

**Jacek Skorupski**

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

## **MODELOWANIE PROCEDUR STARTU I LĄDOWANIA Z WYKORZYSTANIEM SIECI PETRIEGO**

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono koncepcję modelowania ruchu lotniskowego przy wykorzystaniu kolorowanych, czasowych, stochastycznych sieci Petriego. Na przykładzie modelu lotniska z jedną drogą startową i jednoczesnymi operacjami startu i lądowania pokazano możliwości stosowania tych modeli w badaniach procesów ruchowych w transporcie. Model zastosowano do wyznaczania średniego czasu opóźnienia operacyjnego, przy przyjętych procedurach ruchowych, w zależności od wielkości obsługiwanego ruchu.

**Słowa kluczowe:** modelowanie procesów ruchowych, sieci Petriego, ruch lotniczy

### **1. WPROWADZENIE**

Lotnisko stanowi punkt węzłowy transportu lotniczego. Mają tu miejsce liczne procesy związane z obsługą pasażerów i samolotów, które w dużej mierze decydują o sprawnej, terminowej i bezpiecznej usłudze transportowej. W procesy te zaangażowane są zaawansowane środki techniczne, organizacyjne oraz ludzie, co powoduje, że lotnisko stanowi skomplikowany, hierarchiczny system antropotechniczny. Sprawne współdziałanie wszystkich elementów tego systemu jest niezbędne do uzyskania wysokiego poziomu bezpieczeństwa, który jest jednym z podstawowych czynników konkurencyjności transportu lotniczego.

Do szczególnie istotnych procesów zachodzących w tym złożonym systemie należą procesy ruchowe, obejmujące starty i lądowania na drogach startowych oraz kołowanie przedstartowe i po lądowaniu, które odbywają się po drogach kołowania. Obiektami, których dotyczą te procesy są samoloty. Podlegają one złożonemu procesowi sterowania, polegającemu na bezpośrednim sterowaniu przez pilota oraz nadrzędnemu zarządzaniu przez kontrolera ruchu lotniczego (TWR – tower, GND – ground). Zadaniem pilota jest właściwa realizacja wszelkich procedur zmierzających do poprawnego wykonania odpowiedniego fragmentu procesu ruchowego, zaś zadaniem kontrolera jest właściwa

koordynacja ruchu poszczególnych obiektów tak, aby nie dochodziło między nimi do kolizji.

Jak wskazują liczne przykłady, ruch lotniskowy jest na tyle złożony i na tyle zależny od wielu nieprzewidywalnych czynników, że dochodzi w nim do incydentów i wypadków lotniczych. Unikanie takich zdarzeń stanowi podstawowe wyzwanie dla wszystkich służb realizujących i nadzorujących ruch lotniskowy. Podstawowymi problemami w ich działaniach są:

- duża liczba obiektów, którymi trzeba zarządzać, co wymusza podział zadań pomiędzy wiele służb; niewłaściwa koordynacja ich działań jest często przyczyną incydentów lotniczych,
- decydująca rola człowieka, który działając często w warunkach deficytu czasu czy w stresie, popełnia błędy wynikające z niedostatków wykszolenia, ułomności zmysłów, braku możliwości właściwego przetworzenia zbyt dużej liczby informacji i sygnałów,
- duża dynamika zdarzeń sprawiająca, że czas na wypracowanie decyzji i jej realizację jest krótki, a konsekwencje nawet niewielkich błędów – olbrzymie.

Zarządzający lotniskami, przewoźnicy lotniczy, służby zarządzania ruchem lotniczym, przedsiębiorstwa obsługujące samoloty i pasażerów podejmują liczne działania mające na celu eliminację błędów, a tym samym podniesienie poziomu bezpieczeństwa. Prześledzenie skutków takich działań, ocena ich efektywności w aspekcie poniesionych nakładów nie są możliwe bez analizy modelowej, gdyż eksperymentowanie na rzeczywistym ruchu jest wykluczone ze względu na możliwe skutki. Podejmowane są więc liczne próby stworzenia efektywnych modeli poszczególnych elementów lotniska, które taką analizę umożliwią. Wykorzystują one różne metody modelowania matematycznego, wśród nich: programowanie dynamiczne, zbiory rozmyte, modele masowej obsługi, hierarchiczne modele Bayesa. W [2] wykorzystano metodę programowania dynamicznego do wyznaczenia przepustowości lotniska. W [4] natomiast, wykorzystano hierarchiczne sieci bayesowskie do zbadania wpływu nowych środków bezpieczeństwa na unikanie rzadkich zdarzeń o katastrofalnych konsekwencjach. Interesujące podejście do modelowania procedur lotniskowych przedstawiono w [7]. Przy wykorzystaniu teorii zbiorów rozmytych przedstawiono model wykorzystywany do określenia drogi startowej w użyciu. Podejmowano także liczne prace nad modelami pozwalającymi na określenie możliwości przekształcenia incydentów lotniczych w wypadek [9,10,12]. Mogą one przyczynić się do lepszego zrozumienia roli poszczególnych barier zabezpieczających przed wypadkami, a tym samym podejmowania racjonalnych decyzji odnośnie ich stosowania i rozwoju.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono koncepcję modelowania ruchu lotniskowego przy wykorzystaniu kolorowanych, czasowych, stochastycznych sieci Petriego. Stanowią one dogodne narzędzie analizy procesów ruchowych w transporcie [11]. Niestety są stosunkowo rzadko wykorzystywane przy analizach ruchu lotniczego w rejonie lotnisk. Do nielicznych przykładów należą [1,3].

Przedstawiony poniżej model ruchu lotniskowego pozwala między innymi na:

- wyznaczenie przepustowości lotniska, przy różnych wariantach wyposażenia, warunkach pogodowych czy przyjętych procedurach operacyjnych,
- badanie skutków wprowadzenia zmian w infrastrukturze czy organizacji lotniska,
- analizę rzeczywistych zdarzeń lotniczych w ruchu lotniskowym, wraz z poszukiwaniem charakterystyk ilościowych dotyczących bezpieczeństwa ruchu,

- symulacyjną analizę miejsc, działań i procedur umożliwiającą znajdowanie słabych ogniw w systemie zapewniania bezpieczeństwa pasażerów.
- Opracowanie dopełnia przykład wykorzystania przedstawionego modelu do wyznaczania średniego czasu opóźnienia operacyjnego, przy przyjętych procedurach ruchowych, a zależnego od wielkości obsługiwanego ruchu.

## 2. MODEL RUCHU LOTNISKOWEGO

W [11] omówiono podstawowe zasady modelowania procesów ruchowych w transporcie przy wykorzystaniu sieci Petriego. Wskazano na sposób odwzorowania elementów systemów transportowych w poszczególnych elementach sieci Petriego. Omówiono także typy sieci i zasady jakimi należy się kierować przy doborze typu sieci do analizowanego problemu badawczego. Idąc za tymi ogólnymi zasadami, przy modelowaniu ruchu lotniskowego przyjęto, że:

- miejsca sieci reprezentują sytuacje ruchowe oraz stany otoczenia, ze szczególnym uwzględnieniem istotnych elementów stanu atmosfery,
- tranzycje reprezentują typowe zdarzenia ruchowe występujące w ruchu lotniskowym,
- funkcje wejścia, wyjścia oraz inhibitory przyjmują typowe role opisane w teorii sieci Petriego [5,6,13] warunkujące zajście zdarzenia ruchowego (odpalenia tranzycji) oraz określające skutki zaistniałego zdarzenia,
- znaczniki sieci reprezentują obecność różnego typu obiektów w poszczególnych sytuacjach ruchowych oraz określają występowanie określonych stanów otoczenia.

### 2.1. OBIEKT MODELOWANIA

W niniejszym opracowaniu modelowanym systemem jest lotnisko komunikacyjne posiadające jedną drogę startową. Poniżej przedstawiono pokrótce typowe zasady wykonywania operacji ruchowych na tego rodzaju lotnisku, uwzględnione w modelu. Szczegółowe zasady można znaleźć w literaturze.

Do progu drogi startowej prowadzi jedna droga kołowania, którą wykorzystują wszystkie samoloty. W przypadku braku możliwości wykonania procedury startu natychmiast po zakończeniu kołowania samoloty oczekują przed progiem. Kolejność startów wynika z kolejności dotarcia do punktu oczekiwania. Przyjęto, że samoloty startujące oczekują na zakończenie procedury startu przez samoloty poprzedzające, przy czym za chwilę zwolnienia drogi startowej przyjęto chwilę rozpoczęcia zakrętu proceduralnego po oderwaniu się od ziemi. Jest to również chwila, w której kolejny samolot może rozpocząć procedurę startu. Nieco wcześniej może nastąpić zajęcie drogi startowej i oczekiwanie przez kolejny samolot. Przyjęto, że chwila ta jest określona przez zakończenie pierwszej fazy rozbiegu.

W przypadku procedury lądowania obszar analizy obejmuje końcowe podejście, począwszy od czwartej mili od progu drogi startowej, aż do zjazdu samolotu z drogi startowej. Czas zajęcia drogi startowej jest zależny od rodzaju samolotu, przyjęto że w modelowanym systemie występują trzy kategorie samolotów. Dla każdej z nich, droga startowa jest wyposażona w dedykowaną drogę kołowania szybkiego zjazdu. W przypadku braku możliwości zachowania przepisowych separacji na drugiej mili od progu drogi startowej model przewiduje wykonanie procedury odejścia na drugi krąg. Rozpoczęcie hamowania po przyziemieniu umożliwia zajęcie drogi startowej kolejnemu samolotowi oczekującemu w kolejce do startu. Może to jednak nastąpić tylko wówczas gdy w obszarze analizy nie ma kolejnego samolotu lądującego, gdyż model uwzględnia priorytet lądowań w takiej sytuacji.

## 2.2. SIEĆ PETRIEGO DO MODELOWANIA RUCHU LOTNISKOWEGO

Prezentowany w niniejszym opracowaniu model został stworzony w oparciu o sieć Petriego spełniającą liczne warunki niezbędne dla właściwego odwzorowania istotnych elementów systemu, w ramach którego realizowane są analizowane lotniskowe procesy ruchowe. Sieć taka musi być: kolorowana, czasowa, stochastyczna, priorytetowa. Model ruchu lotniskowego możemy zatem zapisać jako

$$S_{RL} = \{P, T, I, O, H, M_0, \tau, X, \Gamma, C, G, E, R, r_0, B\} \quad (1)$$

gdzie

$P$  – zbiór miejsc,

$T$  – zbiór tranzycji,  $T \cap P = \emptyset$ ,

$I, O, H$ , to funkcje odpowiednio wejścia, wyjścia oraz inhibitory:

$I, O, H: T \rightarrow B(P)$ , gdzie  $B(P)$  jest wielozbiorem nad zbiorem  $P$ , zaś funkcje  $I, O, H$  są określone dla danej tranzycji  $t \in T$  jako:

$t^+ = \{p \in P: I(t, p) > 0\}$  – zbiór wejść tranzycji  $t$ ,

$t^- = \{p \in P: O(t, p) > 0\}$  – zbiór wyjść tranzycji  $t$ ,

$t^o = \{p \in P: H(t, p) > 0\}$  – zbiór inhibitorów tranzycji  $t$ ,

$M_0: P \rightarrow \mathbb{Z}_+$  – jest znakowaniem początkowym,

$\tau: T \times P \rightarrow \mathbb{R}_+$  – funkcja opóźnień, określająca opóźnienie statyczne  $\tau(t)$  tranzycji  $t$  przenoszącej znaczniki do miejsca  $p$ ,

$X: T \times P \rightarrow \mathbb{R}_+$  – zmienna losowa, opisująca losowy czas realizacji zdarzenia ruchowego (tranzycji)  $t$  prowadzącego do sytuacji ruchowej (miejsca)  $p$ ,

$\Gamma$  – niepusty, skończony zbiór kolorów,

$C$  – funkcja określająca jakiego koloru znaczniki mogą być przechowywane w danym miejscu:  $C: P \rightarrow \Gamma$ ,

$G$  – funkcja określająca warunki, jakie muszą być spełnione, aby tranzycja mogła być odpalona; są to wyrażenia zawierające zmienne typów należących do  $\Gamma$ , dla których można dokonać wartościowania dającego w rezultacie wartość logiczną,

$E$  – funkcja opisująca tzw. wagi łuków, tzn. wyrażenia zawierające zmienne typów należących do  $\Gamma$ , dla których można dokonać wartościowania dającego w rezultacie wielozbiór nad typem koloru przypisanego do miejsca, które znajduje się na początku lub na końcu danego łuku,

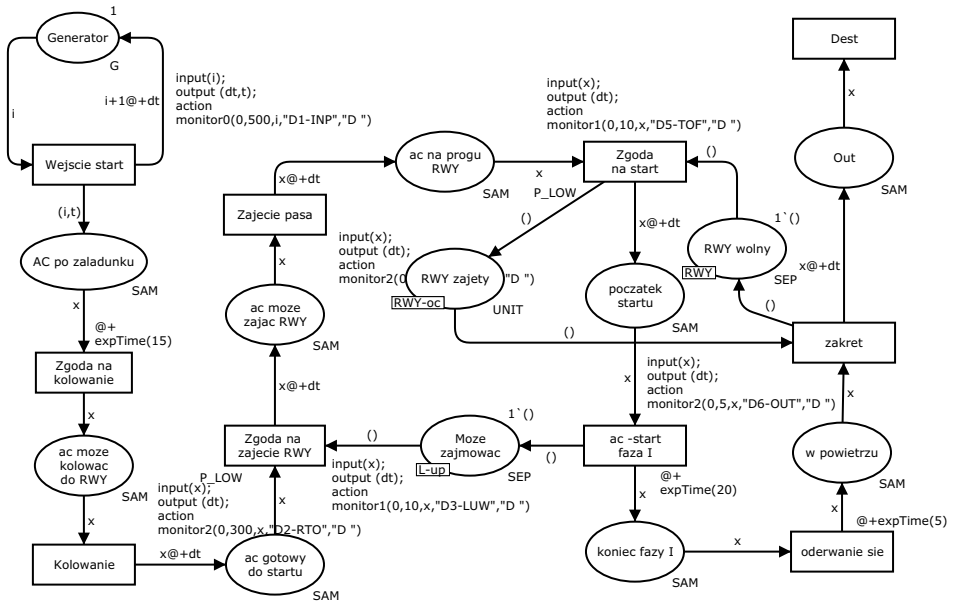
$R$  – zbiór znaczników czasowych (zwanymi też punktami czasowymi lub pieczętkami czasowymi), zamknięty ze względu na operację dodawania,  $R \subseteq \mathbb{R}$ ,

$r_0$  – czas początkowy,  $r \in R$ .

$B: T \rightarrow \mathbb{R}_+$  – funkcja określająca priorytet tranzycji  $t$ , funkcja ta ma zastosowanie tylko dla tranzycji jednocześnie aktywnych, w której to sytuacji możliwy jest swobodny wybór tranzycji do odpalenia.

### 3. MODEL STARTU

Struktura sieci Petriego modelującej proces startu i poprzedzający go proces kołowania do startu została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Model procesu startu na lotnisku z jedną drogą startową

Można tu wyróżnić 13 miejsc i 10 tranzycji. Przyjmujemy następujące oznaczenia miejsc:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{13}\} \quad (2)$$

gdzie:  $p_1$  – „generator”,  $p_2$  – „ac po załadunku”,  $p_3$  – „ac może kołować do RWY”,  $p_4$  – „ac gotowy do startu”,  $p_5$  – „ac może zająć RWY”,  $p_6$  – „ac na progu RWY”,  $p_7$  – „początek startu”,  $p_8$  – „koniec fazy I”,  $p_9$  – „w powietrzu”,  $p_{10}$  – „out”,  $p_{11}$  – „RWY zajęty”,  $p_{12}$  – „RWY wolny”,  $p_{13}$  – „może zajmować”.

Miejsca  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  służą do utrzymywania separacji między kolejnymi samolotami lądującymi oraz synchronizacji między samolotami startującym a lądującymi.

Ze względu na występujące znaczniki różnych typów zastosowano sieć kolorowaną. Zbiór kolorów  $\Gamma$  zdefiniujemy następująco:

$$\Gamma = G \cup SAM \cup SEP \cup UNIT \quad (3)$$

gdzie:

$G = \mathbb{N} \times R$  – zbiór opisujący numer samolotu i czas jego pojawienia się w modelowanym systemie,

$SAM = \mathbb{N} \times TYP \times R$  – zbiór czasowy określający numer i typ modelowanego samolotu, przy czym zbiór  $TYP = \{a, b, c\}$ , gdzie oznaczenie  $a$  rozumie się jako samolot kategorii wagowej ciężki,  $b$  – kategorii średni,  $c$  – kategorii lekki,

$SEP = \{0,1\} \times R$  – zbiór określający spełnienie warunków separacyjnych, na przykład pozwalających na zajęcie drogi startowej; ponieważ separacje są związane z czasem zbiór ten zawiera pieczątki czasowe,

$UNIT = \{0,1\}$  – zbiór spełniający podobną funkcję co  $SEP$ , pozwalający w modelu na blokowanie pewnych zdarzeń ruchowych, które nie mogą zachodzić w przypadku braku separacji.

Postać funkcji  $C$  przypisującej kolory miejscom można odczytać z rysunku 2 – kolory przypisane miejscom są określone poniżej każdego z miejsc, po prawej stronie, np.  $C(p_1) = G$ ,  $C(p_2) = SAM$  itd.

W modelu przyjęto następujące oznaczenie tranzycji:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{10}\} \quad (4)$$

gdzie:  $t_1$  – „wejście start”,  $t_2$  – „zgoda na kołowanie”,  $t_3$  – „kołowanie”,  $t_4$  – „zgoda na zajęcie RWY”,  $t_5$  – „zajęcie pasa”,  $t_6$  – „zgoda na start”,  $t_7$  – „ac – start faza I”,  $t_8$  – „oderwanie się”,  $t_9$  – „zakręt”,  $t_{10}$  – „dest”.

Postać funkcji  $I$ ,  $O$ ,  $H$  może zostać przedstawiona w postaci tabelarycznej, można ją też odczytać z graficznej reprezentacji sieci.

Znakowanie początkowe zakłada istnienie jednego znacznika w miejscach  $p_1$ ,  $p_{12}$  i  $p_{13}$ . Wszystkie te znaczniki mają pieczętkę czasową równą 0. Oznacza to, że w chwili początkowej modelowania generator samolotów jest aktywny oraz, że droga startowa jest wolna zarówno dla samolotów startujących jak i lądujących.

Istotną rolę w modelowaniu procesów ruchowych odgrywają losowe czasy realizacji zdarzeń ruchowych. W niniejszym modelu czasy te są reprezentowane przez funkcje  $\tau$  oraz  $X$ . W modelu startu występują zarówno losowe opóźnienia odpalenia transakcji, jak i opóźnienia statyczne. Przykładowo

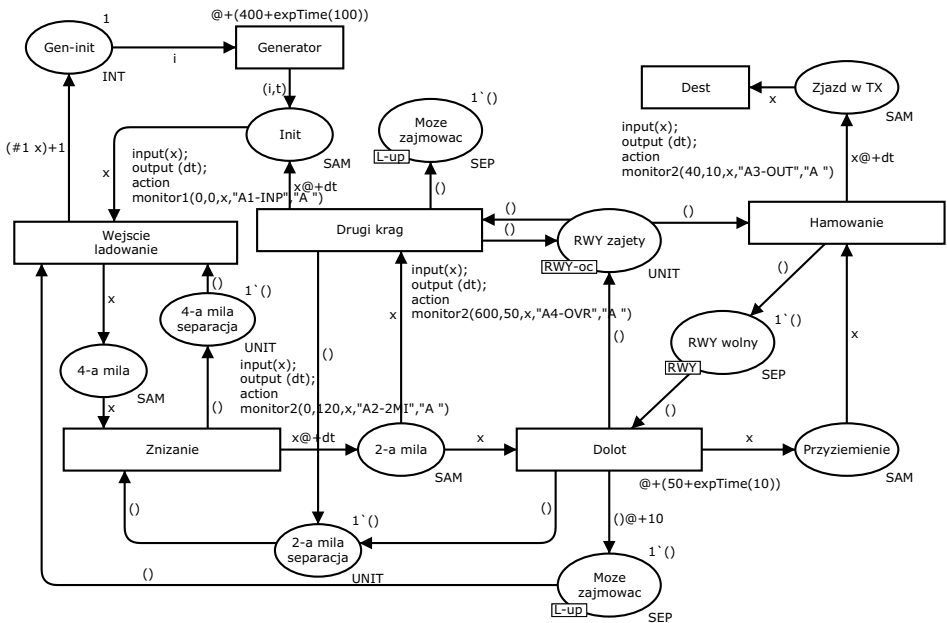
$$X(t_1, p_1) = exp(500) \tag{5}$$

$$X(t_1, p_2) = 0 \tag{6}$$

Zapis ten oznacza, że tranzycja  $t_1$  przenosząc znaczniki do miejsca  $p_2$  zachowuje się jak tranzycja natychmiastowa, zaś w przypadku przenoszenia znaczników do miejsca  $p_1$  powoduje, że znaczniki te są aktywne po czasie określonym przez zmienną losową o rozkładzie wykładniczym o parametrze  $\lambda=500$ .

### 4. MODEL LĄDOWANIA

Struktura sieci Petriego modelującej proces lądowania począwszy od czwartej mili od progu drogi startowej do zjazdu w jedną z dróg kołowania została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Model procesu lądowania na lotnisku z jedną drogą startową

Można tu wyróżnić 11 miejsc i 10 tranzycji. Przyjmiemy następujące oznaczenia miejsc:

$$P = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{21}\} \quad (7)$$

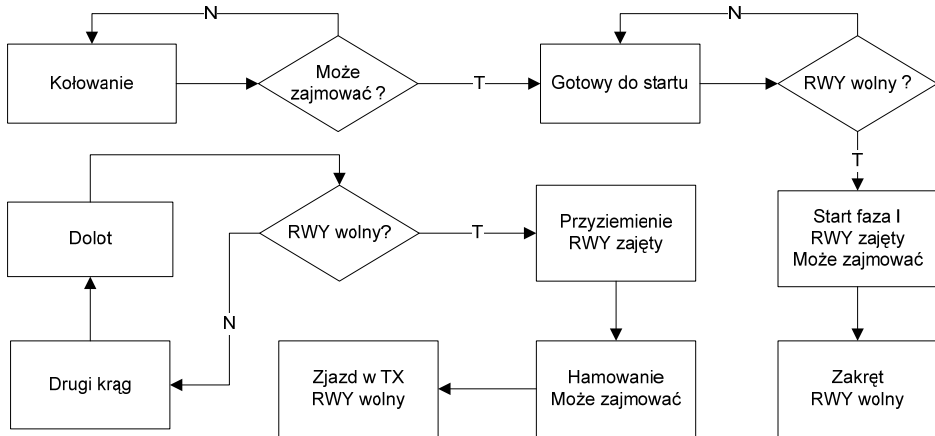
gdzie:  $p_{11}$  – „RWY zajęty”,  $p_{12}$  – „RWY wolny”,  $p_{13}$  – „może zajmować”,  $p_{14}$  – „gen-init”,  $p_{15}$  – „init”,  $p_{16}$  – „4-ta mila”,  $p_{17}$  – „4-ta mila - separacja”,  $p_{18}$  – „2-a mila”,  $p_{19}$  – „2-a mila - separacja”,  $p_{20}$  – „przyziemienie”,  $p_{21}$  – „zjazd w TX”.

Ponadto w modelu przyjęto następujące oznaczenie tranzycji:

$$T = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{17}\} \quad (8)$$

gdzie:  $t_{11}$  – „generator”,  $t_{12}$  – „wejście lądowanie”,  $t_{13}$  – „znížanie”,  $t_{14}$  – „drugi krąg”,  $t_{15}$  – „dolot”,  $t_{16}$  – „hamowanie”,  $t_{17}$  – „dest”.

Oczywiście miejsca  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  są tożsame z miejscami opisanymi w modelu startu i służą zbudowania hierarchicznej struktury sieci Petriego, pozwalającej na większą prostotę zapisu i na modelowanie jednoczesnych startów i lądowań na tej samej drodze startowej. Schemat tej struktury przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat hierarchii w modelu ruchu lotniskowego

Oznaczenia zbiorów kolorów  $\Gamma$ , postać funkcji  $C$ , postać funkcji  $I$ ,  $O$ ,  $H$ , znakowanie początkowe, funkcje  $\tau$  oraz  $X$  zostały zdefiniowane podobnie jak w modelu startu. Konkretnie wartości funkcji do poszczególnych miejsc i tranzycji można odczytać z rys. 1 i rys. 2.



## 5. MODELOWA ANALIZA RUCHU LOTNISKOWEGO

Prezentowany model może być wykorzystany do analizy różnego rodzaju zagadnień związanych z operacjami lotniskowymi. Należą do nich:

- badania efektywności wykorzystania istniejącej infrastruktury przy istniejącej wielkości i strukturze ruchu,
- analiza możliwości zwiększenia ruchu w odniesieniu do części lotniczej, z jednoczesną kontrolą wskaźników jakościowych,
- badanie skutków planowanych modernizacji, takich jak zmiany wyposażenia, rozbudowa dróg startowych, dróg kołowania, szybkich zjazdów z drogi startowej,
- analiza przepustowości części lotniczej lotniska, zarówno przy istniejącym ruchu i wyposażeniu jak i w przypadku jego zmian (awarii lub rozbudowy).

### 5.1. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

Dla zaprezentowania możliwości omawianego modelu przeprowadzono badanie przepustowości nawigacyjnej regionalnego portu lotniczego. Przyjęto następujące założenia:

- port lotniczy wyposażony jest w jedną drogę startową,
- w strumieniu wejściowym uwzględnia się trzy typy samolotów: lekkie, średnie z napędem turbośmigłowym i średnie z napędem odrzutowym,
- występują trzy drogi szybkiego zjazdu o lokalizacji dopasowanej do wymienionych trzech kategorii samolotów, co powoduje, że co najmniej 95% wszystkich lądowań wykorzystuje drogę zjazdową dedykowaną do danej kategorii,
- drogi kołowania są tak skonfigurowane, że kołowanie do progu drogi startowej nie generuje opóźnień i umożliwia swobodne kołowanie wszystkich samolotów planujących starty,
- modelowane są zarówno starty jak i lądowania, przy czym zachowana jest proporcja 50% lądowań i 50% startów; w eksperymencie pierwszym średnia intensywność zgłoszeń obu strumieni jest taka sama, zaś w eksperymencie drugim średnia intensywność zgłoszeń samolotów startujących jest mniejsza niż samolotów lądujących i dodatkowo samoloty lądujące są wstępnie formowane w strumień, w którym odstęp między kolejnymi samolotami jest bliski wartości separacji.

W trakcie eksperymentów symulacyjnych rejestracji podlegały losowe czasy wystąpienia poszczególnych zdarzeń ruchowych:

a) dla lądowania:

- wejście do systemu, rejestrowane w chwili minięcia punktu oddalonego o 4 mile od progu drogi startowej,
- minięcie punktu oddalonego o 2 mile od progu drogi startowej,
- zjazd w drogę kołowania,
- odejście na drugi krąg (w przypadku braku separacji na drugiej mili od progu),

b) dla startu:

- wejście do systemu, rejestrowane w chwili zgłoszenia gotowości do kołowania,
- gotowość do zajęcia drogi startowej i startu,
- uzyskanie zgody na zajęcie drogi startowej i oczekiwanie (*line-up and wait*),
- gotowość do startu, rejestrowana po zajęciu drogi startowej,
- rozpoczęcie rozbiegu,
- rozpoczęcie zakrętu proceduralnego po oderwaniu się od ziemi.

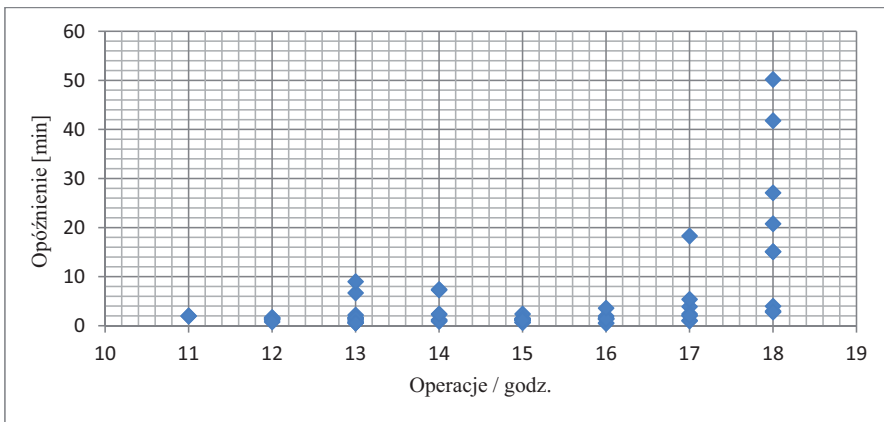
Taki wybór modelowych punktów pomiarowych pozwala na obserwację wszelkich przypadków oczekiwania na kontynuację ruchu, w szczególności tych, które związane są nie tyle z wykonywaną procedurą własną, a z oczekiwaniem na zakończenie odpowiednich procedur przez inne samoloty. Te właśnie przypadki oczekiwania są zaliczane do opóźnień, które decydują o wyznaczonej przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego.

Eksperymenty symulacyjne wykonywano iteracyjnie, w każdej kolejnej iteracji zwiększając intensywność zgłoszeń samolotów startujących i lądujących aż do uzyskania ruchu o charakterze nasyconym. Badanie rozpoczynano od średniej intensywności zgłoszeń na poziomie:

- w eksperymencie 1 – 12 na godzinę zarówno samolotów lądujących jak i startujących,
- w eksperymencie 2 – 20 samolotów lądujących na godzinę i 12 samolotów startujących na godzinę.

## 5.2. WYNIKI EKSPERYMENTÓW SYMULACYJNYCH

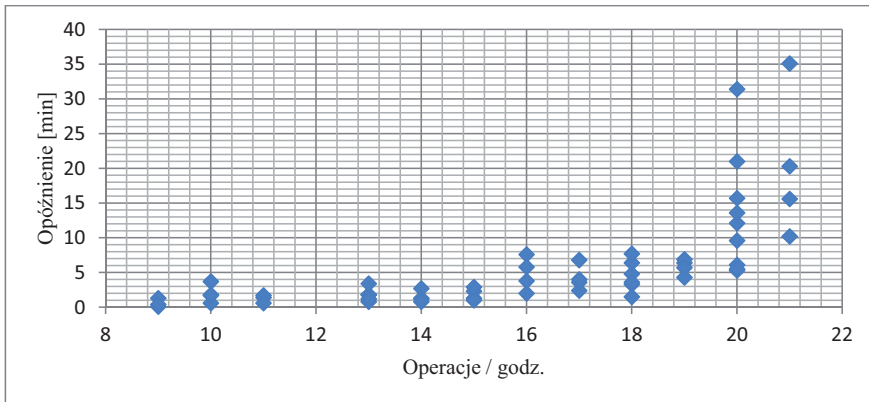
Wynikiem pojedynczego przebiegu symulacyjnego była para określająca realizację zmiennych losowych wielkość ruchu i opóźnienie. W pierwszym eksperymencie średnia intensywność zgłoszeń do startu i lądowania była taka sama. Dla zrealizowanych 100 przebiegów symulacyjnych wyniki tego eksperymentu przedstawia wykres na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki eksperymentu 1 – bez wstępnego formowania strumienia samolotów

Jako wielkość przepustowości lotniczej portu lotniczego przyjęto taką wielkość ruchu, dla której prawdopodobieństwo tego, że opóźnienie jest większe niż przyjęta wartość (10 minut) jest większe niż 0,5 [8]. W prezentowanym przykładzie wyniosła ona 18 operacji startu i lądowania na godzinę. Wielkość ta odpowiada obserwowanej, rzeczywistej przepustowości portów lotniczych o badanej charakterystyce. Na wynik ten ma wpływ kilka czynników. Z jednej strony przyjęto bardzo niekorzystne warunki ruchowe, z których na pierwszy plan wysuwa się fakt istnienia bardzo dużego zapotrzebowania na starty, które przy istniejącym priorytecie lądowań i braku założenia o bezwzględny, precyzyjnym kształtowaniu strumienia samolotów lądujących, skutkuje dużymi jednostkowymi opóźnieniami samolotów startujących, a tym samym obniżeniem przepustowości. Z drugiej strony istnienie trzech dróg szybkiego zjazdu oraz takie ukształtowanie dróg kołowania, które eliminuje możliwość powstania opóźnień podczas kołowania do startu powoduje zwiększenie przepustowości lotniczej portu lotniczego. Należy zauważyć że uzyskana wartość 18 operacji na godzinę jest jednocześnie wielkością nasycenia. W badaniach modelowych udaje się w niektórych przebiegach symulacyjnych uzyskać większą liczbę operacji, ale przy opóźnieniach powyżej 60 minut co jest nie do przyjęcia ze względów ruchowych, ale także z uwagi na bezpieczeństwo.

Dla drugiego eksperymentu symulacyjnego przyjęto, że samoloty lądujące są wstępnie formowane w strumień, w którym odstęp między samolotami są praktycznie stałe i równe separacji przy podejściu do lądowania równej 2 minuty. Wyniki zaprezentowane na rysunku 5 wskazują na zwiększenie przepustowości lotniska, mimo w dalszym ciągu niekorzystnego składu obsługiwanego ruchu (50% startów i 50% lądowań zgłaszających się losowo z dużą intensywnością).



Rys. 5. Wyniki eksperymentu 2 – ze wstępnym formowaniem strumienia samolotów lądujących

Wzrost przepustowości jest stosunkowo niewielki. Jest to spowodowane dużą liczbą samolotów startujących, które muszą oczekiwać na zakończenie całej serii 30 lądowań. Samoloty lądujące są bowiem bardzo ściśle upakowane i nie ma praktycznie możliwości zrealizowania startów w przerwach między lądowaniami. Zwiększenie przepustowości jest możliwe jedynie przez przesunięcie chwili początkowej zgłaszania się strumienia

samolotów lądujących. Największa wartość przepustowości występuje przy rozpoczęciu serii startów po zrealizowaniu około połowy lądowań.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na pojęcie ruchu lotniskowego składa się wiele skomplikowanych procesów ruchowych, które są realizowane w zmiennym otoczeniu. Wszelkie działania modernizacyjne czy badawcze na realnie działającym systemie są poważnie ograniczone ze względów bezpieczeństwa. Konieczne jest stosowanie modeli, które pozwolą na badanie charakterystyk zarówno aktualnie działającego portu lotniczego, jak i analizę efektów (skutków) projektowanych nowych rozwiązań. Badanie takie jest realizowane nie tylko dla zwiększenia zasobu informacyjnego zarządzającego portem lotniczym, ale jest także wymogiem systemów zarządzania bezpieczeństwem w tych przedsiębiorstwach.

Istnieje wiele modeli i różnorodnych podejść do badań, o których mowa powyżej. W niniejszym opracowaniu przedstawiono zintegrowany model procesów startu i lądowania zbudowany z wykorzystaniem kolorowanych, czasowych, stochastycznych sieci Petriego. Jak pokazują przeprowadzone eksperymenty symulacyjne, omawiany model pozwala na łatwe i efektywne uzyskiwanie wiarygodnych wyników. Istotne cechy sieci Petriego pozwalają nie tylko na uzyskanie wyniku końcowego, ale także na łatwą obserwację zjawisk i procesów wewnętrznych i cząstkowych.

### Bibliografia

1. Davidrajuh, R., Lin, B. Exploring airport traffic capability using Petri net based model, *Expert Systems with Applications* 2011; 38 (9): 10923-10931.
2. Dell'Olmo, P., Lulli, G. A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem, *IMA Journal of Management Mathematics* 2003; 14: 235-249.
3. Hadjimichael, M. A fuzzy expert system for aviation risk assessment, *Expert Systems with Applications* 2009; 36: 6512-6519.
4. Horowitz, B.M., Santos, J.R. Runway safety at airports: A systematic approach for implementing ultra-safe options, *Journal of Air Transport Management* 2009; 15: 357-362.
5. Jensen K.: *Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Monographs in Theoretical Computer Science.* Springer Verlag 1997.
6. Marsan M. A., Balbo G., Conte G., Donatelli S., Franceschinis G.: *Modelling with generalized stochastic Petri Nets*, Università degli Studi di Torino, Dipartimento d'Informatica, 1999.
7. Netjasov, F., Fuzzy expert model for determination of runway in use case study: Airport Zurich, 1st International Conference on Research in Air Transportation ICRAT 2004, Zilina, Slovakia, November 22-23, 2004, p. 59-64.
8. Skorupski J.: *Metoda wyznaczania pojemności rejonu lotniska dla różnych systemów organizacji ruchu lotniczego, rozprawa doktorska*, WT PW, Warszawa 1997.
9. Skorupski J.: Analysis of the relation between serious incident and accident in air traffic, *Logistics and Transport (ISSN 1734-2015) No. 2/2010*, pp. , Wrocław 2010.
10. Skorupski J.: *Modelling of Traffic Incidents in Transport, Transport Systems and Processes – Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (ISBN 978-0-415-69120-8)*, p. 25-32, CRC Press/Taylor & Francis Group/Balkema, London 2011.

11. Skorupski J.: Sieci Petriego jako narzędzie do modelowania procesów ruchowych w transporcie, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport (ISSN 1230-9265), z. 78, str. 69-77, Warszawa 2011.
12. Skorupski J.: Method of analysis of the relation between serious incident and accident in air traffic, Advances in Safety, Reliability and Risk Management (ISBN 978-0-415-68379-1), p. 2393-2401, CRC Press/Taylor & Francis Group/Balkema, London 2012.
13. Szpyrka M.: Sieci Petriego w modelowaniu i analizie systemów współbieżnych, WNT, Warszawa 2008.

### MODELLING OF TAKEOFF AND LANDING PROCEDURES USING PETRI NETS

**Summary:** This paper presents the concept of airport traffic modelling using coloured, timed, stochastic Petri nets. By the example of the airport with one runway and simultaneous takeoff and landing operations, the applicability of such models in analysis of air traffic processes is shown. The model was used to determine the average delay in air traffic, depending on the volume of traffic, while operating under the assumed procedures.

**Keywords:** traffic processes modelling, Petri nets, air traffic