

Operacyjne i teoretyczne aspekty nowoczesnego zarządzania ruchem lotniczym

Anna Kwasiborska, Michał Kozłowski, Jacek Skorupski, Anna Stelmach



dr inż. Anna Kwasiborska

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego



prof. nzw. dr hab. inż. Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego



dr inż. Michał Kozłowski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego



dr hab. inż. Anna Stelmach

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego

Zapewnienie bezpiecznego i sprawnego ruchu lotniczego jest zadaniem złożonym, polegającym na pełnej koordynacji ruchowej samolotów lądujących i startujących. Istnieje szereg zmian, które należy wprowadzić w działalność operacyjną, celem uzyskania większej przepustowości portów lotniczych. Nowoczesne systemy zarządzania przylotami uwzględniają sekwencjonowanie ruchu lotniczego na wcześniejszym etapie niż jest to realizowane obecnie. W rozszerzonym systemie AMAN funkcjonuje rozszerzenie horyzontu planowania ruchu lotniczego do co najmniej 180-200 NM [14]. Planowanie operacji lądowania musi być połączone z planowaniem ruchu naziemnego np. A-SMGCS. Systemy te umożliwiają i ułatwiają prowadzenie szeregu wzajemnie ze sobą powiązanych działań na polu ruchu naziemnego. Dotyczy to kierowania ruchem samolotów i pojazdów naziemnych, prowadzenia samolotów od drogi startowej po wylądowanie do miejsca postoju i z powrotem na drogę startową, operacje kołowania a także zapobieganie kolizjom pomiędzy samolotami, samolotami a pojazdami oraz samolotami i pojazdami a przeszkodami. Zaawansowany system kierowania i kontroli ruchu naziemnego A-SMGCS (ang. Advanced Surface Movement Guidance and Control System) pozwala na utrzymanie deklarowanej przepustowości we wszystkich warunkach pogodowych [2]. Koncepcja wspólnego systemu podejmowania decyzji w porcie lotniczym (A-CDM) definiowany jest jako proces, w zakresie którego

decyzje operacyjne dotyczące systemu zarządzania przepływem ruchu lotniczego i przepustowością w portach lotniczych [1]. Podejmowane są w oparciu o interakcję między zainteresowanymi stronami zaangażowanymi w działalność operacyjną i innymi podmiotami uczestniczącymi w ruchu lotniczym.

Działania te poparte metodami matematycznymi pozwalają na osiągnięcie zamierzonych celów. Wśród nich wyróżnić można podejście wielokryterialne, wykorzystanie sztucznej inteligencji na przykładzie sztucznej sieci neuronowej [22] a także próbę zastosowanie sieci Petriego do sekwencjonowania samolotów lądujących [24].

Centralny Plan Zarządzania Ruchem Lotniczym w Europie

Polityka i strategię transportowe UE odnosząc się m.in. do potrzeb i oczekiwań społecznych obywateli UE, priorytetowe znaczenie nadają sprawom bezpieczeństwa, punktualności, efektywności kosztowej i ochrony środowiska naturalnego [5]. W zakresie transportu lotniczego wyznaczają one kierunki aktualnie realizowanych projektów i przedsięwzięć o zasięgu paneuropejskim, których zamierzeniem jest osiągnięcie określonych celów ogólnych na każdym poziomie zarządzania przepływem ruchu lotniczego oraz obsługą ruchu lotniskowego i naziemną przewozu lotniczego w portach lotniczych. W tym aspekcie kluczowe znaczenie ma projekt

utworzenia Jednolitej Europejskiej Przestrzeni Powietrznej (ang. Single European Sky SES) [5], regulowany przepisami Rozporządzeń [13]. Komponent techniczny tworzenia i filar technologiczny funkcjonowania SES stanowi projekt systemu zarządzania ruchem lotniczym nowej generacji w Europie (ang. Single European Sky ATM Research – SESAR), który do 2020 r. ma zapewnić optymalną i wysoce wydajną infrastrukturę zarządzania ruchem modernizacji systemu zarządzania ruchem lotniczym.

Projekt ten Komisja Europejska, we współpracy m.in. z EASA i EUROCONTROL poddała przeglądowi z uwzględnieniem przepisów Rozporządzeń (WE) nr: 549/2004, 550/2004 i 409/2013, na podstawie wyników którego zostało wydane Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) NR 716/2014 z dnia 27 czerwca 2014 r. w sprawie ustanowienia wspólnego projektu pilotażowego wspierającego realizację centralnego planu zarządzania ruchem lotniczym w Europie. Rozporządzenie to ustanawia pierwszy wspólny projekt pilotażowy, w przedmiocie wykonania którego mają zostać zrealizowane określone funkcje ATM, dokonujące zasadniczych zmian operacyjnych określonych w Centralnym Planie ATM w Europie [11]. Zakres stosowania i wykonania tego Rozporządzenia dotyczy w szczególności Europejskiej Sieci Zarządzania Ruchem Lotniczym (ang. European Air Traffic Management Network – EATMN) i systemów służb żeglugi powietrznej, wskazanych w załączniku I do Rozporządzenia (WE) nr 552/2004 [12].

Rozszerzony system zarządzania przylotami – AMAN

W zakresie tej funkcji Rozporządzenie wyznacza europejskie porty lotnicze podlegające obowiązkowi wdrożenia rozszerzonego systemu zarządzania przylotami [3] (ang. Arrival Management – AMAN) i nawigacji opartej na charakterystykach (ang. Performance Based Navigation – PBN) w rejonach kontrolowanych lotnisk, celem zwiększenia dokładności nawigacji statku powietrznego w fazie podejścia oraz wspomagania i rozszerzenia zakresu sekwencjonowania (jeszcze w fazie przelotu) przylotowego ruchu lotniczego na odległość do 200 NM od punktu rozpoczęcia zniżania, określonego w standardowych instrumen-

talnych procedurach dolotu [14]. Nawigacja PBN, to nawigacja obszarowa, oparta na specyfikacjach charakterystyk dla statków powietrznych operujących po trasie lotu, zgodnie z procedurą podejścia wg przyrządów lub w wyznaczonej przestrzeni powietrznej. Wymagania charakterystyk dotyczące dokładności, integralności, ciągłości, dostępności i funkcjonalności, wymaganej dla zaplanowanej operacji określone są w specyfikacji nawigacji, z uwzględnieniem specyfikacji przestrzeni, w której operacja ma być wykonywana. Zgodnie z przepisami Rozporządzenia, wdrożenie i stosowanie nawigacji PBN w rejonach TMA o największym natężeniu ruchu obejmuje opracowanie i wdrożenie paliwooszczędnych i przyjaznych dla środowiska naturalnego standardowych procedur dolotów i podejścia zgodnych ze specyfikacją RNP-APCH (dokładność ± 1 NM dla co najmniej 95 % czasu lotu) i odlotów (SID) zgodnych ze specyfikacją RNP1-SID (dokładność $\pm 0,3$ NM dla co najmniej 95 % czasu lotu w segmencie podejścia końcowego). Przepisy Rozporządzenia określają również inne, szczegółowe specyfikacje techniczno-operacyjne i systemowe systemu AMAN [14].

Integracja i przepustowość portu lotniczego

Wyznaczane są również europejskie porty lotnicze podlegające obowiązkowi wdrożenia systemu zarządzania odlotami [23] (ang. Departure Management – DMAN), który ma być zsynchronizowany z systemem sekwencjonowania przed odlotem, system zarządzania odlotami obejmującym ograniczenia w zarządzaniu ruchem naziemnym, zautomatyzowaną pomocą dla kontrolera w zakresie planowania i ustalania przebiegu tras w ruchu naziemnym oraz sieci bezpieczeństwa portów lotniczych. Ogólnym celem DMAN jest maksymalizacja wielkości przepływu ruchu na drodze startowej poprzez ustanowienie sekwencji przy minimalnych zoptymalizowanych separacjach. W sensie metodologicznym, cel ten ma być osiągany poprzez minimalizację czasów kołowania, zwiększenie stopnia przestrzegania przydziałów czasu na start lub lądowanie dokonywanych w zakresie zarządzania przepływem ruchu lotniczego (ATFM-Slot) oraz zwiększenie przewidywalności rzeczywistych czasów odlotu. Algorytmy DMAN opierają się na wynikach kalkulacji:

- docelowego czasu startu (ang. Target Take-Off Time – TTOT);
- docelowego czasu zatwierdzenia uruchomienia (ang. Target Start up Approval Time TSAT);
- docelowego czasu odblokowania

(ang. Target Off-Block Time – TOBT); uwzględniających procedury i zasady (m.in.: czas zajęcia drogi startowej – ROT, przestrzeganie przydziałów czasu na start lub lądowanie, trasy odlotu, preferencje użytkowników przestrzeni powietrznej, ograniczenia środowiskowe w ruchu lotniskowym) oraz aktualne ograniczenia ruchowe i zmiany operacyjne (m.in.: niekorzystne warunki meteorologiczne, w tym konieczność odladania statków powietrznych i wprowadzenie LVP, czasowe ograniczenia przepustowości dostępności elementów pola manewrowego, zmiany przydziału elementów scentralizowanej infrastruktury).

Przepisy Rozporządzenia określają również inne, szczegółowe specyfikacje techniczno-operacyjne i systemowe systemu DMAN, w tym wymagania integracji DMAN z system wspólnego podejmowania decyzji w portach lotniczych (ang. Airport Collaborative Decision Making – A-CDM) oraz z zaawansowanym systemem kontroli i kierowania ruchem w polu manewrowym lotniska (ang. Advanced Surface Movement Guidance and Controls Systems – A-SMGCS) [2].

W zakresie tej funkcji Rozporządzenie wyznacza również europejskie porty lotnicze podlegające obowiązkowi wprowadzenia do stosowania separacji czasowej dla podejścia końcowego (ang. Time-Based Separations – TBS) zamiast separacji odległościowych w fazie podejścia końcowego. Istotą koncepcji TBS jest stosowanie na podejściu separacji mniejszych niż 3 NM (lub 2,5 NM), opartych na kalkulacjach prędkość – czas, z uwzględnieniem poprawek na czołową składową wektora wiatru przyziemnego. Stosowanie separacji TBS wymaga zapewnienia kontrolerowi informacji o odległościach statków powietrznych i warunkach wiatrowych (prędkość i zwrot wektora wiatru przyziemnego) na podejściu. Informacje te, łącznie z minimami separacji (zależnych od kategorii turbulencji w śladzie aerodynamicznym) odczytywanymi z radaru.

Przepisy Rozporządzenia określają specyfikacje techniczno-operacyjne i systemowe odnośnie stosowania separacji TBS, w tym dotyczące integracji z sieciami bezpieczeństwa w porcie lotniczym, obejmującymi moduł automatycznego monitorowania i ostrzegania o naruszeniu separacji oraz dotyczące zapewnienia kompatybilności systemów przetwarzania danych o locie i AMAN z narzędziami pomocniczymi TBS i umożliwienia zmiany stosowanych separacji z czasowych na odległościowe na podstawie odczytu radarowego [14].

Integracja systemów i procesów zarządzania ruchem

Zapewnienie skuteczności, efektywności i niezawodności stosowania systemów AMAN, DEMAN i separacji TBS wymaga ich łącznego stosowania. Określone w Rozporządzeniu wymagania odpowiedniej integracji z A-CDM i A-SMGCS, mają na celu zapewnienie skutecznej koordynacji procesów obsługi naziemnej i zarządzania (planowania, kalkulacji, aktualizacji) czasami faz obsługi i ruchu lotniskowego oraz bezpieczeństwa i sprawności przepływu w polu ruchu naziemnego.

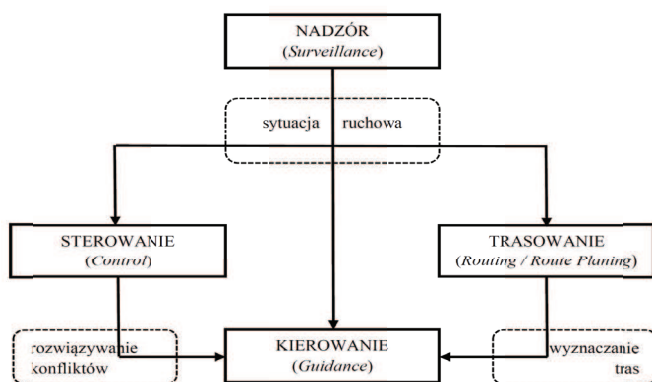
System wspólnego podejmowania decyzji w porcie lotniczym – A-CDM

Koncepcja CDM narodziła się na początku lat 90-tych w Stanach Zjednoczonych z inicjatywy grupy przewoźników lotniczych. Inicjatywa ta wynikała ze stwierdzenia niedostatecznej wymiany i informacji i współpracy operacyjnej pomiędzy zarządzającymi portami lotniczymi, służbami żeglugi powietrznej, agentami obsługi naziemnej i przewoźnikami lotniczymi. Koncepcja CDM została rozwinięta przez EUROCONTROL [1]. Obecnie, A-CDM definiowany jest jako proces, w zakresie którego decyzje operacyjne dotyczące systemu zarządzania przepływem ruchu lotniczego i przepustowością (ang. Air Traffic Flow and Capacity Management – ATFCM) w portach lotniczych podejmowane są w oparciu o interakcję między zainteresowanymi stronami zaangażowanymi w działalność operacyjną i innymi podmiotami uczestniczącymi w ATFCM, a którego celem jest redukcja opóźnień, zwiększenie przewidywalności zdarzeń i optymalizacja wykorzystania zasobów. Wdrożenie A-CDM w głównych europejskich portach lotniczych jest jednym z zadań w ramach realizacji SESAR (Pakiet WP6 „Airport Operations”) [15]. Idea zarządzania ruchem lotniczym „gate-to-gate” w ramach SES wymaga od A-CDM m.in. zintegrowania procesów realizowanych w porcie lotniczym z procesem zarządzania europejską przestrzenią powietrzną i ruchem lotniczym.

Do grona europejskich portów lotniczych dokonujących pełnego wdrożenia należą: Amsterdam Schiphol, Frankfurt, Helsinki, Londyn Gatwick, Londyn Heathrow, Paryż, Praga i Zurich.

Zaawansowany system kontroli i kierowania ruchem w polu manewrowym lotniska

Wdrożenie system A-SMGCS ma na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa



1. Schemat funkcjonalny A-SMGCS

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

operacji naziemnych w ruchu lotniskowym, w szczególności poprzez zapewnienie utrzymania zdolności operacyjnych lotniska w warunkach ograniczonej widzialności [2].

Funkcje systemu zostały zdefiniowane przez ICAO na 4 poziomach (rys. 1):

1. Nadzór (ang. Surveillance), polegający na zapewnieniu kontrolerom oraz pilotom i kierującym pojazdami pełnej informacji o aktualnej sytuacji operacyjnej, poprzez zobrazowanie ze wskazaniem pozycji wszystkich statków powietrznych i pojazdów, łącznie z ich identyfikacją.
2. Sterowanie (ang. Control), zapewniające wykrywanie konfliktów ruchowych i alarmowanie o potencjalnych konfliktach na drogach startowych i drogach kołowania oraz w całym w całym polu manewrowym.
3. Trasowanie (ang. Routing / Route Planning), polegające wyznaczaniu optymalnej trasy ruchu odrębnie dla każdego statku powietrznego i pojazdu.
4. Kierowanie (ang. Guidance), polegające na udzielaniu wskazówek pilotom i kierowcom pojazdów odnośnie ruchu po wyznaczonej trasie.

EUROCONTROL zdefiniowała 4 poziomy wdrożenia A-SMGCS [6]:

Poziom I – zapewnia nadzór kontrolera, dostarcza systemy wizualizacji i procedury, umożliwiając pełny przekaz informacji o sytuacji operacyjnej.

Poziom II – jak na Poziomie I oraz automatyczne funkcje monitorowania i ostrzegania, w tym przewidywania konfliktów na drogach startowych w użyciu.

Poziom III i IV – zapewnia funkcje trasowania, automatycznego kierowania oraz planowania.

Podstawową zaletą operacyjną A-SMGCS jest niezależność od warunków meteorologicznych, a tym samym zapewnienie wykonywania operacji lotniczych w warunkach ograniczonej widzialności bez

obniżenia przepustowości. Istotną zaletą jest możliwość zmniejszenia separacji pomiędzy lądującymi statkami powietrznymi, jak również możliwość bieżącego i pełnego monitorowania w czasie rzeczywistym sytuacji operacyjno-ruchowej na polu manewrowym [7].

Metody wspomagające zarządzanie operacjami lotniczymi

Organizacja ruchu lotniczego musi być wspomagana metodami matematycznymi w celu uzyskania założonych celów [19]. Wśród metod, wybranych przez autorów, które doskonale wpisują się w zagadnienie zarządzania ruchem lotniczym są metody: optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystanie sztucznej inteligencji na przykładzie sztucznej sieci neuronowej oraz sieci Petriego w sekwencjonowaniu samolotów lądujących.

Optymalizacja wielokryterialna

Problemy optymalizacyjne są zagadnieniami bardzo złożonymi, wprowadzając więcej niż jedno kryterium niebędące współbieżne. W przypadku niemożności wyznaczenia rozwiązania optymalnego, w przypadku zadań programowania wielokryterialnego wyznacza się rozwiązanie, które w pewnym stopniu optymalizuje wszystkie kryteria. Ekspansja optymalizacji wielokryterialnej obejmuje coraz to większe obszary wiedzy oraz dziedziny życia społecznego. Czynniki były również działania wykorzystania optymalizacji wielokryterialnej w ruchu lotniczym. Problematyka wielokryterialna rozpatrywana była w pracy [9] polegająca na uwzględnieniu sekwencjonowania i planowanie lądowań samolotów tak, aby zminimalizować opóźnienia, przy jednoczesnym spełnieniu separacji między samolotami. W pracy tej podano możliwe rozwiązania problemu lądowania samolotu przy użyciu programowania dynamicznego, poprzez grupowanie według typów samolotu lub

poprzez narzucenie ograniczeń zmieniając kolejność wykonywanych operacji lotniczych [4]. Solveling et al. [16] formułuje i rozwiązuje różne wersje problemu lądowania samolotu przy użyciu obiektywnych funkcji, które łączą opóźnienie, zużycie paliwa i aspekty środowiskowe. Sformułowanie problemu lądowania samolotu jako problemu optymalizacji wielokryterialnej pozwala zidentyfikować kryteria i uzyskać kompromis między różnymi uczestnikami ruchu lotniczego. Optymalizacja wielokryterialna jest najbardziej rzeczywistą oraz najbardziej naturalną koncepcją podejmowania decyzji.

Optymalizacja wielokryterialna może być zdefiniowana jako próba znalezienia wektora zmiennych decyzyjnych:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_k],$$

który spełnia określone warunki:

$$g_i(x) \geq 0 \quad (i = 1 \dots m),$$

$$h_i(x) = 0 \quad (i = 1 \dots p)$$

oraz optymalizuje wektor funkcyjny, którego elementy reprezentują funkcje celu:

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$$

Operację poszukiwania wartości zmiennych decyzyjnych $x_1, x_2, \dots, x_n$, które maksymalizują lub minimalizują funkcję celu zapisuje się w sposób następujący:

$$(max) z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ lub}$$

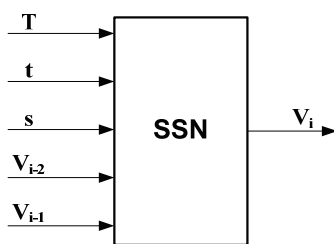
$$(min) z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Optymalizacja ruchu lotniczego polega na znalezieniu takiego rozwiązania, które byłoby akceptowalne dla każdej funkcji celu. Kryteria w ruchu lotniczym mogą być związane są z:

- minimalizacją opóźnień,
- maksymalizacją przepustowości dróg startowych,
- minimalizacją oddziaływania na środowisko zarówno w przypadku zanieczyszczeń oraz hałasu,
- minimalizacją długości kolejki samolotów do startu.

Wykorzystanie sztucznej inteligencji na przykładzie sztucznej sieci neuronowej

Obecnie sieci neuronowe są narzędziem pozwalającym na odwzorowanie zjawisk, dla których nie znana jest postać funkcji ich opisujących, a znane są jedynie wejścia i wyjścia zmierzone dla obiektu rzeczywistego [21]. W porównaniu z dotychczas istniejącymi m.in. metodami modelowania liniowego czy nieliniowego, sieci neuronowe mają dużo większe możliwości odwzorowania zjawisk nieliniowych. Sztuczne sieci neuronowe są uznaną metodą wyznaczania modeli matematycznych obiektów i procesów. Podczas określania struktur sieci oraz ich uczenia, dla modeli opisujących poszczególne fazy lotu, przyjmowano różne wartości współczynnika momentu η ,



2. Model neuronowy odwzorowujący przebieg prędkości lotu samolotu z uwzględnieniem czasu trwania operacji. Źródło: opracowanie własne

współczynnika uczenia α oraz jej struktury tj. liczby warstw ukrytych, liczby neuronów w tych warstwach oraz liczby danych N [20]. Modelowanie przeprowadza się dla przypadku rejestracji wykonanej w czasie t , wykorzystując jednocześnie dane z rejestracji w czasie $t - \Delta t$ i $t - 2\Delta t$, co odpowiada wartościom prędkości w $i-2$ i $i-1$ chwili czasowej.

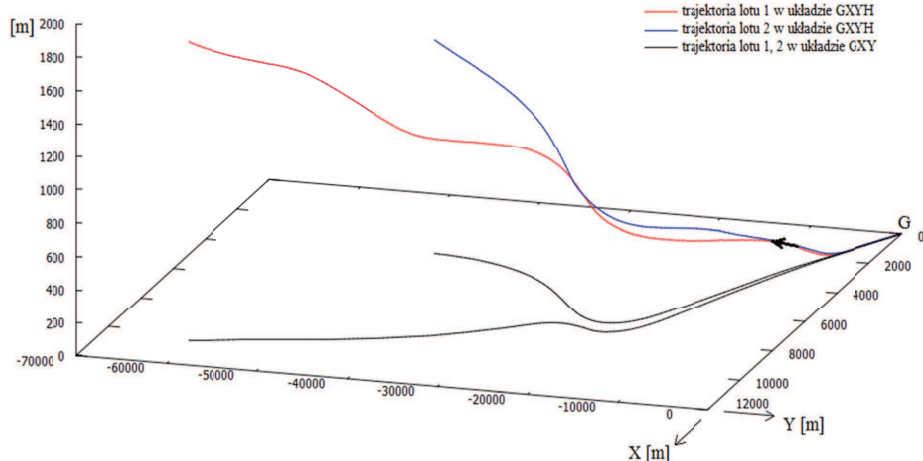
Model neuronowy uwzględniający n - lotów przedstawia rys. 2.

Wielkościami wejściowymi w tym modelu są:

- T - czas trwania operacji,
- t - bieżący czas lotu,
- s - segment,
- V_{i-2} - prędkość $i-2$ chwili czasowej,
- V_{i-1} - prędkość $i-1$ chwili czasowej.

Wielkością wyjściową jest prędkość w i -tej chwili czasowej V_i .

Jednym z istotnych elementów badań z



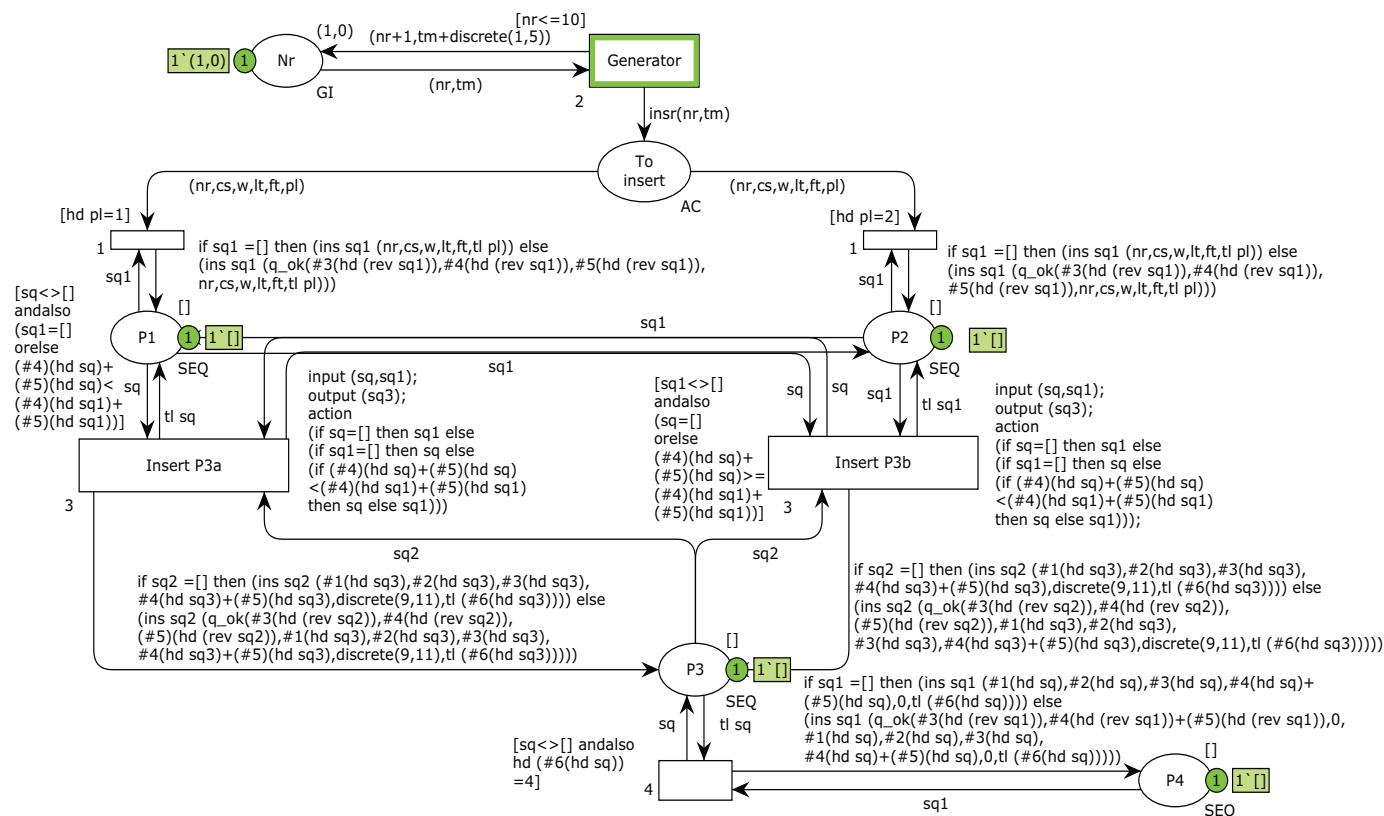
3. Tor lotu samolotu przykładowo dla dwóch lotów w fazie startu. Źródło: opracowanie własne.

użyciem modelu i techniki symulacyjnej jest wyznaczenie kinematycznych równań ruchu. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe trajektorie z dwóch lotów dla fazy startu samolotu.

Możliwość odwzorowania parametrów lotu samolotu z określoną dokładnością daje podstawę do prowadzenia badań szeregowania oraz bezpieczeństwa, przepustowości, oddziaływania na środowisko, procedur ruchu lotniskowego kontrolowanego (prędkości i wysokości lotu, minima separacji) i wykorzystania infrastruktury lotniskowej (lotnicze urządzenia nawigacyjne, parametry elementów infrastruktury pola manewrowego lotniska).

Wykorzystanie sieci Petriego w sekwencjonowaniu samolotów lądujących

Algorytmy sekwencjonowania samolotów lądujących muszą uwzględniać wiele różnych czynników, takich jak kategorie wagowe samolotów, czasy przelotu poszczególnych odcinków, warunki zewnętrzne (meteorologiczne), kształt i strukturę przestrzeni powietrznej itp. Doskonałym narzędziem do realizacji tych celów mogą być sieci Petriego [8]. Sieć Petriego jest to sieć składająca się z dwóch rozłącznych zbiorów



4. Fragment sieci Petriego do wspomagania w zakresie sekwencjonowania samolotów lądujących na lotnisku Chopina w Warszawie.

rów wierzchołków zwanych miejscami i tranzycjami. Wierzchołki te połączone są łukami, które określają ich wzajemne relacje. Najważniejszą cechą sieci Petriego, odróżniającą je od innych struktur grafowych jest możliwość zdefiniowania tzw. znaczników (żetonów), które związane są z miejscami, ale poprzez tranzycje mogą się przemieszczać po sieci. W ten sposób odwzorowuje się dynamikę modelowanego systemu [17].

Zastosowanie sieci Petriego pozwala wyznaczyć przepustowość elementów rozpatrywanego systemu, znaleźć wąskie gardła, a co najważniejsze określić sposoby łagodzenia zaistniałych problemów.

Rys. 4 przedstawia przykładowy, niewielki fragment sieci Petriego, która została stworzona przy wykorzystaniu pakietu CPN Tools 4.0 [10] na potrzeby analizy procesu sekwencjonowania statków powietrznych w rejonie kontrolowanym lotniska TMA Warszawa.

Podsumowanie

Autorzy przedstawili nowoczesne systemy zarządzania ruchem lotniczym. Zapewnienie bezpiecznego i sprawnego ruchu lotniczego wiąże się z wprowadzeniem szeregu systemów, które zostały krótko scharakteryzowane. Nowoczesne systemy, takie jak systemy zarządzania operacjami startu i lądowania muszą być połączone z planowaniem ruchu naziemnego np. A-SMGCS oraz koncepcją wspólnego systemu podejmowania decyzji w porcie lotniczym A-CDM.

Podejście metodologiczne z wykorzystaniem nowych metod rozwiązywania problemów pozwala na modelowanie procesów ruchu w porcie lotniczym jak i w rejonie lotniskowym. Działania poparte zapisami matematycznymi umożliwiają optymalizowanie ruchu lotniczego. Optymalizacja wielokryterialna pozwala na zdefiniowanie wielu kryteriów i osiągnięcie rozwiązania. Wykorzystanie sztucznej inteligencji na przykładzie sztucznej sieci neuronowej umożliwia określenie trajektorii lotu samolotu, co jest ważnym zagadnieniem w sekwencjonowaniu samolotów. Narzędziem w sekwencjonowaniu samolotów mogą być sieci Petriego. Sieci Petriego stanowią poważne narzędzie do modelowania procesów ruchowych w transporcie, w tym ruchu w rejonie lotniska. Dają także możliwość wspomagania służb zarządzających ruchem w zakresie szeregowania samolotów lądujących, ale także innych procesów omawianych, np. ruchu naziemnego [18].

Materiały źródłowe

- [1] Airport Collaborative Decision Making – Improving efficiency while helping the environment, ACI Europe & EUROCONTROL 2010.
- [2] Advanced Surface Movement Guidance and Controls Systems (A-SMGCS) Manual, ICAO Doc 9830 AN/452.
- [3] Arrival Manager – Implementation Guidelines and Lessons Learned, European Organization for the Safety of Air Navigation, Eurocontrol, 2010.
- [4] Balakrishnan, H., Chandran, B. (2010), Algorithms for Scheduling Runway Operations under Constrained Position Shifting. *Operations Research*, 58(6), 1650-1665
- [5] Biała Księga Transportu UE „Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu” [KOM(2011) 144].
- [6] Deau R., Gotteland J.-B., Durand N.: Runways sequences and ground traffic optimization, *International Conference on Research in Air Transportation*, US 2008.
- [7] Definition of A-SMGCS Implementation Levels ed 1.2., EUROCONTROL 2010.
- [8] Jensen, K. Coloured Petri Nets. Basic concepts, analysis methods and practical use. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [9] Psaraftis, H.N. (1978), A Dynamic Programming Approach to the Aircraft Sequencing Problem. *FTL R78-4*, Cambridge, MA
- [10] Ratzer, A.V., Wells, L., Lassen, H.M., Laursen, M., Qvortrup, J. F., Stissing, M. S., Westergaard, M., Christensen, S., & Jensen, K. CPN tools for editing, simulating, and analysing coloured Petri nets. *Proc. of 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003)*, Lecture Notes in Computer Science 2679, 450-462, 2003.
- [11] Rozporządzenie Komisji (WE) Nr 2150/2005 z dnia 23 grudnia 2005 r. ustanawiające wspólne zasady elastycznego użytkowania przestrzeni powietrznej.
- [12] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) Nr 552/2004 z dnia 10 marca 2004 r. w sprawie interoperacyjności Europejskiej Sieci Zarządzania Ruchem Lotniczym (Rozporządzenie w sprawie interoperacyjności).
- [13] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) Nr 1070/2009 z dnia 21 października 2009 r. zmieniające rozporządzenia (WE) nr 549/2004, (WE) nr 550/2004, (WE) nr 551/2004 oraz (WE) nr 552/2004 w celu poprawienia skuteczności działania i zrównoważonego rozwoju europejskiego systemu lotnictwa.
- [14] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) Nr 716/2014 z dnia 27 czerwca 2014 r. w sprawie ustanowienia wspólnego projektu pilotażowego wspierającego realizację centralnego planu zarządzania ruchem lotniczym w Europie.
- [15] SESAR Joint Undertaking, Programme WP6 – Airport Operations.
- [16] Solveling, G., Solak, S., Clarke, J.-P., Johnson, E. (2011), Scheduling of Runway Operations for Reduced Environmental Impact. *Transportation Research Part D*, 16(2), 110-120
- [17] Skorupski J. Sieci Petriego jako narzędzie do modelowania procesów ruchowych w transporcie. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 78, 69-77, 2011.
- [18] Skorupski J. Method of analysis of the relation between serious incident and accident in air traffic. In C. Berenguer (Ed.), *Advances in safety, reliability and risk management* (pp. 2393-2401). London: CRC Press/Taylor & Francis, 2011.
- [19] Skorupski J. Kwasiborska A. Metody szeregowania zadań, jako narzędzie rozwiązywania problemu sekwencjonowania samolotów, w: *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, nr 101, ss. 55-62, 2014.
- [20] Stańczyk P., Stelmach A.: The use of on-board flight recorder in the modeling process of aircraft landing operations, *Safety and Reliability. Methodology and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 2029-2033, London 2014
- [21] Stelmach A.: Identyfikacja modeli matematycznych faz lotu samolotu, OWPW, Warszawa, 2014.
- [22] Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Kraków 1993.
- [23] The EUROCONTROL DMAN Prototype – Description of DMAN in the A-CDM context, EUROCONTROL 2010.
- [24] Werther, N., Moehlenbrink, C., & Rudolph, M. Colored Petri Net based formal airport control model for simulation and analysis of airport control processes. In Vincent G. Duffy (Ed.), *Proceedings of the 1st International Conference on Digital Human Modeling (ICDHM'07)*, 1027-1036, 2007.