania ruchem lotniczym. Wynika to z dużej liczby samolotów wykonujących skomplikowane manewry w ograniczonej przestrzeni ruchowej. Jednym z kluczowych procesów występujących w tym obszarze jest szeregowanie samolotów lądujących. Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji implementacji systemu służącego do oceny tego procesu. Metoda oceny opiera się na wyznaczeniu liczby lądowań możliwych do zrealizowania przy danym uszeregowaniu w jednostce czasu. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów ruchu lotniczego przeanalizowano rzeczywiste uszeregowania stosowane w praktyce. Pokazuje ona, że wykorzystywane w praktyce przez kontrolerów ruchu lotniczego algorytmy szeregowania pozwalają na znacznie mniejszą liczbę lądowań w jednostce czasu, niż wynikałoby to z przepisów. Wskazuje to na istnienie dużego potencjału w ramach wdrażania systemów wspomaganie kontrolera w procesie szeregowania samolotów lądujących.

Słowa kluczowe: Szeregowanie samolotów lądujących, rejon lotnisk, proces lądowania, ruch lotniczy, systemy wspomaganie kontrolera.

THE CONCEPT OF IMPLEMENTATION OF A SYSTEM FOR LANDING AIRCRAFT SCHEDULING PROCESS ASSESSMENT

Summary. Traffic organization in the airport area is one of the most difficult tasks for air traffic management services. This is due to the large number of aircraft performing complicated maneuvers in limited airspace. One of the key processes occurring in this area is the scheduling of landing aircraft. The aim of this study is to present the concept of implementation of a system for the evaluation of this process. The assessment method is based on determining the number of viable landings per unit time at a given aircraft schedule. On the basis of real air traffic measurements real landing aircraft schedules were analyzed. This shows that algorithms used by air traffic controllers in practice allow for a much smaller number of landings per unit of time than would result from the regulations. This indicates the existence of a large capacity to implement controller support systems in the process of aircraft landing scheduling.

Keywords: Scheduling of landing aircraft, airport area, landing process, air traffic, controller support systems.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, a.florowski@gmail.com

² Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, jsk@wt.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Od wielu lat na świecie odnotowuje się wzrost wielkości ruchu lotniczego. Wraz z nim narasta problem punktualności wykonywania operacji lotniczych. Występujące opóźnienia są ściśle związane z przepustowością przestrzeni powietrznej oraz lotnisk. Duży wpływ na przepustowość lotniska mają operacje lądowania, których liczba jest zależna między innymi od organizacji strumienia samolotów podchodzących do lądowania. Jej zasadniczym elementem są odległości między kolejnymi samolotami. Wynikają one głównie z separacji, czyli minimalnych odległości określonych przepisami. Minimalna separacja radarowa wynosi 5 mil morskich (NM) [7]. Jednak gdy okoliczności tego wymagają, kontroler powinien stosować większe separacje, uwzględniając między innymi turbulencję w śladzie aerodynamicznym czy warunki pogodowe.

Niektóre z tych elementów mają charakter zdeterminowany i mogą zostać uwzględnione podczas przedtaktycznego planowania ruchu. Inne mają charakter stochastyczny i wymagają bieżącej korekty organizacji strumienia samolotów lądujących. W każdym z tych przypadków kontroler staje przed problemem decyzyjnym polegającym na określeniu, w jakiej odległości od siebie mają znajdować się kolejne lądujące statki powietrzne. Uszeregowania uzyskane w wyniku rozwiązania tego problemu decyzyjnego mogą podlegać ocenie względem różnych kryteriów. Zagadnienie to jest przedmiotem niniejszego artykułu.

Istnieje wiele badań, których wyniki są związane z koncepcją systemu oceny procesu szeregowania. Ich przegląd można znaleźć w pracy [5]. Natomiast w publikacji [12] opracowano algorytm do wyznaczenia optymalnego, lub bliskiego optymalnemu, rozwiązania zadania stochastycznego sekwencjonowania operacji dla jednej lub kilku dróg startowych przy minimalizacji różnicy między czasem rozpoczęcia i zakończenia sekwencji zadań. Algorytmy pozwalające na uzyskanie rozwiązań optymalnych są jednak zazwyczaj problemami NP-trudnymi. Dużo uwagi poświęca się więc zastosowaniu metod uproszczonych i heurystycznych, dających rozwiązania zbliżone do optymalnego. Interesujące rozwiązania zawiera np. praca [2], w której wykorzystano algorytmy genetyczne do uzyskania rozwiązania sformułowanego problemu dynamicznego, uwzględniającego także samoloty odlatujące. Podobne metody zastosowano w [3].

W większości prac niepewność co do czasu realizacji poszczególnych operacji jest rozpatrywana metodami probabilistycznymi. W [13] proponuje się inne podejście, wykorzystujące teorię zbiorów rozmytych. Bardziej szczegółowo kwestie organizacji ruchu lotniczego, jego oceny, wspomagania procesu szeregowania danymi z Mode S, a także współczesne koncepcje planowania ruchu lotniczego i przestrzeni powietrznej są omówione w pracy [11].

W wielu publikacjach zauważa się konieczność znacznie wcześniejszego planowania łączenia strumieni statków powietrznych przylatujących z różnych kierunków. Problem ten, zwany zarządzaniem przylotami (*arrival management*), omawiają np. prace [1] oraz [15]. Znacznie rzadziej analizuje się problem szeregowania samolotów startujących. Do tego podejścia można zaliczyć pracę [6]. Ujęcie kompleksowe prezentuje tu np. [14]. Opracowanie koncepcji i wdrożenie systemów AMAN (*arrival management*) i DMAN (*departure management*) zostało także przewidziane jako jedno z zasadniczych zadań programu SESAR, będącego technologiczną częścią koncepcji Single European Sky (SES). W ramach prowadzonych prac przeprowadzono wstępne testy opracowanych rozwiązań na lotniskach Paryż CDG oraz w rejonach TMA Londyn, Rzym, Amsterdam i Malmö [8].

Wszystkie omówione wyżej opracowania podejmują przede wszystkim kwestię utworzenia właściwego uszeregowania. W naszej pracy będzie rozpatrywane zagadnienie nieco odmienne. Zajmujemy się bowiem oceną zaplanowanej wcześniej kolejki, uwzględniając przy tym wszystkie ograniczenia związane z separacjami pomiędzy statkami

powietrznymi oraz możliwe losowe odchylenia od zaplanowanych czasów przybycia do granicy obszaru i czasów realizacji operacji wewnątrz analizowanego rejonu. Takie podejście nie jest nastawione na poszukiwanie rozwiązania optymalnego, jednak łatwo może służyć wspomaganie takiego zadania, ponieważ przez porównywanie ocen różnych algorytmów, z uwzględnieniem różnych warunków zewnętrznych, może pozwolić na znalezienie wśród nich rozwiązania najlepszego spośród tych, które mogą być wykorzystane w danych warunkach.

2. OCENA PROCESU SZEREGOWANIA

2.1. Założenia

Proponując koncepcję systemu oceny procesu szeregowania, przyjęto następujące założenia.

1. Ocena procesu szeregowania wymaga określenia obszaru analizy. Na obecnym etapie prac będzie rozpatrywane podejście do lądowania wykonywane z jednego kierunku, zgodnie z jedną ustaloną procedurą. Założone przy tym będzie, że wszystkie lądowania odbywają się według tej samej procedury, ruch startujących samolotów nie koliduje zaś z rozpatrywanym ruchem samolotów lądujących.
2. Kryterium oceny dotyczy czasu wykonania serii lądowań. Przyjęte zatem zostanie, że czas pojedynczej operacji zakończonej lądowaniem będzie liczony od chwili osiągnięcia pewnego ustalonego punktu, w którym wszystkie statki powietrzne są już uszeregowane w kolejkę do lądowania, do momentu zjazdu w drogę kołowania, czyli zwolnienia drogi startowej dla kolejnego lądującego samolotu.
3. Należy określić, jaki zbiór samolotów należy do ocenianego uszeregowania. Spośród kilku możliwych rozwiązań przyjmujemy, że oceniane uszeregowanie zaczyna się pewnym arbitralnie wybranym samolotem, następnie zawiera wszystkie samoloty znajdujące się w odległości nie większej niż 10 NM i odstępie czasowym nie większym niż 6 minut od poprzednika. Wystąpienie większej przerwy między parą samolotów będzie oznaczało, że pierwszy samolot z pary jest ostatnim w uszeregowaniu, drugi zaś należy już do następnej sekwencji lądowań.
4. Minimalna separacja odległościowa między lądującymi samolotami wynosi 5 NM.
5. Minimalna separacja czasowa podczas lądowania została określona przez przepisy międzynarodowe [4] zgodnie z tabelą 1. Minima separacji są ustalane ze względu na turbulencję w śladzie aerodynamicznym. Oparte są one na podziale statków powietrznych na trzy kategorie, zgodnie z maksymalną masą startową:
 - ciężki (H) – statki powietrzne o masie startowej powyżej 136 000 kg,
 - średni (M) – statki powietrzne o masie startowej między 7000 kg a 136 000 kg,
 - lekki (L) – statki powietrzne o masie startowej poniżej 7000 kg.

Tabela 1

Minimalne separacje pomiędzy przylatującymi statkami powietrznymi

Statek powietrzny lecący z przodu	Statek powietrzny lecący z tyłu	Minimalna separacja
ciężki (H)	lekki (L)	3 min
ciężki (H)	średni (M)	2 min
średni (M)	lekki (L)	3 min

Źródło: [4]

Dla pozostałych przypadków (nieuwzględnionych w tabeli 1) została przyjęta separacja wynosząca jedną minutę.

6. Planowany czas lądowania będzie określony dla każdego statku powietrznego w sekwencji na podstawie planowanej chwili pojawienia się w punkcie początkowym analizy.
7. Samoloty pojawiają się w punkcie początkowym w kolejności i o czasie określonych w uszeregowaniu. Oznacza to, że wszelkie zakłócenia punktualności następują w obszarze analizy. W dalszych etapach prac planowane jest rozpatrzenie także przypadków, że w rzeczywistości pierwotnie planowane uszeregowanie może być utracone już na początku obszaru analizy.
8. Zapas między samolotami w istocie stanowi zmienną decyzyjną, której wybór podlega ocenie, przyjmujemy za stałą.

2.2. Pomiary ruchu lotniczego

TMA (Terminal Control Area) jest to część obszaru kontrolowanego ustanowiona zwykle u zbiegu kilku tras w pobliżu lotniska lub kilku ważniejszych lotnisk. W tym przypadku badaniu podlegał proces zarządzania przylotami w rejonie TMA znajdującego się w pobliżu lotniska Chopina w Warszawie. Przestrzeń powietrzna TMA Warszawa jest przestrzenią kontrolowaną klasy C. Loty w tej przestrzeni mogą się odbywać wyłącznie po uzyskaniu zezwolenia kontroli od APP Warszawa. Organ ten jest również odpowiedzialny za planowanie i nadzór nad realizacją zaplanowanej sekwencji lądowań.

W celu przeprowadzenia oceny procesu zarządzania przylotami w lipcu 2012 r. zrealizowano pomiary rzeczywistego ruchu lotniczego w TMA Warszawa. Gromadzone dane zawierały między innymi:

- znaki rozpoznawcze samolotu,
- czas i miejsce pojawienia się samolotu na granicy rejonu TMA,
- wykorzystywany kierunek drogi startowej, co łącznie z punktem wlotu określa jednoznacznie realizowaną procedurę dolotową STAR,
- czas i miejsce, w którym samolot został włączony w formowany strumień samolotów lądujących,
- czas osiągnięcia punktu początkowego procesu oceny, który w tym badaniu przyjęto za punkt oddalony o 8 NM od progu drogi startowej,
- czas osiągnięcia punktu końcowego procesu oceny; przyjęto go za punkt, w którym samolot opuszcza drogę startową po lądowaniu.

Takie, a nie inne przyjęcie punktu końcowego procesu oceny wynika z istniejących przepisów ruchu lotniczego, według których kolejny samolot może lądować w chwili, kiedy samolot poprzedzający go opuści drogę startową. Przykładowa rzeczywista sekwencja samolotów lądujących została przedstawiona w tabeli 2.

Tabela 2

Przykładowe dane pomiarowe sekwencji statków powietrznych lądujących w TMA Warszawa na drodze startowej RWY 11 (6 lipca 2012 r.)

Znak rozpoznawczy	Wlot w rejon TMA		Wejście do sekwencji		Szeregowanie	
	Punkt	Czas	Czas	Odległość	Początek	Koniec
LOT456	SORIX	07:17:47	07:25:09	13	07:26:35	07:31:15
LOT270	AGAVA	07:21:33	07:27:30	13	07:28:58	07:33:01
LOT215	AGAVA	07:19:58	07:29:29	11	07:30:49	07:34:57
LOT3AW	BIMPA	07:19:15	07:31:40	17	07:33:14	07:37:11
LOT165	SORIX	07:19:30	07:33:49	12	07:35:22	07:37:55
SAS751	LOGDA	07:27:17	07:34:16	21	07:38:05	07:41:18

Źródło: opracowanie własne

Analiza zebranych danych pomiarowych wskazuje, że procedura łączenia strumieni samolotów napływających z różnych punktów wlotowych jest realizowana w różnych punktach. Sekwencja przedstawiona w tabeli 2 była formowana na odcinku pomiędzy 21 a 11 NM od progu drogi startowej. Oznacza to, że nie ma jednoznacznie określonego punktu, który można byłoby uznać za punkt początku szeregowania. Jego wybór ma charakter arbitralny. Analizując wszystkie przebadane sekwencje, stwierdzono, że najmniejsza odległość, w której zakończono formowanie strumienia samolotów lądujących, wynosiła 8 NM od progu drogi startowej. Dla porównywalności ocen poszczególnych sekwencji przyjęty zatem został punkt odległy o 8 NM od progu za punkt początku szeregowania.

2.3. Ocena procesu szeregowania

Dla danych pomiarowych zebranych w lipcu 2012 r. w rejonie TMA Warszawa oceniono szeregowanie samolotów lądujących na drodze startowej RWY 11 zgodnie ze wzorem:

$$os(Q_i) = \frac{lr_i - lt_1}{ls} \quad (1)$$

gdzie:

Q_i – i -ta sekwencja lądowań,

os – funkcja określająca ocenę uszeregowania,

lr_i – czas rzeczywistego zakończenia sekwencji lądowań,

lt_1 – chwila pojawienia się pierwszego samolotu z sekwencji nad punktem początku szeregowania,

ls – liczba samolotów w sekwencji.

Wszystkie zarejestrowane samoloty należały do kategorii wagowej M (medium). Po zakończeniu procesu szeregowania odległości pomiędzy poszczególnymi samolotami wynosiły na wejściu 143 s, 111 s, 145 s, 128 s i 163 s. Jak widać, odległości te są większe niż minimalna separacja. Średni czas przypadający na jedno lądowanie, obliczony zgodnie ze wzorem (1), wynosi 150 s.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Analizując strategię szeregowania stosowaną przez kontrolerów, widać, że dodają oni pewien zapas odległości między lądującymi samolotami. Wynosi on, dla przedstawionej w tabeli 2 sekwencji, średnio 78 s ponad przyjęte 60 s minimalnej separacji.

Ocena rzeczywistego ruchu samolotów lądujących poddanych procesowi szeregowania wskazuje, że w warunkach niewielkich zakłóceń (jak w badanym przykładzie) korzystna jest strategia gęstego upakowania samolotów w sekwencji. Dla przedstawionej strategii, charakteryzującej się umiarkowanym zapasem, ocena szeregowania jest lepsza niż dla strategii charakteryzujących się większym zapasem. Wskazuje to na możliwość jeszcze gęstszego upakowania samolotów, jednak takie zadanie musi być wspierane systemem wspomaganie kontrolera ruchu lotniczego.

Zupełnie inna zależność zachodzi dla przypadku dużych zakłóceń. Zaplanowanie gęstego upakowania samolotów w szeregu prowadzi często do zakłócenia sekwencji polegającego na utracie separacji, co oczywiście musi zostać wyprzedzająco uniemożliwione przez kontrolera ruchu lotniczego. Może to skutkować odesłaniem samolotu na koniec kolejki samolotów lądujących lub realizacją kosztownych manewrów zmierzających do uniemożliwienia utraty separacji. Badania tego rodzaju zależności muszą jednak być prowadzone przy wykorzystaniu odpowiednich modeli symulacyjnych. Eksperymentowanie na rzeczywistym ruchu jest w tym

przypadku niemożliwe ze względu na kwestie bezpieczeństwa. Wspomniane badania symulacyjne będą stanowić kolejny etap prac nad zagadnieniem oceny procesu szeregowania samolotów lądujących. Planowane jest wykorzystanie stochastycznych, kolorowanych sieci Petriego [9], które stanowią doskonałe narzędzie do modelowania procesów ruchowych w transporcie lotniczym [10].

Bibliografia

1. Boursier L., B. Favennec, E. Hoffman, A. Trzmiel, F. Vergne, K. Zeal. 2007. "Merging Arrival Flows Without Heading Instructions". In *7th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*.
2. Capri S., M. Ignacio. 2004. "Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model". *Journal of Air Transport Management* 10: 345-351.
3. Hansen J.V. 2004. "Genetic search methods in air traffic control". *Computers & Operations Research* 31: 445-459.
4. Doc. 4444. 2007. *Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management*. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization.
5. Kwasiborska A., J. Skorupski. 2014. „Metody szeregowania zadań, jako narzędzie rozwiązywania problemu sekwencjonowania samolotów”. [In Polish: „Methods of scheduling, as a tool for solving the problem of sequencing aircraft”]. In *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport* 101: 55-62.
6. van Leeuwen P., H. Hesselink, J. Rohling. 2002. "Scheduling Aircraft Using Constraint Satisfaction". *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 76: 252-268.
7. PAŻP. 2013. *Instrukcja Operacyjna*. [In Polish: PANSA. 2013. *Operational Manual*]. Warszawa: APP Warszawa, Polska Agencja Żeglugi Powietrznej.
8. SESAR. 2013. *Annual Report 2012*. Bruksela: SESAR Joint Undertaking.
9. Skorupski J. 2011. "Method of analysis of the relation between serious incident and accident in air traffic". In *Advances in safety, reliability and risk management*, edited by C. Berenguer, 2393-2401. London: CRC Press/Taylor & Francis.
10. Skorupski J. 2011. „Sieci Petriego jako narzędzie do modelowania procesów ruchowych w transporcie”. [In Polish: “Petri nets as a tool for modeling processes of motor transport”]. In *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport* 78: 69-77.
11. Skorupski J. (red.). 2014. *Współczesne problemy inżynierii ruchu lotniczego – modele i metody*. [In Polish: *Contemporary problems of traffic engineering - models and methods*]. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
12. Sölveling G., J. Clarke. 2014. "Scheduling of airport runway operations using stochastic branch and bound methods". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
13. Tavakkoli-Moghaddam R., M. Yaghoubi-Panah, F. Radmehr. 2012. "Scheduling the sequence of aircraft landings for a single runway using a fuzzy programming approach". *Journal of Air Transport Management* 25: 15-18.
14. Weigang L., B.B. de Souza, A.M.F. Crespo, D.P. 2008. "Alves Decision support system in tactical air traffic flow management for air traffic flow controllers". *Journal of Air Transport Management* 14: 329-336.
15. Zhu K.H., M.E. Berge, A. Haraldsdottir, J.Scharl. 2012. "The Generalized Arrival Planner (GARP) modeling and analysis for arrival planning". In *28th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Brisbane, Australia.