

Jacek Skorupski  
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

## SYMULACYJNA ANALIZA ZALEŻNOŚCI MIĘDZY POWAŻNYM INCYDENTEM A WYPADKIEM W RUCHU LOTNICZYM

**Streszczenie:** Międzynarodowe organizacje lotnicze nakładają na Polskę obowiązek określenia tzw. dopuszczalnego poziomu ryzyka dla wypadków w ruchu lotniczym. Wyznaczenie tej wielkości wymaga posiadania danych statystycznych o wypadkach. Te jednak w ostatnich latach nie występują, albo liczebność próbek jest niewystarczająca. W niniejszym artykule zasygnalizowano metodę polegającą na prognozowaniu liczby wypadków na podstawie posiadanych informacji o incydentach lotniczych. Metoda ta może być skuteczna i efektywna gdy istnieje jakaś regularna zależność między poważnym incydem a wypadkiem lotniczym. W artykule zaproponowano sposób poszukiwania tej zależności przez analizę symulacyjną odpowiednich modeli poważnego incydemu oraz wypadku lotniczego. Do modelowania tych zdarzeń lotniczych wykorzystano sieci Petriego.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo ruchu lotniczego, zarządzanie ruchem lotniczym, analiza ryzyka

### 1. WPROWADZENIE

Transport powietrzny jest złożonym systemem, łączącym zaawansowane systemy techniczne, operatorów (kontrolerów, pilotów) i procedury. Wszystkie te elementy działają w dużym rozproszeniu przestrzennym, ale są ze sobą ściśle powiązane i wzajemnie na siebie oddziałują, przy czym horyzont czasowy tych oddziaływań jest bardzo krótki.

W ruchu lotniczym, ryzyko jest tradycyjnie utożsamiane z wypadkami lotniczymi, które zazwyczaj przynoszą dużą liczbę ofiar śmiertelnych i wielkie straty finansowe. Powaga skutków jest przyczyną, dla której bezpieczeństwo od samego początku było kluczową wartością w tej gałęzi transportu.

Polskie prawo lotnicze definiuje trzy kategorie zdarzeń lotniczych [5]:

- wypadek lotniczy jako zdarzenie związane z eksploatacją statku powietrznego, które zaistniało przy obecności ludzi na pokładzie, podczas którego jakkolwiek osoba doznała co najmniej poważnych uszkodzeń ciała lub statek powietrzny został uszkodzony,

- poważny incydent lotniczy jako incydent, którego okoliczności wskazują, że nieomal doszło do wypadku lotniczego (np. znaczące naruszenie separacji między statkami powietrznymi bez panowania nad sytuacją zarówno przez dowódcę statku powietrznego jak i przez kontrolera),
- incydent lotniczy jako zdarzenie związane z eksploatacją statku powietrznego inne niż wypadek lotniczy, które ma lub mogło mieć niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji (np. znaczące zaniżenie separacji lecz z panowaniem nad sytuacją).

Europejska Organizacja Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej Eurocontrol wydała sześć dokumentów dotyczących standardów bezpieczeństwa, zwanych wymaganiami ESARR. W transporcie lotniczym od kilku lat podejmowane są próby standaryzacji w zakresie metod i narzędzi zarządzania ryzykiem, a szczególnie w zakresie ustalenia akceptowalnego (dopuszczalnego, docelowego, nieprzekraczalnego) poziomu ryzyka [7]. Obecnie europejskie władze lotnicze stosują minima bezpieczeństwa wyznaczone przez ECAC (ang. *European Civil Aviation Conference*) i przyjęte przez Eurocontrol w przepisach ESARR-4, które od 2005 r. są obowiązującym aktem prawnym również w Polsce. Przepisy ESARR-4 dzielą zdarzenia z udziałem ATM (ang. *Air Traffic Management*) na 5 kategorii oznaczając dopuszczalny poziom ryzyka tylko dla kategorii „wypadki”. Technika TLS (ang. *Target Level of Safety*) określa maksymalną wartość prawdopodobieństwa wypadku komercyjnego, transportowego statku powietrznego, powstałego na skutek bezpośredniego udziału zarządzania ruchem lotniczym ATM na  $1,55 \cdot 10^{-8}$  wypadku na 1 godzinę lotu lub  $2,31 \cdot 10^{-8}$  wypadku na 1 lot [2].

Poszczególne kraje członkowskie ECAC są zobowiązane do wyznaczenia aktualnego poziomu ryzyka CLS (ang. *Current Level of Safety*) oraz odniesienie go do ustalonego TLS. Konieczne jest także dokonanie prognozowania zmian poziomu bezpieczeństwa w latach przyszłych i ewentualne zaproponowanie środków zaradczych (w przypadku przekroczenia dopuszczalnych norm). Zadanie to jest merytorycznie trudne, gdyż koncepcja TLS opiera się na odniesieniu liczby wypadków do wielkości pracy przewozowej. W wielu krajach jednak nie doszło w ostatnich latach do wypadków lotniczych w lotnictwie komunikacyjnym. Tak jest także w Polsce. W sytuacji tej, wiarygodne określenie wymaganych wielkości jest niemożliwe.

Jedną ze stosowanych metod jest wykorzystanie danych o incydentach lotniczych, które są oczywiście częstsze niż wypadki lotnicze. Jeśli wielkość TLS wyznaczona w oparciu o incydenty mieści się w granicach określonych dla wypadków przyjmuje się, że jest to wynik zadawalający, nie wymagający dalszych badań i działań [1].

W niniejszej pracy proponuje się inne podejście. Należy przeanalizować incydenty lotnicze i na ich podstawie określić prawdopodobieństwo, z jakim mogło dojść do ich przekształcenia się w wypadki. Jeśli okaże się, że istnieje jakaś regularna zależność między tymi wielkościami, wówczas na podstawie posiadanej statystyki incydentów można byłoby dokonać prognozowania liczby wypadków i na tej podstawie określić wartość TLS. Niniejszy artykuł prezentuje próbę znalezienia takiej zależności przy wykorzystaniu modelowania zdarzeń lotniczych za pomocą sieci Petriego.

## 2. RYZYKO W RUCHU LOTNICZYM

Ryzyko w ruchu lotniczym możemy podzielić na świadome i nieświadome. Z tym pierwszym mamy do czynienia wówczas, gdy mimo możliwości uniknięcia go decydujemy się na podjęcie działania obciążonego ryzykiem. Ryzyko nieświadome (bierne) istnieje niezależnie od naszej woli czy decyzji. Przykładowo podjęcie decyzji o podróży transportem lotniczym wiąże się z dodatkowym narażeniem na utratę życia lub zdrowia (ryzyko świadome), natomiast zamieszkiwanie w pobliżu lotniska, gdzie istnieje zagrożenie utraty życia wskutek upadku samolotu reprezentuje ryzyko nieświadome. Ryzyko może dotyczyć obiektywnie lub subiektywnie znanego narażenia na zagrożenie, z prawdopodobieństwem zależnym od czasu, miejsca, osoby itp. Mogą być ryzyka globalne (np. zmiana klimatu) lub lokalne (np. hałas lotniczy). Pewne grupy osób są bardziej narażone na ten sam typ zagrożenia niż inne, na przykład piloci i pasażerowie samolotów. W zależności od czasu trwania zagrożenia możemy mieć do czynienia z ryzykiem ciągłym, jednorazowym lub kumulującym się [3].

W odniesieniu do ryzyka społecznego można wyróżnić cztery jego typy [6]:

- ryzyko rzeczywiste, które można określić na podstawie ciągu zdarzeń jeśli się one w pełni zrealizują,
- ryzyko statystyczne, określane na podstawie dostępnych danych o zdarzeniach,
- ryzyko przewidywane, które można przewidzieć analitycznie na podstawie modeli,
- ryzyko postrzegane, które jest odczuwane intuicyjnie.

Transport lotniczy, a w szczególności zarządzanie ruchem lotniczym jest tą dziedziną działalności ludzkiej, w której występują wszystkie cztery typy ryzyka społecznego. Firmy ubezpieczeniowe będą patrzyły na transport lotniczy z punktu widzenia ryzyka statystycznego, pasażerowie – ryzyka postrzeganego, które dla większości osób jest większe niż ryzyko statystyczne. Służby zarządzania ruchem lotniczym będą się najczęściej skupiały na ryzyku przewidywanym, wynikającym z modelowania skutków wprowadzenia nowych rozwiązań organizacyjno-technicznych.

Wypadki w ruchu lotniczym charakteryzują się w odniesieniu do ryzyka kilkoma cechami szczególnymi:

- pasażerowie i członkowie załóg są osobami głównie narażonymi na ryzyko, ale są także osoby na ziemi, które są narażone na te same skutki, ale ze znacznie mniejszym prawdopodobieństwem,
- są wyjątkowo rzadkimi zdarzeniami (w bezwzględny sensie), ale o bardzo poważnych konsekwencjach,
- w odniesieniu do czasu lotu ryzyko jest cały czas obecne, mamy więc do czynienia z ryzykiem nie kumulującym się.

Problemem praktycznym w ruchu lotniczym jest zarządzanie ryzykiem i bezpieczeństwem. Zazwyczaj jest on rozwiązywany przez badanie przyczyn incydentów i wypadków lotniczych, określanie związanego z nimi ryzyka a następnie określanie (ustanawianiem) norm (standardów) odpowiadających społecznie preferowanym wartościom. Określenie ryzyka wypadków lotniczych jest tutaj podstawowym zadaniem, które może być realizowane na różne sposoby, od bardzo intuicyjnych do ściśle formalnych (analitycznych), ale zazwyczaj jest dzielone na kilka zadań cząstkowych:

- identyfikacja ryzyka: pojawienie się nowych zagrożeń lub zmiany parametrów ruchu, które zmieniają dotychczasowe oceny,
- ocena ryzyka: określenie stopnia awersji do ryzyka i stopnia akceptacji dla ryzyka,
- wymiarowanie ryzyka: w ruchu lotniczym najczęściej w liczbie wypadków na jednostkę czasu (ew. odległości albo liczbę lotów).

### 3. METODA ANALIZY ZALEŻNOŚCI MIĘDZY POWAŻNYM INCYDENTEM A WYPADKIEM W RUCHU LOTNICZYM

Jak powszechnie wiadomo, incydenty w ruchu lotniczym są praktycznie zawsze wynikiem splotu wielu różnych czynników, których zaistnienie warunkuje powstanie incydentu. W trakcie rozwoju sytuacji niebezpiecznej w czasie, występują również czynniki hamujące, które utrudniają lub uniemożliwiają ten proces.

Wstępna analiza różnych zdarzeń lotniczych wskazuje, że w zdarzeniach zakwalifikowanych jako poważne incydenty wystarczyłoby wystąpienie tylko jednego dodatkowego czynnika sprzyjającego, lub ustanie tylko jednego czynnika hamującego, aby poważny incydent przekształcił się w wypadek lotniczy. Obserwacja ta jest podstawą do zaproponowania niniejszej metody analizy.

#### 3.1. Cel i zakres analizy

W analizie ryzyka metodą drzewa zdarzeń czy drzewa błędów, w przypadku poważnych incydentów lotniczych występuje bardzo wiele elementów, których prawdopodobieństwa nie znamy. Dodatkowo są to zdarzenia zależne (w sensie probabilistycznym), co znacznie utrudnia analizę. Metoda przedstawiana w niniejszym artykule opiera się na analizowaniu jedynie tych czynników dodatkowych, które warunkują powstanie wypadku. Zmniejsza to zdecydowanie obszar analizy i jednocześnie zmniejsza zakres niepewności szacowania. Jednocześnie podejście to jest całkowicie wystarczające do osiągnięcia celu analizy – określenia zależności statystycznej pomiędzy poważnym incydem a wypadkiem lotniczym. W rezultacie znalezienia takiej zależności, byłoby możliwe oszacowanie liczby wypadków jedynie na podstawie znajomości liczby incydentów.

#### 3.2. Sieci Petriego

Sieć Petriego jest opisana piątką [4]

$$N = \{P, T, I, O, H, M\} \quad (1)$$

gdzie:

$P$  – zbiór miejsc,

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

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

$I, O, H: T \rightarrow Bag(P)$

gdzie  $Bag(P)$  jest wielozbiorem nad zbiorem  $P$ .

Mając dane przejście  $t \in T$ , można zdefiniować:

$\bullet t = \{p \in P : I(t, p) > 0\}$  – zbiór wejść przejścia  $t$ ,

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

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

System Sieci Petriego jest opisany szóstką

$$S = \{P, T, I, O, H, M_0\} \quad (2)$$

gdzie

$P$  – zbiór miejsc,

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

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

$I, O, H: T \rightarrow Bag(P)$

gdzie  $Bag(P)$  jest zbiorem wszystkich możliwych wielozbiórów nad zbiorem  $P$ .

$M_0: P \rightarrow N$  jest oznakowaniem początkowym, tzn. funkcją przypisującą każdemu z miejsc liczbę całkowitą.

Model sieciowy Petriego jest opisany ósemką

$$M = \{P, T, I, O, H, PAR, PRED, MP\} \quad (3)$$

gdzie:

$P$  – zbiór miejsc,

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

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

$I, O, H: T \rightarrow Bag(P)$

gdzie  $Bag(P)$  jest wielozbiorem nad zbiorem  $P$ ,

$PAR$  – zbiór parametrów,

$PRED$  – zbiór warunków ograniczających zakres wartości parametrów,

$MP: P \rightarrow N \cup PAR$  – funkcja przypisująca każdemu z miejsc liczbę naturalną lub parametr przyjmujący wartości ze zbioru liczb naturalnych.

Przejście  $t$  nazywamy aktywnym przy oznakowaniu  $M$  wtedy i tylko wtedy gdy:

$$\forall p \in \bullet t, M(p) \geq O(t, p) \quad \wedge \quad \forall p \in {}^\circ t, M(p) < H(t, p) \quad (4)$$

Odpalenie przejścia  $t$ , aktywnego przy oznakowaniu  $M$  powoduje zmianę oznakowania na  $M'$  takie, że

$$M' = M + O(t) - I(t) \quad (5)$$

W odniesieniu do każdej sieci Petriego możemy określić między innymi: jej graf osiągalności, ocenić odwracalność, występowanie zakleszczenia, żywotność oraz ograniczoność. Z punktu widzenia prezentowanej metody analizy, najistotniejszą własnością sieci modelującej proces powstawania zdarzenia lotniczego jest osiągalność wybranych stanów (oznakowań) z oznakowania początkowego  $M_0$ . Pozwala ona na ocenę prawdopodobieństwa oraz czasu przejścia procesu do tych wybranych oznakowań.

### 3.3. Zarys metody analizy

W prezentowanej w niniejszym opracowaniu wstępnej metodzie analizy przyjęto następującą interpretację poszczególnych elementów:

- a) Zbiór miejsc  $P$  odpowiada w głównej mierze zbiorowi sytuacji ruchowych, w jakich może znaleźć się samolot. Sytuacje te są określone zarówno położeniem w przestrzeni jak i uzyskaniem określonej zgody czy wydaniem określonych zezwoleń. Do zbioru  $P$  mogą należeć przykładowo sytuacje takie jak: gotowość samolotu do startu, zajęcie drogi startowej, znalezienie się samolotu na przecięciu dróg startowych, rozpoczęcie kołowania itp. Uzupełnieniem tego zbioru są sytuacje opisujące stan otoczenia, takie jak: wystąpienie widzialności powyżej 1000 m, zajętość kontrolera ATC, monitorowanie sytuacji na polu wlotów przez pilota innego samolotu.
- b) Zbiór przejść  $T$  odpowiada zbiorowi zdarzeń (działań) mających wpływ na zmianę sytuacji ruchowych, a w szczególności mających wpływ na bezpieczeństwo wykonywanych manewrów. Są to zdarzenia typu: kontroler ATC zezwala na start, samolot kołuje po określonej drodze kołowania, samolot nie przerywa wykonywanego manewru. Zdarzenia te mogą się charakteryzować dwoma wielkościami: czasem ich realizacji (w tym także istotną rolę odgrywają zdarzenia o zerowym czasie realizacji, tzw. przejścia natychmiastowe) oraz priorytetem, określonym przez prawdopodobieństwa realizacji zdarzeń, które mogą wystąpić jednocześnie.
- c) Funkcja wejścia  $I$  określa jakie sytuacje ruchowe muszą zaistnieć aby mogły wystąpić określone zdarzenia, funkcja wyjścia  $O$  określa jakie zdarzenia muszą zajść, aby analizowany system zmienił stan, zaś funkcja inhibitora  $H$  określa jakie sytuacje ruchowe nie mogą zaistnieć aby mogły wystąpić określone zdarzenia.
- d) Oznakowanie początkowe  $M_0$  określa w jakiej sytuacji ruchowej rozpoczynamy analizę, zaś oznakowanie bieżące  $M$  opisuje aktualny stan systemu (procesu).

Analiza, której celem jest określenie zależności między poważnym incydem a wypadkiem lotniczym, polega na przeprowadzeniu symulacji procesu odwzorowanego za pomocą odpowiedniej sieci Petriego wraz z rejestrowaniem czasu i prawdopodobieństwa przebywania systemu w poszczególnych stanach. Ogólny algorytm metody przedstawia się następująco:

1. Opracowanie modelu poważnego incydentu lotniczego w postaci sieci Petriego. Konieczne jest w nim uwzględnienie wszystkich zdarzeń sprzyjających i hamujących rozwój incydentu oraz zależności czasowych między nimi.
2. Redukcja sieci, polegająca na eliminacji miejsc i przejść, które nie mają wpływu na przekształcenie się incydentu w wypadek.
3. Wyodrębnienie scenariuszy przekształcenia się incydentu w wypadek. Scenariusze te muszą uwzględniać zarówno pojawienie się dodatkowych zdarzeń sprzyjających jak i niewystąpienie zdarzeń hamujących.
4. Opracowanie modelu wypadku uwzględniającego redukcję sieci oraz wszystkie możliwe scenariusze określone w punkcie 3.
5. Symulacja procesu – rejestracja stanów systemu, czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach, średniej liczby znaczników w każdym z miejsc.

6. Wyodrębnienie stanów systemu oznaczających przekształcenie się incydentu w wypadek lotniczy, określenie sumarycznego prawdopodobieństwa wystąpienia tych stanów.

#### **4. PRZYKŁAD ANALIZY – ZDARZENIE LOTNICZE NR 344/07**

Jako przykład ilustrujący metodę zostanie przedstawiony poważny incydent lotniczy, który wydarzył się w sierpniu 2007 r. na lotnisku w Warszawie pomiędzy samolotami Boeing 767 a Boeing 737, którego przyczyna została zakwalifikowana do kategorii „czynnik ludzki” i grupy przyczynowej H4 – „błędy proceduralne” [8].

##### **4.1. Opis okoliczności zdarzenia**

W zdarzeniu w dniu 13 sierpnia 2007 roku brały udział samoloty Boeing 737 (B737) i Boeing 767 (B767), które mniej więcej w tym samym czasie miały zaplanowane starty z lotniska Warszawa-Okęcie. Jako pierwsza zgodę na zajęcie drogi startowej RWY 29 i polecenie oczekiwania otrzymała załoga B737. Jako druga zgodę na zajęcie drogi startowej RWY 33 i polecenie oczekiwania otrzymała załoga B767. Ten sam samolot otrzymał także jako pierwszy zgodę na start. W chwilę po potwierdzeniu zezwolenia do startu oba samoloty rozpoczęły równocześnie start. Załoga B737 uznała bowiem, że zezwolenie na start było skierowane do niej. Prawdopodobnie uważała, że skoro jako pierwsza otrzymała pozwolenie na zajęcie drogi startowej to również jako pierwsza otrzymuje zezwolenie na start. Dodatkowo kategorii turbulencji w śladzie aerodynamicznym obu samolotów powodowały, że ze względów ruchowych byłoby korzystniej aby B737 wystartował przed B767. Decyzja kontrolera była jednak odmienna. Kontroler ruchu lotniczego (ATC) nie obserwował startu samolotów, gdyż zajął się w tym czasie uzgadnianiem startu śmigłowca. Sytuację jednoczesnego startu zauważył stojący w kolejce do startu pilot samolotu ATR 72, który zareagował przez radio. Po tym komunikacie pilot B767 spojrzął w prawo i zauważył startujący jednocześnie samolot B737. Następnie z własnej inicjatywy przerwał start i zaczął gwałtowne hamowanie, które doprowadziło do zatrzymania samolotu 200 m od przecięcia dróg startowych. Asystent kontrolera usłyszawszy przez radio informację od pilota ATR 72 poinformował kontrolera o starcie samolotu B737 bez zezwolenia. Kontroler, który pierwotnie nie usłyszał informacji przez radio, po upływie 16 sekund od rozpoczęcia rozbiegu przez B737 zorientował się w sytuacji i dwukrotnie zdecydowanie nakazał przerwać start B737. Załoga B737 wykonała to polecenie i zatrzymała samolot 200 m od skrzyżowania dróg startowych.

##### **4.2. Model poważnego incydentu**

Omawiane zdarzenie lotnicze nieomal doprowadziło do zderzenia obu startujących samolotów, czyli do wypadku lotniczego. Podobnie jak w większości tego rodzaju sytuacji

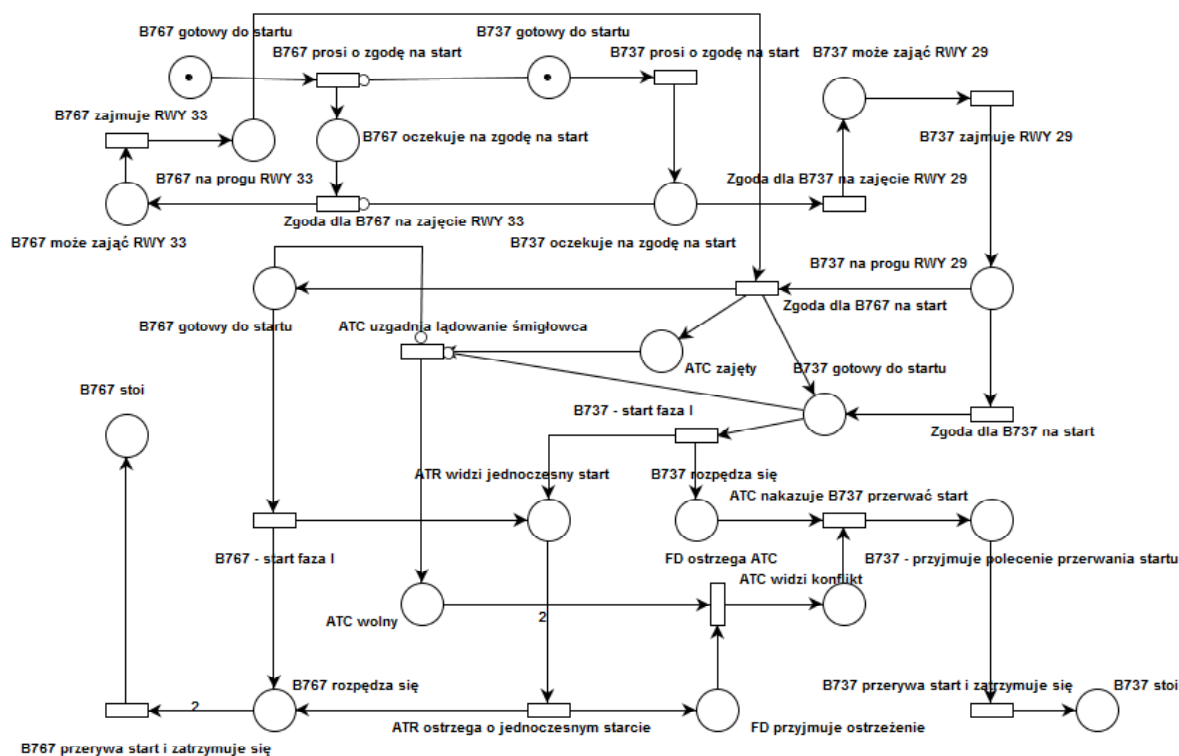
było wiele czynników sprzyjających powstaniu tej groźnej sytuacji. Do najważniejszych można zaliczyć:

- brak świadomości sytuacyjnej u załogi B737,
- niewłaściwe monitorowanie korespondencji radiowej i w rezultacie błędne przyjęcie zezwolenia na start skierowanego do innego samolotu,
- brak współpracy załogi w kabinie B737,
- brak należytego monitorowania przebiegu startu przez kontrolera,
- brak reakcji kontrolera na informację przez radio od pilota ATR 72.

Do czynników hamujących rozwój wypadku, w efekcie których nie doszło do niego można zaliczyć:

- rozpoznanie niebezpieczeństwa przez załogę B767 i podjęcie decyzji o natychmiastowym przerwaniu startu,
- rozpoznanie niebezpieczeństwa przez załogę ATR 72 i przesłanie komunikatu radiowego,
- dobre warunki pogodowe umożliwiające wzrokową obserwację dróg startowych,
- właściwa reakcja asystenta kontrolera.

Sieć Petriego przedstawiająca model omawianego zdarzenia lotniczego przedstawiona jest na rys.1.



Rys. 1. Podstawowy model poważnego incydentu lotniczego 344/07



### 4.3. Model wypadku

Analiza czynników sprzyjających powstawaniu incydentu może dać odpowiedź na pytanie jakie jest prawdopodobieństwo zaistnienia takiego właśnie wydarzenia. W omawianym przypadku analiza taka może okazać się bardzo interesująca. Warto na przykład prześledzić jak zmieniłaby się sytuacja gdyby to B767 otrzymał jako pierwszy zgodę na zajęcie drogi startowej. Załoga B737 nie miałaby wówczas powodu przyjąć do siebie zgody wydanej dla B767.

W prezentowanej metodzie chodzi jednak o znalezienie zależności probabilistycznej pomiędzy rzeczywiście zaistniałym poważnym incydemem lotniczym a mogącym z niego wyniknąć wypadkiem. W omawianym przypadku można zauważyć, że wystarczy nałożenie się tylko jednego dodatkowego czynnika zagrażającego i incydent byłby w rzeczywistości wypadkiem. Można wyróżnić kilka scenariuszy prowadzących do wypadku.

1. Załoga B767 zajęta realizowaniem procedury startu nie zwraca uwagi na komunikat przekazany przez radio przez pilota ATR 72.
2. Podjęcie przez załogę B767 błędnej decyzji o kontynuowaniu startu mimo zauważenia startującego jednocześnie samolotu B737. Decyzja taka mogłaby wynikać na przykład z takiego rozumowania: „nie zdążę się zatrzymać przed skrzyżowaniem, niech B737 hamuje – przecież mam zgodę na start, może zdążę minąć skrzyżowanie przed B737 itp.”
3. Pilot ATR 72 nie monitoruje wzrokowo sytuacji na drogach startowych tylko spokojnie czeka na zgodę dla siebie na zajęcie drogi startowej.
4. Pilot ATR 72 wprawdzie zauważa niebezpieczną sytuację, ale zamiast natychmiast poinformować o niej przez radio – omawia ją z pozostałymi członkami własnej załogi.
5. Asystent kontrolera nie zwraca uwagi na informację podaną przez radio przez pilota ATR 72 lub też nie reaguje na nią właściwie i nie informuje kontrolera.
6. Warunki pogodowe (widzialność) jest na tyle słaba, że nie sposób zauważyć rzeczywistej sytuacji ruchowej. Dotyczy to zarówno załogi B767, pilota ATR 72 i kontrolera.

Wszystkie te scenariusze prowadzą z pewnością (lub z ogromnym prawdopodobieństwem) do przekształcenia się incydentu w wypadek i zostaną przeanalizowane przy wykorzystaniu odpowiednio skonstruowanej sieci Petriego. Należy w tej analizie uwzględnić możliwość zajścia każdego ze scenariuszy osobno jak również kilku jednocześnie.

### 4.4. Wyznaczenie prawdopodobieństwa przekształcenia się incydentu w wypadek

Analiza prawdopodobieństwa przekształcenia się poważnego incydentu w ruch lotniczym w wypadek lotniczy musi uwzględniać prawdopodobieństwa realizacji każdego ze scenariuszy wymienionych powyżej. Wyznaczenie w sposób obiektywny niektórych z tych prawdopodobieństw jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe, gdyż brak danych statystycznych lub też nie ma możliwości zmierzenia poszczególnych wartości. W przypadku scenariusza 6 można skorzystać z danych statystycznych odnośnie warunków

meteorologicznych (widzialności) na badanym lotnisku. W pozostałych konieczne jest odwołanie się do ocen ekspertów.

Biorąc pod uwagę cele analizy możliwe jest wyeliminowanie niektórych stanów bez zmniejszenia ogólności rozważań, przy jednoczesnym uproszczeniu badanego modelu. Dotyczy to na przykład prawie wszystkich miejsc i przejść związanych z procesem kołowania i zajmowania miejsca na drodze startowej. Przykładowo zmiana zbioru miejsc została określona następująco.

$$P_w = (P - P_r) \cup P_d \quad (6)$$

gdzie

$P_w$  – zbiór miejsc w modelu wypadku,

$P_r$  – zbiór miejsc redukowanych,

$P_d$  – zbiór miejsc dodanych dla uwzględnienia wyżej wymienionych scenariuszy.

W omawianym przypadku (rys. 1)

$$P_r = \{p_1, p_2, \dots, p_{11}\} \quad (7)$$

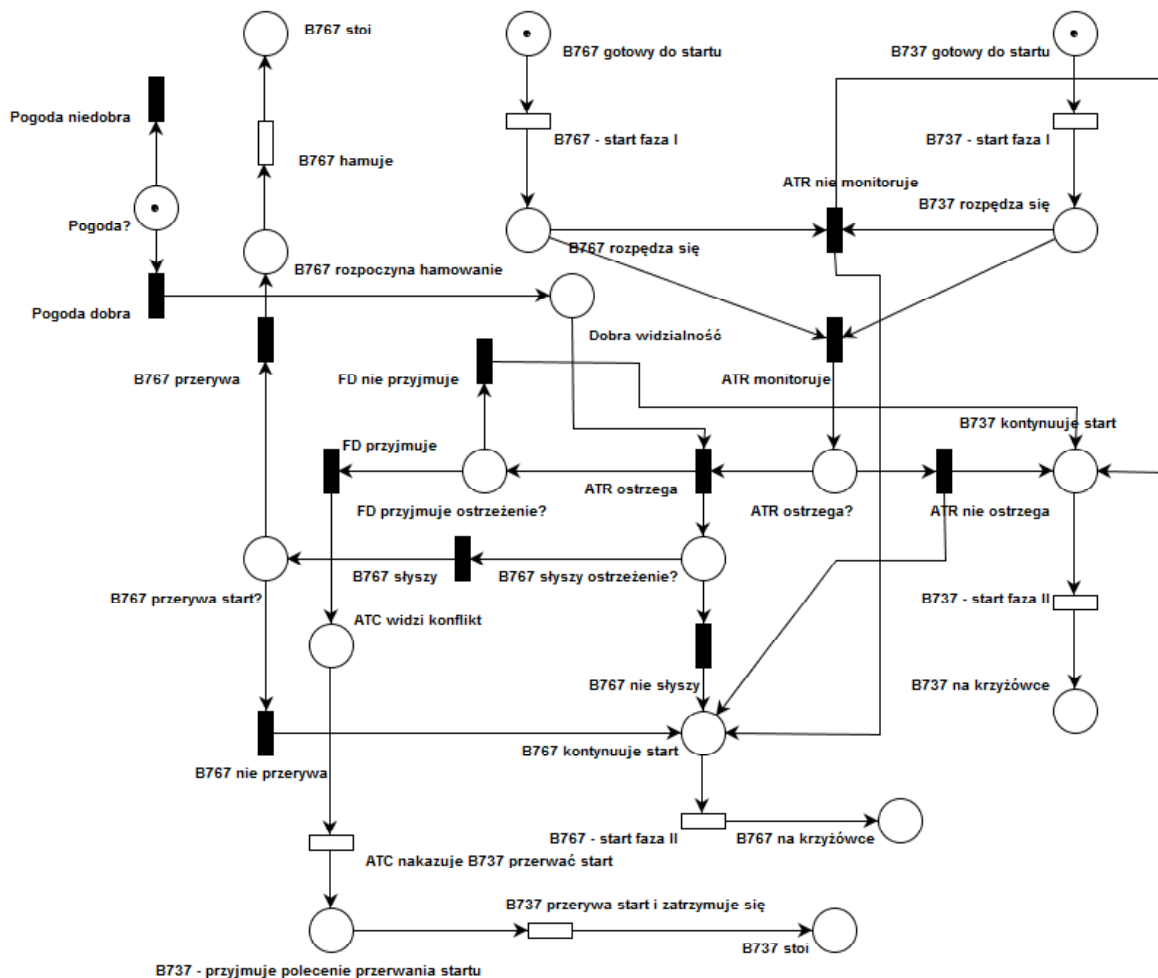
gdzie:  $p_1$  – B767 oczekuje na zgodę na start,  $p_2$  – B767 może zająć RWY 33,  $p_3$  – B767 na progu RWY 33,  $p_4$  – B767 gotowy do startu,  $p_5$  – B737 oczekuje na zgodę na start,  $p_6$  – B737 może zająć RWY 29,  $p_7$  – B737 na progu RWY 29,  $p_8$  – B737 gotowy do startu,  $p_9$  – ATC wolny,  $p_{10}$  – ATC zajęty,  $p_{11}$  – ATR widzi jednoczesny start.

Natomiast

$$P_d = \{p_{12}, p_{13}, \dots, p_{21}\} \quad (8)$$

gdzie:  $p_{12}$  – ATR ostrzega?,  $p_{13}$  – B737 kontynuuje start,  $p_{14}$  – B737 na krzyżówce,  $p_{15}$  – B767 słyszy ostrzeżenie?,  $p_{16}$  – B767 kontynuuje start,  $p_{17}$  – B767 na krzyżówce,  $p_{18}$  – B767 przerywa start?,  $p_{19}$  – B767 rozpoczyna hamowanie,  $p_{20}$  – pogoda?,  $p_{21}$  – dobra widzialność.

Analogiczna modyfikacja została dokonana w odniesieniu do przejść, funkcji wejścia, wyjścia i inhibitorów. Sieć Petriego do modelowania przekształcenia się incydentu lotniczego w wypadek, po redukcji, przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Model przekształcania się poważnego incydentu lotniczego 344/07 w wypadek (po redukcji stanów)

Potraktowanie tej sieci jako uogólnionej stochastycznej sieci Petriego (GSPN) i jej symulacyjna analiza pozwala na zaobserwowanie pewnych interesujących zależności zachodzących między poważnym incydentem a wypadkiem lotniczym. Pozwala także na stwierdzenie pewnych zależności ilościowych. Przykładowo w przedstawionej sieci można wyróżnić 25 stanów stabilnych, z których najważniejsze, z punktu widzenia celu analizy prezentowanej w niniejszym artykule, przedstawia tabela 1. Pozostałe stany jak i nieistotne miejsca – pominięto. Stany M15, M19, M22, M23, M24 (zwane bezpiecznymi) obrazują sytuacje, w których nie dochodzi do wypadku lotniczego.

Przykładowo stan bezpieczny M24 odpowiada wystąpieniu jednego znacznika w miejscach  $p_{19}$  – B767 rozpoczyna hamowanie i  $p_{22}$  – B737 stoi. Przejście do tego stanu jest możliwe w wyniku odpalenia przejścia natychmiastowego „B767 przerywa” i przejścia czasowego „B737 przerywa start i zatrzymuje się” (rys. 2). Prawdopodobieństwo odpalenia tych dwóch przejść oraz czas po jakim to nastąpi można łatwo wyznaczyć zarówno analitycznie, jak i symulacyjnie przy wykorzystaniu odpowiedniego narzędzia programowego.

W tabeli 1 przedstawiono także średnie czasy przebywania systemu w poszczególnych stanach. Są one wynikiem przyjętej w modelu funkcji intensywności realizacji przejść czasowych oraz prawdopodobieństw realizacji przejść natychmiastowych. Dla każdego ze stanów stabilnych wyznaczono prawdopodobieństwa przebywania w nich systemu. Ostateczne sumaryczne prawdopodobieństwo przejścia systemu do jednego z wymienionych stanów bezpiecznych wynosi w prezentowanym przykładzie 0,4.

Tabela 1.

**Wybrane stany systemu (w modelu wypadku lotniczego)**

	<b>B737 na krzyżówce</b>	<b>B737 stoi</b>	<b>B767 na krzyżówce</b>	<b>B767 stoi</b>	<b>Czas przebywania [s]</b>
<b>M11</b>	0	0	1	0	6,7
<b>M12</b>	1	0	0	0	6,7
<b>M13</b>	0	0	1	0	5
<b>M15</b>	0	0	0	1	5
<b>M17</b>	0	0	1	0	6,7
<b>M18</b>	1	0	0	0	6,7
<b>M19</b>	0	0	0	1	6,7
<b>M20</b>	1	0	0	0	10
<b>M21</b>	0	0	1	0	10
<b>M22</b>	0	1	0	0	6,7
<b>M23</b>	0	0	0	1	10
<b>M24</b>	0	1	0	0	10

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono metodę symulacyjnej analizy zależności pomiędzy poważnym incydem a wypadkiem w ruchu lotniczym. Punktem wyjścia do tej analizy było założenie, że poważny incydent opisuje taką sytuację w ruchu lotniczym, w której wystarczy zajście tylko jednego dodatkowego zdarzenia niepożądanego, aby doprowadzić do wypadku lotniczego. W przeanalizowanym, rzeczywistym zdarzeniu lotniczym wyróżniono 6 scenariuszy, których zajście doprowadza do wypadku. Analiza symulacyjna przy wykorzystaniu uogólnionej stochastycznej sieci Petriego pozwoliła na wyznaczenie prawdopodobieństwa przekształcenia się incydemu w wypadek, które w omawianym przykładzie wynosi 0,6.

Przeprowadzona analiza może być podstawą do stworzenia ogólnej metody prognozowania liczby wypadków lotniczych na podstawie liczby incydentów (poważnych incydentów) lotniczych. Powstanie takiej metody byłoby ważnym krokiem do wykorzystania idei TLS w praktycznym zarządzaniu ruchem lotniczym. Jest to jednak uzależnione od powtarzalności wyników dla innych zdarzeń lotniczych. Sprawdzenie występowania takiej powtarzalności planowane jest w przyszłości. Jeśli okaże się, że dla innych przypadków zdarzeń lotniczych zależność między incydem a wypadkiem ma podobny charakter, zasadne będzie podjęcie próby sformułowania twierdzenia o charakterze ogólnym w tym zakresie.

## Bibliografia

1. Dong-bin L., Xiao-hao X., Xiong L.: Target level of safety for Chinese airspace, *Safety Science* vol. 47 (2009), p. 421-424, Elsevier 2009.
2. Eurocontrol: Risk assessment and mitigation in ATM, Eurocontrol safety regulatory requirement ESARR4, Edition 1.0., Eurocontrol, Safety Regulation Commission, Brussels, 2001
3. Janic M.: An assessment of risk and safety in civil aviation, *Journal of Air Transport Management*, vol. 6, p. 43-50, Pergamon 2000.
4. Marsan M. A., Balbo G., Conte G., Donatelli S., Franceschinis G., *Modelling with generalized stochastic Petri Nets*, Universita degli Studi di Torino, Dipartimento d'Informatica, 1999.
5. Prawo Lotnicze, Ustawa z dnia 3 lipca 2002 (Dz. U. z 2002 r., Nr 130, poz. 1112), z późn. zmianami.
6. Sage A., White E." Methodologies for risk and hazard assessment: a survey and status report, *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, p. 425-441, 1980.
7. Skorupski J.: Metody zarządzania ryzykiem w transporcie – transport lotniczy, Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu, T.2. Uwarunkowania rozwoju integracji systemów bezpieczeństwa transportu (ISBN 987-83-206-1760-3), p. 271-278 (rozdz. 7.2.3), Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2009.
8. Urząd Lotnictwa Cywilnego.: Komunikat Nr 78 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 18 września 2009 r. w sprawie zdarzenia lotniczego Nr 344/07, Warszawa 2009.

### SIMULATION ANALYSIS OF RELATIONCBETWEEN SERIOUS INCIDENT AND ACCIDENT IN AIR TRAFFIC

**Abstract:** International aviation organizations require Poland to define the so-called acceptable level of safety for traffic accidents. To calculate this, one requires statistical data on accidents. These, however, in recent years do not occur, or the size of the sample is insufficient. In the paper a method for predicting the number of accidents on the basis of information on air incidents is mentioned. This method can be efficient and effective if any regular relation between the air traffic accident and serious incident exists. In the paper a way to find this relation is proposed, by analyzing the relevant simulation models of serious incidents and accidents. For this purpose Petri nets were used.

**Keywords:** traffic safety, air traffic management, risk analysis.