

Nowe trendy badawcze w ruchu lotniczym

Zagadnienia wstępne

Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Streszczenie. W rozdziale przedstawiono ogólny przegląd najważniejszych zagadnień, które z jednej strony stanowią wyzwanie dla współczesnego zarządzania ruchem lotniczym, a z drugiej strony stanowią główny obszar zainteresowania ośrodków badawczych zajmujących się inżynierią ruchu lotniczego. Dokonano podziału tych problemów na kilka grup i przedstawiono ich zarys na tle przeglądu najnowszej literatury. Jako podstawę wszelkich działań służb zarządzania ruchem lotniczym przyjęto potrzebę komunikacyjną pasażera, realizowaną przez przewoźnika lotniczego, przy wykorzystaniu nowoczesnego samolotu jako środka transportowego. Następnie omówiono problemy lotnisk jako punktów węzłowych transportu lotniczego, kwestie organizacji ruchu lotniczego oraz sposób podejścia do nowych wyzwań w zarządzaniu ruchem lotniczym. Rozdział kończy spojrzenie na problematykę wzajemnego oddziaływania na siebie ruchu lotniczego i środowiska.

Słowa kluczowe: inżynieria ruchu lotniczego, zarządzanie ruchem lotniczym, organizacja przestrzeni powietrznej, środowisko, modelowanie

I. Ruch lotniczy jako efekt potrzeby komunikacyjnej pasażera

Rozważając współczesne problemy inżynierii ruchu lotniczego bardzo często koncentrujemy się na systemach technicznych wspomagających kontrolera, systemach łączności ziemia-powietrze czy wręcz na możliwościach zarządzania lotem przez załogę statku powietrznego. Zagadnienia te są oczywiście

Skorupski J. [2014], *Nowe trendy badawcze w ruchu lotniczym. Zagadnienia wstępne*, [w:] Skorupski J. (red.), *Współczesne problemy inżynierii ruchu lotniczego – modele i metody*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

sednem inżynierii ruchu lotniczego. Nie można jednak zapominać, że cały cykl, którego elementami są między innymi: konstrukcja, produkcja i eksploatacja samolotów, projektowanie i budowa systemów w zarządzania ruchem lotniczym, organizacja procesów ruchowych i in., musi być zapoczątkowany przez pasażera, który ma potrzebę komunikacyjną i postanawia zaspokoić ją z wykorzystaniem transportu lotniczego. Kierunki podróży lotniczych, wybór konkretnego portu lotniczego, w którym rozpocznie się i zakończy podróż, generują strumienie statków powietrznych, których obsługa jest przedmiotem zainteresowania inżynierii ruchu lotniczego [Dobruszkes, van Hamme, 2011; Papatheodoru, Arvanitis, 2009]. W tym kontekście, analiza współczesnych problemów w tym obszarze nie może pomijać kwestii związanych z rozwojem rynku lotniczego, jego prognozowaniem, a także wyborem przewoźnika i portu lotniczego przez pasażera [Kotegawa i in., 2010; Matsumoto, 2007]. Zagadnieniom tym poświęcone są początkowe rozdziały niniejszej monografii. W rozdziale 1 zaprezentowano istniejące modele biznesowe w transporcie lotniczym oraz ich ewolucję na rynku, a także wpływ tych procesów na zarządzanie ruchem lotniczym.

W rozdziale 2 przedstawiono metodę analizy jakości usług oferowanych przez port lotniczy. Może ona stanowić wstęp do dalszej analizy działań podejmowanych przez zarządzających portami lotniczymi, zmierzających do poprawy swojej sytuacji konkurencyjnej na rynku lotniczym.

Zapotrzebowanie na usługę transportową jest realizowane przez przedsiębiorstwo komercyjne – przewoźnika lotniczego. Ma on wiele zadań i priorytetów. Jednym z nich jest zarządzanie personelem latającym, który stanowi swoisty łącznik z systemem zarządzania ruchem. W rozdziale 3 omówiono czynnik ludzki w zarządzaniu ruchem lotniczym i zadania przewoźników lotniczych w zakresie zarządzania zasobami ludzkimi. Następnie przedstawiono pokrótce rozmyty model stanu załogi w kontekście bezpieczeństwa ruchu lotniczego oraz metodę oceny stanu załogi – wybrane modele lokalne. Jako przykład zastosowania metody dokonano oceny treningu pilota w aspekcie uzyskiwania wysokich kompetencji

II. Nowe środki transportowe w ruchu lotniczym

Realizacja potrzeby transportowej pasażera przez przewoźnika lotniczego odbywa się za pomocą statków powietrznych, a dokładniej samolotów, których

strumienie stanowią podstawę zainteresowania inżynierii ruchu lotniczego. Współczesne metody, narzędzia i systemy stosowane w zarządzaniu ruchem lotniczym mają swoje korzenie w rozwiązaniach opracowanych kilkadziesiąt lat temu. Na przestrzeni tych lat samoloty znacznie się zmieniły, ich charakterystyki odbiegają istotnie od swych poprzedników. Współczesne samoloty są bardzo drogie, ale za to cechują się długim czasem użytkowania, wysoką produktywnością, niskimi kosztami eksploatacji, wysokim poziomem niezawodności oraz tym, że wyposażane są w coraz nowsze systemy awioniki. Wszystkie te czynniki mają wpływ na współczesne podejście do inżynierii ruchu lotniczego. Wydaje się jednak, że ostatni aspekt z wymienionych będzie w przyszłości odgrywał największą rolę. Widać bowiem wyraźnie, że rola samolotu (i jego załogi) ewoluje – od podmiotu kontroli ruchu lotniczego do aktywnego uczestnika procesu zarządzania ruchem lotniczym. Podstawową przyczyną tego zjawiska jest bogate wyposażenie samolotu w automatyczne, komputerowe systemy kierowania i nadzoru nad lotem, które zawierają informacje bezcenne dla skutecznego i bezpiecznego zarządzania ruchem lotniczym. Z drugiej strony, właściwe zrozumienie sposobu funkcjonowania współczesnego, nowoczesnego samolotu stanowi wyzwanie dla kontrolerów ruchu lotniczego [Milanovski, 2012; Nelson, 2012].

Opracowywanie nowych metod i narzędzi zarządzania ruchem lotniczym wymaga zatem szczegółowej i precyzyjnej wiedzy na temat charakterystyk współczesnego samolotu, kluczowych dla bezpiecznego i ekonomicznego wykonania lotu. W pewnym stopniu wiedzę taką możemy uzyskać dzięki modelowaniu matematycznemu. W rozdziale 4 przedstawiono potencjał tkwiący w zastosowaniu modeli, wykorzystujących teorię sztucznych sieci neuronowych, do opisu ruchu powszechnie wykorzystywanych samolotów komunikacyjnych.

Jednym z istotnych problemów na styku konstrukcji lotniczych i zarządzania ruchem lotniczym jest kwestia zachowania samolotu podczas procedury lądowania, a szczególnie czasu zajętości drogi startowej, który jest wielkością decydującą o przepustowości drogi startowej. Współczesne samoloty są wyposażone w odwracacz ciągu, który można wykorzystać do optymalizacji procesu hamowania pod kątem minimalizacji czasu zajętości drogi startowej. W rozdziale 5 omówiono proces hamowania i wykorzystanie odwracacza ciągu oraz model procesu hamowania uwzględniający siły działające na hamujący samolot. Na podstawie tego modelu i jego odniesienia do zagadnienia przepustowości drogi startowej przedstawiono koncepcję systemu wspomagania procesu hamowania zmierzającego do maksymalizacji przepustowości drogi

startowej. Na obecnym etapie prac przedstawiono kilka możliwych strategii hamowania, dokonano obliczeń czasów i długości dobiegu, które wskazują na istotny potencjał tkwiący w proponowanym systemie.

III. Problemy współczesnych lotnisk

Wzrastający ruch lotniczy stanowi szczególnie duże wyzwanie dla inżynierów ruchu lotniczego zajmujących się organizacją procesów transportowych w rejonach lotnisk. Stąd silny nacisk na wdrażanie rozwiązań, które zwiększają przepustowość lotnisk. Ze względu na nierównomierny rozkład intensywności strumieni ruchu w czasie, konieczne jest tworzenie infrastruktury lotniskowej i procedur, które będą efektywne w okresach największego zapotrzebowania na obsługę. Takie podejście powoduje projektowanie, a później budowanie, infrastruktury w sposób nadmiarowy. Jednocześnie wymaga bardzo poważnych nakładów finansowych.

Jak pokazują badania w tym zakresie, większość lotnisk wykorzystuje swoją infrastrukturę tylko częściowo. Na przykład dla lotnisk wyposażonych w dwie krzyżujące się drogi startowe (podobnie jak lotnisko F. Chopina w Warszawie), prawie wszystkie wykorzystują dostępną zdolność przepustową (opisaną przez wskaźnik CUI – ang. *Capacity Utilisation Index*) tylko w około 40–50 procentach [Forsyth, 2007; Gelhausen i in., 2013]. Poszukuje się zatem rozwiązań o charakterze organizacyjnym, które często nie wymagają dużych nakładów inwestycyjnych, a jednocześnie są bardzo skuteczne, zwłaszcza w okresach spiętrzeń ruchowych. Do takich rozwiązań można zaliczyć wszelkie koncepcje szeregowania strumienia samolotów. Najczęściej rozważa się samoloty lądujące [Andreeva-Mori i in., 2013; Prot i in., 2010]. Obszar ten ciągle generuje nowe problemy badawcze, choćby związane z uwzględnieniem nietypowych kryteriów optymalizacji strumienia, takich jak kryteria środowiskowe, właściwe wykorzystanie personelu naziemnego czy uwzględnienie w modelu samolotów startujących [Boysen, Fliedner, 2011; Capri, Ignaccolo, 2004]

Opracowano już wiele modeli do badania przepustowości części lotniczej lotniska. Ciągle jeszcze pozostają obszary niedostatecznie zbadane. Dotyczy to np. sytuacji nietypowych czy występujących rzadko. Można tu wymienić np. kwestię przepustowości płyt do odladzania czy optymalizacji działania służb zimowego utrzymania lotniska w aspekcie maksymalizacji przepusto-

wości. W rozdziale 6 przedstawiono modele, które wspomagają racjonalizację działania zarządzającego lotniskiem w warunkach niestandardowych.

Inny problem inżynierski związany ze stałym wzrostem wielkości ruchu lotniczego, ale także ze wzrostem wymagań międzynarodowych, to kwestia organizacji obsługi pasażerów. Jednym z elementów wymagających prac badawczych, stworzenia odpowiednich modeli i metod wspierających zarządzających portami lotniczymi jest problematyka kontroli bezpieczeństwa, której poddawani są pasażerowie i ich bagaż. Pojawia się bowiem zadanie odpowiedniej konfiguracji systemu zabezpieczeń lotniska tak, aby spełniał on wszystkie wymogi formalne, zapewniał subiektywne poczucie bezpieczeństwa pasażerów, zapewniał je obiektywnie, a jednocześnie był mało uciążliwy dla osób poddawanych kontroli. Zadanie to może być rozwiązane jedynie wtedy, gdy poznamy zależności pomiędzy poszczególnymi elementami tego systemu, a także siłę wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych na końcową ocenę uzyskanego rozwiązania. Próbę znalezienia odpowiedzi na te pytania przedstawiono w rozdziale 7. Ze względu na brak precyzyjnych danych, zależności i ocen, przedstawiono w nim wykorzystanie metod wnioskowania rozmytego do oceny stanu systemu zabezpieczeń lotniska w odniesieniu do urządzeń wykorzystywanych w systemie kontroli bagażu.

IV. Organizacja ruchu lotniczego

W warunkach ruchu o dużej intensywności ważnym i trudnym problemem jest właściwe planowanie trajektorii lotów tak, aby unikać sytuacji, które mogą zmniejszać przepustowość przestrzeni lub zagrażać bezpieczeństwu ruchu. Dotyczy to zwłaszcza okolic lotnisk, gdzie wykonywane są manewry zniżania i nabierania wysokości. Na przykład krzyżujące się trajektorie mogą powodować problemy z właściwym odseparowaniem poszczególnych samolotów, zwiększać obciążenie kontrolera pracą, prowadzić do wynikowych trajektorii o niekorzystnych parametrach kosztowych. Zagadnienia te są ostatnio często podejmowane w literaturze [np.: Hadjaz i in., 2012; Sama i in., 2012]. Próbę wykorzystania modeli ruchu lotniczego zbudowanych przy użyciu formalizmu sieci Petriego do rozwiązania tego rodzaju zadań przedstawiono w rozdziale 8. Zagadnienia właściwego planowania trajektorii przewijają się także w innych rozdziałach tej monografii. Wynika to z istotności tego problemu, a także z burzliwego rozwoju modeli i metod jemu poświęconych.

Przy rozwiązywaniu problemów organizacji ruchu lotniczego, bardzo istotne jest określenie właściwej funkcji celu, pozwalającej dobrać rozwiązania adekwatne do wielkości ruchu oraz celu optymalizacji. W rozdziale 9 zaproponowano koncepcję wykorzystania pojęcia płynności ruchu lotniczego jako nowej miary charakteryzującej jakość ruchu lotniczego, ale także spełniającej funkcję miary wielkości ruchu w sektorze kontroli. Miara taka jest łatwiejsza do wykorzystania od pojęcia złożoności ruchu, które jest ostatnio coraz częściej używane np. przy ocenie przepustowości sektora [Rahman i in., 2012].

Wyrazem dążenia do poprawy organizacji ruchu lotniczego w obszarze europejskim jest wdrażanie koncepcji SES (ang. *Single European Sky*) czy tworzenie tzw. funkcjonalnych bloków przestrzeni FAB (ang. *Functional Airspace Block*), czyli dużych, ponadnarodowych obszarów o jednolitym zarządzaniu. O skuteczności tych rozwiązań przekonamy się niebawem [Button, Neiva, 2013; Fuerst i in., 2011].

V. Nowe wyzwania w zarządzaniu ruchem lotniczym

Współczesne zarządzanie ruchem lotniczym nie jest możliwe bez wsparcia człowieka (kontrolera) przez odpowiednio skonstruowane i wyposażone systemy komputerowe. Pozyskują one z bardzo wielu źródeł dane o pozycjach statków powietrznych, o zjawiskach pogodowych, o planowanych lotach oraz ograniczeniach ruchowych wynikających między innymi z zamykania pewnych obszarów przestrzeni powietrznej. Dodatkowym źródłem informacji są centra operacyjne przewoźników oraz podmioty zarządzające portami lotniczymi. Wielość źródeł informacji z jednej strony jest konieczna dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa [Finke i in., 2013], z drugiej jednak strony stanowi wyzwanie np. ze względu na trudność syntezy informacji, stopień złożoności technicznej systemu czy problemy we współpracy człowieka z bardzo nowoczesną technologią komputerową [Bekier i in., 2012].

Sercem współczesnych komputerowych systemów zarządzania ruchem lotniczym są jednak właściwie opracowane algorytmy wspomaganie decyzji. Są one różnorodne i liczne. Dotyczą np. wykrywania i rozwiązywania sytuacji konfliktowych w różnych horyzontach czasowych [Chen i in., 2011], ale także rozważanego w rozdziale 10 problemu weryfikacji spójności pomiędzy zaplanowanymi trasami przelotu a dostępnością wymaganych fragmentów przestrzeni powietrznej. Jak pokazuje przeprowadzona analiza, jest jeszcze

sporo do zrobienia – stosowane dotychczas algorytmy nie są wolne od błędów. W tym przypadku około 25% planów lotów trafiających do obsłużenia przez ośrodki kontroli ruchu lotniczego w lokalnych rejonach informacji powietrznej FIR (ang. *Flight Information Region*) wymaga dalszej manualnej koordynacji.

Jednym z zasadniczych elementów współczesnego systemu zarządzania ruchem lotniczym jest planowanie i obsługa trajektorii określonej w czterech wymiarach, to znaczy uwzględniającej czas. Zadanie to jest kosztowne dla dostawcy usług nawigacji lotniczej, jednak wymagane przez regulatora rynku lotniczego i oczekiwane przez przewoźników. W rozdziale 11 przedstawiono ogólną charakterystykę procesu planowania trajektorii 4D. Wskazano na ewolucję podejścia do optymalizacji trajektorii oraz jego wpływu na koszty ponoszone przez przewoźników i dostawców usług nawigacyjnych. Konieczne jest podejmowanie dalszych prac, których efektem będzie precyzyjne określenie niezbędnych zasobów i kosztów ponoszonych przez dostawców usług nawigacyjnych. Pozwoli to na opracowanie metody oceny efektywności ekonomicznej dostawcy usług nawigacyjnych w kontekście obsługi trajektorii 4D. Trajektorie 4D stanowią także nowe wyzwanie polegające na konieczności wypracowania nowych rozwiązań dla problemów dobrze znanych przy tradycyjnym podejściu do organizacji kontroli. Przykładem takiego problemu jest budowa systemu wykrywania i rozwiązywania średnioterminowych konfliktów ruchowych [Ruiz i in., 2013].

Większość wyzwań w inżynierii ruchu lotniczego, także tych omawianych w niniejszej monografii, jest ściśle związanych z posiadaniem przez naziemne służby zarządzania ruchem, precyzyjnych i niezawodnych informacji o różnych parametrach samolotów będących pod ich kontrolą. Jednym z możliwych podejść jest wykorzystywanie do tego celu radarów dozoru wyposażonych w tzw. *Mode S*, to znaczy mogących obsługiwać skomplikowane zapytania o parametry lotu, kierowane do statków powietrznych, a następnie przekazywać je do służb kontroli ruchu lotniczego. Potencjał tkwiący w stosowaniu tego rozwiązania przedstawiono w rozdziale 12.

Zarządzanie ruchem lotniczym od dawna jest w dużym stopniu uzależnione od sprawności i niezawodności systemu łączności. W nowoczesnych systemach kluczową rolę zaczyna odgrywać transmisja dużej ilości danych cyfrowych pomiędzy ośrodkami kontroli ruchu lotniczego, a także w relacji ziemia-powietrze. W rozdziale 13 przedstawiono problemy łączności w ruchu lotniczym, system elektronicznej wymiany danych OLDI (ang. *On-Line Data Interchange*) oraz koncepcję wdrażanej obecnie sieci SWIM (ang. *System Wide*

Information Management). Zadanie to stwarza liczne wyzwania techniczne i ekonomiczne wobec systemów wymiany danych. Przeprowadzona analiza skuteczności działania dostawcy lotniczych usług nawigacyjnych w zakresie zapewnienia systemu wymiany danych w ruchu lotniczym, wskazuje na potrzebę i możliwość globalnej integracji systemów zarządzania ruchem lotniczym oraz technologii przetwarzania i wymiany danych o ruchu lotniczym. Proces ten wpłynie pozytywnie zarówno na jakość działań służb zarządzania ruchem lotniczym ale także poprawi ich efektywność ekonomiczną.

VI. Ruch lotniczy a środowisko

Jednym z kluczowych zadań współczesnej inżynierii ruchu lotniczego jest opracowanie modeli i metod badania oddziaływania ruchu na środowisko naturalne. Pozwolą one na takie kształtowanie strumienia ruchu aby minimalizować negatywny wpływ na środowisko. Zagadnienie to jest w ostatnich latach przedmiotem szczególnego zainteresowania opinii publicznej, ale także środowiska naukowego czy wreszcie służb zarządzania ruchem lotniczym [Girvin, 2009; Netjasov, 2012].

W rozdziale 14 omówiono problem szkodliwych emisji ze strony transportu lotniczego oraz dokonano analizy ruchu lotniczego w TMA Warszawa w aspekcie jakości powietrza. Przedstawiono metody określania poziomu emisji substancji niebezpiecznych i na ich podstawie wyznaczono wielkość emisji substancji szkodliwych (na przykładzie CO₂) w TMA Warszawa. Dokonano adaptacji istniejących modeli rozprzestrzeniania się substancji niebezpiecznych, co pozwoliło na analizę zależności między stosowaną strategią sterowania ruchem lotniczym a jakością powietrza w wybranych punktach referencyjnych. Analiza ta może wspomagać opracowanie metody zarządzania ruchem lotniczym przy kryterium minimalizacji szkodliwego oddziaływania na środowisko.

Z kolei w rozdziale 15 przedstawiono liczne zagrożenia występujące ze strony środowiska naturalnego, które mogą doprowadzić do niebezpiecznych zdarzeń w ruchu lotniczym. Dotyczy to zwłaszcza zagrożenia ze strony ptaków w rejonie lotnisk. W rozdziale omówiono kompleksową metodę zarządzania ryzykiem związanym z tymi zagrożeniami, która ma za zadanie doprowadzić do utrzymywania ryzyka na akceptowalnym poziomie. Obejmuje ona zarówno konstrukcje statków powietrznych, a szczególnie odpowiednie

poziomy wytrzymałości elementów płatowca i silników, jak i działania ściśle związane z zarządzaniem ruchem lotniczym, polegające głównie na ograniczaniu prędkości do 250 węzłów na wysokości poniżej 10000 stóp czy procedury związane z funkcjonowaniem lotniska. Programy kontroli środowiska ograniczające obecność ptaków powinny uwzględniać zarówno położenie lotniska, zachowanie i występowanie ptaków oraz charakterystykę siedlisk wraz z możliwością ich modyfikacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Andreeva-Mori A., Suzuki S., Itoh E. [2013], *Rule derivation for arrival aircraft sequencing*, Aerospace Science and Technology, 30(1), 200-2019.
2. Bekier M., Molesworth B.R.C., Williamson A. [2012], *Tipping point: The narrow path between automation acceptance and rejection in air traffic management*, Safety Science, 50(2), 259-265.
3. Button K., Neiva R. [2013], *Single European sky and the functional airspace blocks: Will they improve economic efficiency?*, Journal of Air Transport Management, 33, 73-80.
4. Boysen N., Flidner M. [2011], *Scheduling aircraft landings to balance workload of ground staff*, Computers & Industrial Engineering, 60, 206-217.
5. Capri S., Ignaccolo M. [2004], *Genetic algorithms for solving the aircraft-sequencing problem: the introduction of departures into the dynamic model*, Journal of Air Traffic Management, 10, 345-351.
6. Chen X.W., Landry S.J., Nof S.Y. [2011], *A framework of enroute air traffic conflict detection and resolution through complex network analysis*, Computers in Industry, 62(8-9), 787-794.
7. Dobruszkes F., van Hamme G. [2011], *The impact of the current economic crisis on the geography of air traffic volumes: An empirical analysis*, Journal of Transport Geography, 19(6), 1387-1398.
8. Finke C., Butts J., Mills R., Grimaila M. [2013], *Enhancing the security of aircraft surveillance in the next generation ATC*, International Journal of Critical Infrastructure Protection, 6(1), 3-11.
9. Forsyth P. [2007], *The impacts of emerging aviation trends on airport infrastructure*, Journal of Air Transport Management, 13(1), 45-52.
10. Fuerst F., Gross S., Klose U. [2011], *The sky is the limit? the determinants and constraints of European airports commercial revenues*, Journal of Air Transport Management, 17(5), 278-283.

11. Gelhausen M.C., Berster P., Wilken D. [2013], *Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic?*, Journal of Air Transport Management, 28(0), 3-13.
12. Girvin R. [2009], *Aircraft noise-abatement and mitigation strategies*, Journal of Air Transport Management, 15(1), 14-22.
13. Hadjaz A., Marceau G., Saveant P., Schoenauer M. [2012], *Increasing Air Traffic: What is the Problem?*, Second SESAR Innovation Days, 27-29 November 2012, SESAR WPE Long Term Innovative Research.
14. Kotegawa T., de Laurentis D.A., Sengstacken A. [2010], *Development of network restructuring models for improved air traffic forecasts*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 18(6), 937-949.
15. Matsumoto H. [2007], *International air network structures and air traffic density of world cities*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 43(3), 269-282.
16. Milanovski D. [2012], *Training aircraft performance for modern/future ATC systems*, Hindsight, 16, 36-39.
17. Nelson H. [2012], *Automation, workload and safety*, Hindsight, 16, 40-43.
18. Netjasov F. [2012], *Contemporary measures for noise reduction in airport surroundings*, Applied Acoustics, 73(10), 1076-1085.
19. Papatheodorou A., Arvanitis P. [2009], *Spatial evolution of airport traffic and air transport liberalisation: The case of Greece*, Journal of Transport Geography, 17(5), 402-412.
20. Prot D., Rapine C., Fondacci R. [2010], *Using graph concepts to assess the feasibility of a sequenced air traffic flow with low conflict rate*, European Journal of Operational Research, 207(1), 184-196.
21. Rahman A., Borst C., Mulder M., van Paassen M.M. [2012], *Measuring Sector Complexity: Solution Space-Based Method*, [w:] Magister T. (red.), *Advances in Air Navigation Services*, InTech, Rijeka.
22. Ruiz S., Piera M.A., Del Pozo I. [2013], *A MTCD&R system for terminal maneuvering area based on 4D trajectories*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 26(0), 396-417.
23. Sama M., D'Ariano A., Pacciarelli D. [2012], *Optimal aircraft traffic flow management at a terminal control area during disturbances*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, 54, 460-469.