

METODY ANALIZY RYZYKA W STEROWANIU RUCHEM LOTNICZYM

Jacek Skorupski

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

Streszczenie

Ryzyko w ruchu lotniczym jest tradycyjnie utożsamiane z wypadkami lotniczymi, które przynoszą dużą liczbę ofiar śmiertelnych i wielkie straty finansowe. Powaga skutków jest przyczyną, dla której bezpieczeństwo jest kluczową wartością w tej gałęzi transportu. W artykule dokonano przeglądu metod analizy ryzyka, z podziałem na metody bazujące na modelach przyczynowych, na modelach ryzyka kolizji, modelach błędów ludzkich oraz modelach ryzyka naziemnego. Przedstawione metody mogą być zastosowane przy ocenie i projektowaniu systemów sterowania ruchem lotniczym.

1. Wprowadzenie

Ruch lotniczy jest złożonym systemem, łączącym zaawansowane systemy techniczne, operatorów (kontrolerów, pilotów) i procedury. Wszystkie te elementy występują w dużym rozproszeniu przestrzennym, ale są ze sobą ściśle powiązane i wzajemnie na siebie oddziałują, przy czym horyzont czasowy tych oddziaływań jest bardzo krótki. Czynniki te powodują trudność w określeniu społecznie akceptowalnego poziomu ryzyka związanego z korzystaniem z transportu lotniczego. Pojęcie ryzyka jest niejednoznaczne i posiada wiele interpretacji i znaczeń. W odniesieniu do bezpieczeństwa transportu, ryzyko będzie rozumiane jako kombinacja prawdopodobieństwa (częstości) aktywizacji zagrożenia w zdarzeniu niebezpiecznym i wielkości skutków (szkód) jakie to zdarzenie za sobą niesie [13]. W ruchu lotniczym, ryzyko jest tradycyjnie utożsamiane z wypadkami lotniczymi, które choć

występują rzadko, 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.

Problemem praktycznym w ruchu lotniczym jest zarządzanie ryzykiem i bezpieczeństwem. Często jest on rozwiązywany przez badanie przyczyn incydentów i wypadków lotniczych, określaniem związanego z nimi ryzyka a następnie ustanawianiem norm odpowiadających społecznie preferowanym wartościom [5,7]. Określenie ryzyka wypadków lotniczych jest tutaj podstawowym zadaniem, które może być realizowane na różne sposoby, od bardzo intuicyjnych do ściśle formalnych (analitycznych), ale typowo jest dzielone na kilka zadań cząstkowych [13]:

- 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).

W niniejszym artykule zostanie przedstawiony przegląd metod i modeli dotyczących różnych aspektów zarządzania ryzykiem w ruchu lotniczym. Najlepiej rozwinięte wydają się być modele do badania przyczyn rzeczywistych, zaistniałych incydentów i wypadków lotniczych np. [5, 9, 7]. Są to zazwyczaj metody wykorzystywane dla dowolnych typów ryzykownej działalności ludzkiej, a tylko zaimplementowane na potrzeby ruchu lotniczego.

Drugą grupę stanowią metody i modele służące do oceny ryzyka teoretycznych (możliwych) kolizji w ruchu lotniczym. Wprawdzie kolizje takie są rzadkie, jednak niosą za sobą poważne konsekwencje, a zatem rozwój tego rodzaju metod wydaje się konieczny. Zwłaszcza, że dotyczy on głównie rozważania możliwości zaistnienia wypadku, a więc jest to rodzaj myślenia proaktywnego, mającego na celu zapobieganie incydentom w ruchu lotniczym jeszcze zanim one nastąpią.

Trzecią grupę omówionych metod stanowią analizy dotyczące błędów ludzkich. Statystyka przyczyn wypadków lotniczych wskazuje, że najczęściej zasadniczym powodem ich wystąpienia są właśnie błędy kontrolerów ruchu lotniczego i pilotów samolotów. Znalezienie przyczyn tych błędów jest trudne i stanowi zadanie interdyscyplinarne. Konieczne jest jednak ich badanie i szacowanie ryzyka, zwłaszcza, że człowiek jest tylko jednym z elementów bardziej złożonego systemu antropotechnicznego jakim jest system zarządzania ruchem lotniczym.

Ostatnia grupa metod, to metody analizy ryzyka wynikającego z ruchu lotniczego dla osób znajdujących się na ziemi, ale nie biorących czynnego udziału w procesie transportowym. Ryzyko to jest określane w literaturze mianem ryzyka osób trzecich lub ryzyka naziemnego. Wprawdzie prawdopodobieństwo utraty życia, czy zdrowia na ziemi wskutek wypadku lotniczego jest zdecydowanie mniejsze niż w przypadku pasażerów odbywających podróże lotnicze, jednak postrzegane społecznie ryzyko wydaje się być wysokie. Obawy i protesty społeczne są na tyle duże, że metody te powinny być jednym z ważnych kryteriów przy wyborze lokalizacji planowanych czy modernizowanych lotnisk.

2. Modele przyczynowe w analizie ryzyka

Modele przyczynowe w analizie ryzyka w systemie sterowania ruchem lotniczym stanowią teoretyczną bazę do szukania przyczyn mogących doprowadzić do wypadków lotniczych. Modele te mogą być zarówno jakościowe jak i ilościowe [14, 30]. Pierwsze dają schematyczny obraz procesu, który doprowadza do zdarzenia niepożądanego. Drugie pozwalają na ocenę prawdopodobieństwa powstania zdarzeń niepożądanych i tym samym na oszacowanie ich ryzyka.

Typowe metody, które mogą znaleźć zastosowanie w zarządzaniu ryzykiem w ruchu lotniczym to:

- metoda drzewa zdarzeń [16]
- metoda drzewa błędów [8],
- metoda analizy wspólnych przyczyn [6],
- metoda drzew „bow-tie” będąca połączeniem metody drzewa błędów i drzewa zdarzeń [2],
- metoda TOPAZ [29].

Metody drzew to metody analizy ryzyka znane z wielu dziedzin techniki. Rozwinęły się za sprawą pojawiania się obszarów ludzkiej działalności niosących potencjalnie ogromne zagrożenie dla dużych grup ludności. Do obszarów tych należą: energetyka atomowa, budowa zbiorników wodnych itp. Znajdują one także swoje zastosowanie do analizy ryzyka w sterowaniu ruchem lotniczym. Szczególnie liczną grupę zastosowań w tym obszarze znalazła metoda TOPAZ i w związku z tym zostanie nieco szerzej omówiona.

Główną istotą metody TOPAZ jest analiza możliwych scenariuszy zdarzeń, opracowanych przez ekspertów lub uzyskanych z jednej z metod drzew. Scenariusze te są symulowane metodą Monte Carlo. Jest to metoda bardzo uniwersalna, gdyż pozwala na ocenę ryzyka zarówno w systemach technicznych, organizacyjnych, ale także ryzyka działań człowieka oraz ich kombinacji.

Jako przykład zastosowania metody TOPAZ może służyć opracowanie [25], gdzie autorzy badali ryzyko kolizji samolotów lądujących na małych lotniskach nie posiadających własnych służb kontroli lotniska TWR. We wspomnianym badaniu analizowano opracowany system własnej separacji samolotów, który mógłby wydatnie podnieść przepustowość. Jednak wprowadzenie tego systemu musi być poprzedzone dowodem, że jest on bezpieczny. Dla omawianego przykładu scenariusze przewidywały m. in.:

- uszkodzenie samolotu po wylądowaniu, uniemożliwiające zwolnienie drogi startowej,
- brak właściwej orientacji pilota, który po wylądowaniu, zamiast zwolnić drogę startową będzie oczekiwał na obsługę,
- awarię czujnika zajętości drogi startowej (będącego elementem planowanego systemu),
- awarię łącza komunikacyjnego pomiędzy czujnikiem zajętości drogi startowej a kolejnym samolotem podchodzącym do lądowania,
- niezauważenie przez pilota samolotu podchodzącego do lądowania sygnału o zajętości drogi startowej,
- zignorowanie sygnału zajętości drogi startowej, mimo jego właściwego odebrania,

- niezauważenie przez pilota samolotu lądującego innego samolotu zajmującego drogę startową (np. wskutek złej widzialności czy nadmiernej koncentracji na własnej operacji lądowania),
- zły stan drogi startowej (np. oblodzenie) uniemożliwiający wyhamowanie w czasie nominalnym.

Jak widać scenariusze te pozwalają na analizowanie zarówno błędów ludzkich jak i błędów technicznych, czy organizacyjnych. Wyniki badań wskazują, że prawdopodobieństwo kolizji jest zależne od częstości zgłoszeń do lądowania i waha się od $3 \cdot 10^{-10}$ dla 3 lądowań na godzinę do $1,4 \cdot 10^{-9}$ dla 15 lądowań na godzinę.

Analiza metodą TOPAZ pozwala dodatkowo uzyskać interesujące wyniki niedostępne przy innych metodach. Dla omawianego przykładu pokazuje na przykład, że znacznie większy jest wpływ świadomości, uwagi i właściwej oceny sytuacji przez pilota niż stan niezawodnościowy technicznych elementów systemu (czujników, łączy komunikacyjnych) czy też stan nawierzchni drogi startowej. Przykład ten pokazuje także możliwe nowe obszary zastosowania metody dla systemów dopiero projektowanych. Dzięki przeprowadzonym analizom można wskazać, które elementy systemu są najważniejsze dla bezpieczeństwa i jakie testy należy przeprowadzić (jakie dane należy zebrać) w warunkach rzeczywistych, aby wykazać, że projektowany system jest bezpieczny i spełnia wymagania odnośnie niezawodności.

3. Modele ryzyka kolizji

Podstawową metodą wykorzystywaną przez służby zarządzania ruchem lotniczym do zapewnienia bezpiecznego przebiegu lotu samolotów w podległej przestrzeni powietrznej jest stosowanie separacji. Separacja to minimalna odległość pomiędzy samolotami, określona niezależnie w czterech wymiarach, której zachowanie zapewnia, że lot jednego samolotu nie będzie zakłócany przez lot innego samolotu. Podstawowym zadaniem kontrolera ruchu lotniczego jest dbanie o to, aby żadna przepisowa separacja nie została naruszona – zarówno w powietrzu, jak i na ziemi.

W ciągu ostatnich lat ruch lotniczy w sposób ciągły narasta. Pojawia się więc coraz intensywniej problem poszukiwania metod zwiększania przepustowości. Jedną z metod, bardzo skuteczną, jest redukcja separacji. Podjęcie decyzji o dopuszczeniu do stosowania zmniejszonego minimum separacyjnego, musi być jednak poprzedzone odpowiednią analizą ryzyka. Pomocne są w tym różnego rodzaju modele pozwalające na oszacowanie prawdopodobieństwa incydentu czy wypadku lotniczego o takim charakterze.

3.1. Modele kolizji na skrzyżowaniu

Modele kolizji na skrzyżowaniu tras lotniczych zostały zapoczątkowane pracami Siddiquee np. [22] w latach 70-tych. Niewiele później zaczęto wykorzystywać te modele do oceny ryzyka w ruchu lotniczym. Modele kolizji na skrzyżowaniu bazują na założeniu, że samoloty poruszają się zgodnie z zaplanowanymi trajektoriami, ze stałą prędkością. Prawdopodobieństwo kolizji na skrzyżowaniu jest obliczane na podstawie: analizy intensywno-

ści ruchu na każdym z odcinków tras przyległych do skrzyżowania, prędkości samolotu, wielkości (geometrii) samolotu.

Przykładem zastosowania tej metody oceny ryzyka w polskich warunkach jest praca [18]. Przeanalizowano tam częstości występowania sytuacji konfliktowych na skrzyżowaniu dla ustalonych warunków ruchu, a także dla przypadku zmiany poziomu lotu. Wyniki zostały wykorzystane dla oceny poziomu bezpieczeństwa w ruchu lotniczym kontrolowanym.

3.2. Geometryczne modele konfliktu

Metoda oceny ryzyka operacji lotniczych oparta o tzw. geometryczne modele konfliktu jest podobna do metod opartych o modele kolizji na skrzyżowaniu. Podobnie jak tam, tak i tutaj przyjmuje się, że prędkości poruszania się samolotów są stałe, jednak przyjmuje się założenie, że początkowe położenie samolotów rozpatrywanych przy analizie prawdopodobieństwa kolizji jest dane pewną zmienną losową [17]. Ekstrapolując ich położenia w czasie trwania rozpatrywanej sytuacji poszukuje się takich położzeń wyjściowych, dla których kolizja jest możliwa. Położenia te opisuje się geometrycznie jako pewną figurę – płaską lub przestrzenną. Oszacowanie prawdopodobieństwa konfliktu uzyskuje się przez analizę gęstości prawdopodobieństwa początkowego położenia samolotów w przestrzeni powietrznej przyjętej do badania.

Pierwsze opracowania dotyczące zarówno modeli kolizji na skrzyżowaniach oraz geometrycznych modeli konfliktu dotyczyły wyłącznie zagadnienia prawdopodobieństwa poważnego naruszenia separacji. W późniejszych, np. [10], analizowano także skutki tych incydentów, co daje możliwość analizy ich ryzyka.

3.3. Metoda Reicha

Zakłada się w niej że występują losowe odchylenia zarówno położenia jak i prędkości samolotów w stosunku do wartości nominalnych (planowanych). Samoloty są reprezentowane przez prostopadłościany o określonych wymiarach w przestrzeni trójwymiarowej [21].

Poszczególne wymiary tych prostopadłościanów odpowiadają separacji poziomej, pionowej i bocznej odpowiadającej badanej przestrzeni powietrznej. Zauważono, że kolizja może nastąpić tylko wówczas, gdy prostopadłościany mają punkty wspólne. Inne podejście polega na reprezentowaniu jednego z samolotów jako bezwymiarowy punkt [25]. Przyjmuje się wówczas, że kolizja może nastąpić tylko wówczas, gdy punkt ten znajduje się wewnątrz prostopadłościanu wyznaczonego wokół innego samolotu.

Podobna idea została zastosowana w metodach obszarów separacyjnych opisanych w [28]. Odrzucono tam jednak prostopadłościenny kształt bryły otaczającej samoloty jako odpowiadający jedynie przyjętym separacjom, a więc uregulowaniom typu prawnego, a nie rzetelnej analizie faktycznego zagrożenia wypadkiem. Taka analiza prowadzi do przyjęcia innych kształtów tych brył, przy czym najlepsze rezultaty uzyskuje się przy stosowaniu metody obszarów złożonych [27]. W metodach tych nie wyznacza się ryzyka operacji lotniczej ani nie operuje się pojęciem prawdopodobieństwa kolizji. Wprowadza się natomiast pojęcie poziomu bezpieczeństwa. W zależności od konkretnej realizacji metody obszarów separacyjnych jest ono odwrotnie proporcjonalne do stopnia zagnieżdżenia w obszarze separacyj-

nym punktu odpowiadającego przeszkodzie (metoda dyskretna) lub też do objętości części wspólnej obszarów separacyjnych wyznaczonych wokół pary analizowanych samolotów (metoda ciągła) [26].

3.4. Uogólniona metoda Reicha

W podstawowej metodzie Reicha prawdopodobieństwo kolizji wyznacza się na podstawie funkcji gęstości rozkładu wielowymiarowej zmiennej losowej

$$(1) \quad f(\vec{r}, \vec{v}) \equiv f(r_x, r_y, r_z, v_x, v_y, v_z)$$

gdzie:

$$(2) \quad \vec{r} \equiv (r_x, r_y, r_z) \equiv \vec{r}_1 - \vec{r}_2$$

$$(3) \quad \vec{v} \equiv (v_x, v_y, v_z) \equiv \vec{v}_1 - \vec{v}_2$$

$\vec{r}_1, \vec{v}_1, \vec{r}_2, \vec{v}_2$ – wektor położenia i wektor prędkości, odpowiednio samolotu pierwszego i drugiego

W odniesieniu do funkcji gęstości (1) formułuje się pewne założenia:

1. Gęstość jest niezależna od wymiarów x, y, z, tzn.

$$(4) \quad f(\vec{r}, \vec{v}) = f_x(r_x, v_x) \cdot f_y(r_y, v_y) \cdot f_z(r_z, v_z)$$

gdzie: f_x, f_y, f_z to rozkłady brzegowe $f(\vec{r}, \vec{v})$.

2. Gęstość jest niezależna od wymiarów samolotu.
3. Prędkość i położenie samolotu są niezależne od siebie.
4. Samoloty poruszają się wzdłuż linii prostych, co oznacza, że przestrzenna orientacja wyznaczonych prostopadłościów nie ulega zmianie.
5. Wszystkie samoloty mają taki sam kształt (w sensie geometrycznym).
6. Nie występują interwencje kontrolerskie lub manewry omijające.

Niektóre z powyższych założeń są bardzo restrykcyjne. Dotyczy to szczególnie założenia 1 oraz 3. W szczególności prędkość w jednym kierunku zazwyczaj jest zależna od prędkości w pozostałych, na przykład prędkość wznoszenia jest zazwyczaj zależna od prędkości poziomej. Usunięcie tych dwóch założeń prowadzi do tzw. uogólnionego modelu Reicha, który został omówiony w [3]. W przypadku, gdy funkcja gęstości rozkładu zmiennej losowej $f(\vec{r}, \vec{v})$ jest kombinacją rozkładów normalnych stosunkowo prosto można uzyskać wyniki metodami numerycznymi.

4. Modele błędów ludzkich

Ludzie zaangażowani w proces zarządzania ruchem lotniczym są dobierani szczególnie starannie, według ściśle określonych, bardzo ostrych kryteriów. Przechodzą wielostronne i powtarzane szkolenia oraz badania sprawdzające ich przydatność do wykonywania powierzonej im pracy. Można zatem przypuszczać, że częstotliwość popełniania przez nich błędów jest niska w porównaniu do innych obszarów aktywności ludzkiej. Niestety, zdecydo-

wanie więcej zdarzeń w ruchu lotniczym jest spowodowanych błędami ludzkimi niż błędami sprzętu, czy oprogramowania wykorzystywanych systemów technicznych. Najczęściej wykorzystywane metody analizy ryzyka błędów ludzkich zostały zasygnalizowane poniżej.

1. Metoda HAZOP (Hazard and Operability) [12], w której określa się prawdopodobieństwo przekształcenia pojedynczych (izolowanych) zagrożeń w poważne zdarzenia o poważnych konsekwencjach. W roku 2000 metoda została wykorzystana w Wielkiej Brytanii, przez służby zarządzania ruchem lotniczym do oceny skutków wprowadzenia elektronicznego systemu przetwarzania tzw. pasków postępu lotu. Efektem zastosowania metody HAZOP było 87 rekomendacji do modyfikacji badanego systemu.
2. Metoda oceny i redukcji ryzyka błędu ludzkiego (HEART – Human Error Assessment and Reduction Techniques). Interesujący jest przykład wykorzystania jej na potrzeby służb ruchu lotniczego w Wielkiej Brytanii [23]. Analizowano jaki jest wpływ zastosowania zaawansowanych systemów wspomaganie kontrolera na prawdopodobieństwo popełnienia błędu, zdefiniowane jako stosunek liczby popełnionych błędów do liczby okazji do ich popełnienia.
3. Metoda TRACER (Technique for the Retrospective Analysis of Cognitive Errors) [24], opracowana specjalnie na potrzeby służb zarządzania ruchem lotniczym. Metoda jest retrospektywna, to znaczy służy do analizy przypadków, w których błędy ludzkie już wystąpiły i stały się przyczyną zdarzeń lotniczych. Metoda okazała się na tyle skuteczna, że wykorzystuje się ją także w pracach Eurocontrol, na przykład w projekcie ASAS (Airborne Separation Assurance System) [4], który zakłada oddanie pełnej odpowiedzialności za zachowanie separacji pilotom, wyposażonym w odpowiednie systemy wspomaganie zainstalowane na samolotach.
4. Metoda HERA, opracowana przez Europejską Organizację Bezpieczeństwa Ruchu Lotniczego (Eurocontrol). Składa się z dwóch części [11]. W pierwszej analizuje się retrospektywnie zaistniały incydent, w celu znalezienia miejsca w systemie gdzie błąd się pojawił, a także określa się parametry systemu, które sprzyjały pojawieniu się błędu. W drugiej części, perspektywicznej, analizuje się jaki będzie efekt analogicznego ciągu błędów kontrolera, w przypadku zastosowania nowych systemów wspomaganie, czy procedur operacyjnych.
5. Metoda HFACS (Human Factor Analysis and Classification System). Analiza konkretnych wypadków tą metodą [15] pokazuje, że w ruchu lotniczym istnieje silny związek pomiędzy błędami na poziomie operacyjnym i organizacyjnym. Potwierdza to tezę Reasona, że błędy aktywne są wspomagane przez błędy ukryte w organizacji i nadzorze.

5. Modele ryzyka naziemnego

Największe narażenie na szkody wynikające z ruchu lotniczego dotyczy osób uczestniczących w nim aktywnie: załóg statków powietrznych i pasażerów. Istnieje jednak pewne prawdopodobieństwo utraty życia lub zdrowia w wyniku wypadków lotniczych przez osoby nie uczestniczące aktywnie w ruchu lotniczym. Do tej pory zastosowano trzy znaczące modele do analizy ryzyka naziemnego, opracowane w Stanach Zjednoczonych

[20], Holandii [1] i Wielkiej Brytanii [19]. Poniżej zostanie zasygnalizowana metoda holenderska.

5.1. Metoda NLR (Holandia)

W Holandii przeprowadzono badania odnośnie ryzyka śmierci w okolicy lotniska Schiphol w Amsterdamie. Jest to bardzo reprezentatywny przypadek, gdyż lotnisko to jest położone w gęsto zaludnionym obszarze.

W opracowanej metodzie badania ryzyka naziemnego uwzględniono następujące modele [1]:

- model prawdopodobieństwa wypadku, uwzględniający rodzaj manewru (start, lądowanie) oraz wielkość ruchu lotniczego w ciągu roku,
- model prawdopodobieństwa lokalizacji wypadku, uwzględniający położenie względem dróg startowych oraz procedur przylotu i odlotu,
- model skutków wypadku, łączący wyniki uzyskane z poprzednich modeli.

Dzięki stosowaniu metody możliwe jest obliczenie;

- ryzyka indywidualnego, definiowanego jako prawdopodobieństwo tego, że osoba mieszkająca w określonym miejscu w otoczeniu lotniska, straci życie w ciągu roku, w bezpośrednim następstwie wypadku lotniczego,
- ryzyka społecznego (grupowego), definiowanego jako prawdopodobieństwo tego, że określona liczba osób jednocześnie straci życie w wyniku pojedynczego wypadku lotniczego.

6. Podsumowanie

Służby zarządzania ruchem lotniczym stoją przed rozwiązaniem dwóch zasadniczych problemów. Pierwszy z nich to umożliwienie wszystkim użytkownikom przestrzeni powietrznej zrealizowania przelotów zgodnie z wcześniejszymi planami, bez zakłóceń i opóźnień. Drugie z nich to zapewnienie bezpieczeństwa wszystkim uczestnikom ruchu. Zadania te są częściowo sprzeczne i wymagają wypracowania kompromisowych wartości pomiędzy przepustowością przestrzeni powietrznej, a ryzykiem jakie z ruchem lotniczym się wiąże. Jest to o tyle trudne, że warunki rynkowe i presja społeczna powodują konieczność zwiększania przepustowości i jednocześnie zmniejsza się akceptowalne ryzyko związane z podróżami powietrznymi. Metody analizy ryzyka przedstawione w tym artykule mogą w znaczący sposób ułatwić to zadanie.

Bibliografia

1. Ale B., Risk assessment practices in the Netherlands, *Safety Science vol. 40, pp. 105-126, Elsevier 2002.*

2. Ale B., Bellamy L.J., Cooke R.M., Goossens L.H., Hale A.R., Roelen A.L., Smith E., Towards a casual model for air transport safety, *Safety Science* vol. 44, pp. 657-673, Elsevier 2006.
3. Bakker G., Blom H., Air Traffic Collision Risk Modelling, *Proc. of 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, p.1404-1409, 1993.
4. Brooker P., Airborne Separation Assurance Systems: towards a work programme to prove safety, *Safety Science*, vol. 42, p. 723-754, Elsevier 2004.
5. Brooker P., Reducing mid-air collision risk in controlled airspace: Lessons from hazardous incidents, *Safety Science*, vol. 43, p. 715-738, Elsevier 2005.
6. Brooker P., Air Traffic Management accident risk. Part 1: The limits of realistic modelling, *Safety Science*, vol. 44, pp. 419-450, Elsevier 2006.
7. Brooker P., The Uberlingen accident: Macro-level safety lessons, *Safety Science*, vol. 48, pp. 1483-1508, Elsevier 2008.
8. Foot P.B., A review of the results of a Trial Hazard Analysis of airspace sectors, *CS Report 9427*, CAA, London 1994.
9. Greenwell W.S., Knight J.C., Strunk E.A., Risk-based classification of incidents, *Second workshop on the investigation and reporting of incidents and accidents IRIA 2003*, pp. 39-50, Williamsburg USA.
10. Irvine R., A geometrical approach to conflict probability estimation, *Air Traffic Control Quarterly*, vol. 10, p. 85-113, 2002.
11. Isaac A., Shorrock S., Kirwan B., Human error in European air traffic management: the HERA project, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 75, p. 257-272, Elsevier 2002.
12. Kennedy R., Jones H., Shorrock S., Kirwan B., *A HAZOP analysis of a future ATM system*, *Contemporary Ergonomics 2000*, p. 2-6, London, Taylor & Francis 2000.
13. Krystek R. (red), Integracja metod zarządzania ryzykiem w transporcie, *Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu, t.II Uwarunkowania rozwoju integracji systemów bezpieczeństwa transportu*, WKiŁ 2009.
14. Leva M.C., Ambroggi M., Grippa D., Garis R., Trucco P., Strater O., Quantitative analysis of ATM safety issues using retrospective accident data: The dynamic risk modeling project, *Safety Science*, vol. 47, pp. 250-264, Elsevier 2009.
15. Li W., Harris D., Yu C., Routes to failure: Analysis of 41 civil aviation accidents from the Republic of China using the human factors analysis and classification system, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40, p. 426-434, Elsevier 2008.
16. Luxhoj J.T., Probabilistic Causal Analysis for System Safety Risk Assessments in Commercial Air Transport, *Second workshop on the investigation and reporting of incidents and accidents IRIA 2003*, pp. 17-38, Williamsburg USA.
17. Machol R., An aircraft collision model, *Management Science*, vol. 21, p. 1089-1101, 1995.
18. Maźbic-Kulma B., Malarski M., Skorupski J., Stelmach A., Wybrane wskaźniki oceny bezpieczeństwa ruchu lotniczego, *Modelowanie i optymalizacja – metody i zastosowania*, p. 21-30, Wyd. EXIT, Warszawa 2002.
19. Netjasov F., Janic M., A review of research on risk and safety modelling in civil aviation, *Journal of Air Transport Management*, vol. 14/2008, p. 213-220, Elsevier 2008.

20. Rabouw R.F., Thompson K.M., Cooke R.M., The aviation risk to groundings with spatial variability, *European Safety and Reliability Conference ESREL 2001*.
21. Reich P.G., Analysis of Long Range Air Traffic Systems: Separation Standards – I, II, and III. *Journal of the Institute of Navigation* vol. 19, No. 1, pp. 88-96; No. 2, pp. 169-176; No. 3, pp. 331-338, 1966.
22. Siddiquee W., A mathematical model for predicting the number of potential conflict situations at intersecting air routes, *Transportation Science*, vol. 7 (1974), no 2, p. 158-167.
23. Shorrock S., Kirwann B., Mackendrick H., Kennedy R., Assessing human error in air traffic management systems design: methodological issues, *Le travail humain 2001/3*, volume 64, p. 269-289.
24. Shorrock S., Errors of perception in air traffic control, *Safety Science*, vol. 45, p. 890-904, Elsevier 2007.
25. Shortle J., Xie Y., Chen C., Donohue G., Simulating Collision Probabilities of Landing Airplanes at Non-towered Airports, *Transactions of the Society for Computer Simulation*, vol. 79, no. 10, p. 21-30, 2003.
26. Skorupski J., Measuring of Controlled Air Traffic Safety, *Archives of Transport*, vol. 19, no 1-2, p. 177-191, Warszawa 2007.
27. Skorupski J., Malarski M., Stelmach A., Methods for Determining Air Traffic Safety, *Risk, Reliability and Societal Safety*, vol. 3, p. 2755-2760, Taylor&Francis/Balkema, London 2007.
28. Skorupski J., Metody wymiarowania bezpieczeństwa ruchu lotniczego, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport*, vol. 66, OWPW, Warszawa 2008.
29. Stroeve S.H., Blom H., Bakker G.J., Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation, *Safety Science*, vol. 47/2009, p. 238-249, Elsevier 2009.
30. Wong D.K., Pitfield D.E., Caves R.E., Quantifying and characterizing aviation accident risk factors, *Journal of Air Transport Management*, vol. 12, pp. 352-357, Elsevier 2006.

METHODS OF RISK ANALYSIS IN AIR TRAFFIC CONTROL

Jacek Skorupski

Warsaw University of Technology, Faculty of Transport
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Poland, jsk@it.pw.edu.pl

Risk in air transport is traditionally identified as related to air traffic accidents, resulting usually in many fatalities and great material loss. Severe consequences are the reason that safety was always a key value in this mode of transport. This article reviews the methods of risk analysis. They are grouped by the methods based on: causal models, models of the risk of collision, human error models and third-party risk models. Presented methods can be applied in the evaluation and design of air traffic management systems.