

Michał Lower, Jan Magott

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki

Jacek Skorupski

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

ANALIZA INCYDENTÓW LOTNICZYCH Z ZASTOSOWANIEM ZBIORÓW ROZMYTYCH

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono analizę ilościową, w odniesieniu do poważnych incydentów lotniczych. Są one bardzo ważnym i cennym źródłem wiedzy o systemach zapewniania bezpieczeństwa w transporcie lotniczym. Określenie "poważny incydent lotniczy" obejmuje bardzo niebezpieczne zdarzenia, w których zawiodły prawie wszystkie (najczęściej oprócz jednej) bariery chroniące przed wypadkiem.

Problem badawczy podejmowany w artykule to szacowanie prawdopodobieństwa przekształcenia incydentu w wypadek. Ze względu na brak danych statystycznych skłaniamy się do poszukiwania prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń sprzyjających wypadkowi w obszarze ocen eksperckich. Te w sposób oczywisty są często niejednoznaczne i nieprecyzyjne, co sprawia, że proponujemy zastosowanie metod rozmytych w analizie incydentów. W niniejszej pracy skoncentrowano się na poszukiwaniu wyrażeń dla rozmytego prawdopodobieństwa wypadku, przyjmując że w tych okolicznościach konsekwencje miałyby katastrofalną dolegliwość. W ramach analizy statycznej, dla scenariuszy grożących wypadkiem przedstawiono formuły na rozmyte prawdopodobieństwo ich realizacji. Podstawą jest analiza drzewa zdarzeń za pomocą rozmytych prawdopodobieństw. W analizie dynamiki incydentu, opartej na wnioskowaniu rozmytym, celem jest oszacowanie rozmytego prawdopodobieństwa dla scenariuszy grożących wypadkiem. Analiza dynamiki nałożona na rozmyte oszacowanie prawdopodobieństwa realizacji scenariuszy pozwoli na określenie prawdopodobieństwa wypadku, a w przyszłości także na określenie innych niż katastrofalne skutków analizowanego zdarzenia.

W pracy przedstawiono sposób analizy incydentów lotniczych z zastosowaniem zbiorów rozmytych na przykładzie wybranego poważnego incydentu, który miał miejsce na lotnisku im. Chopina w Warszawie. Podczas incydentu miał miejsce jednoczesny start dwu samolotów na krzyżujących się drogach startowych. Dla scenariuszy kontynuacji startu przez oba samoloty przedstawione zostały formuły na rozmyte prawdopodobieństwo ich realizacji. W zakresie analizy dynamiki incydentu opracowany został schemat wnioskowania rozmytego w celu oszacowania rozmytego prawdopodobieństwa kolizji w przypadku, gdyby samoloty kontynuowały start.

Słowa kluczowe: poważny incydent lotniczy, prawdopodobieństwo rozmyte, wnioskowanie rozmyte

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z Ustawą o zarządzaniu kryzysowym, transport w zakresie obejmującym transport drogowy, kolejowy, lotniczy, morski, żegluga śródlądową jest jedną z jedenastu infrastruktur krytycznych [15].

Komunikacja lotnicza powszechnie jest uważana za najbezpieczniejszy rodzaj transportu. Jest tak w istocie, głównie dzięki bezkompromisowemu podejściu do kwestii zapewnienia pasażerom bezpieczeństwa, które od wielu lat jest priorytetem działania wszystkich podmiotów zaangażowanych w proces transportowy w lotnictwie. Ustanawiane są liczne bariery - techniczne, proceduralne, organizacyjne, zarządcze - mające na celu niedopuszczenie do wypadków lotniczych. Mimo to zdarza się, że wszystkie te zabezpieczenia zawodą, najczęściej z powodu błędów ludzkich. W takiej sytuacji dochodzi do tragicznych w skutkach wypadków lotniczych, które są szczegółowo badane pod kątem określenia przyczyn i okoliczności tych zdarzeń. Badanie to ma zazwyczaj charakter jakościowy [5].

W niniejszej pracy proponujemy analizę ilościową, w odniesieniu do poważnych incydentów lotniczych. Są one bowiem również bardzo ważnym i cennym źródłem wiedzy o systemach zapewniania bezpieczeństwa w transporcie lotniczym. Określenie "poważny incydent lotniczy" obejmuje zazwyczaj bardzo niebezpieczne zdarzenie, w którym zawiodły prawie wszystkie (najczęściej oprócz jednej) bariery chroniące przed wypadkiem. Fakt ten pozwala na podjęcie próby ilościowej oceny prawdopodobieństwa zawodności każdego z elementów wspomnianego systemu zapewniania bezpieczeństwa. Niestety w większości przypadków nie dysponuje się materiałem o charakterze statystycznym pozwalającym na określenie częstości zdarzeń składających się na scenariusze wypadkowe. Nie istnieją również metody pomiarowe pozwalające na uzyskanie takich danych. Wynika to z dwóch powodów. Pierwszym jest niezwykła rzadkość tych zdarzeń, a także, do niedawna, brak powszechnej świadomości konieczności zgłaszania zdarzeń lotniczych o mniej istotnych konsekwencjach. Drugi powód to bardzo częsty udział tzw. czynnika ludzkiego w omawianych zdarzeniach, gdzie analiza prawdopodobieństwa takiej czy innej reakcji, czy też prawdopodobieństwa popełnienia błędu jest obarczona bardzo dużą niepewnością oraz subiektywizmem ocen. Jedyna realnie dostępna metoda pozyskiwania wiedzy o wielu tego rodzaju procesach, to oceny ekspertów. Te, w sposób oczywisty, charakteryzują się również brakiem precyzji i jednoznaczności pozwalającej na zastosowanie np. metod probabilistycznych w analizie.

W analizie bezpieczeństwa, niezawodności i ryzyka często informacja jest niepewna i nieprecyzyjna. W pracy [1] zawarto następujący przegląd metod reprezentacji niepewności:

- Rachunek prawdopodobieństwa,
- Nieprecyzyjne (przedziałowe) prawdopodobieństwo,
- Analiza ograniczeń probabilistycznych,
- Teoria możliwości (źródła: rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna, teoria zbiorów rozmytych),
- Teoria argumentacji Dempster'a-Shafer'a.

Prezentowane w naszej pracy podejście do analizy incydentów lotniczych mieści się w opartym na teorii możliwości. W książce [7] zawarte są trzy podejścia do niezawodności i bezpieczeństwa w warunkach niepełnej i nieprecyzyjnej informacji:

- Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna,
- Teoria zbiorów rozmytych,
- Teoria możliwości (inspirowana dwoma poprzednimi).

W analizie incydentów lotniczych należy uwzględnić dwie składowe: analizę statyczną i analizę dynamiki.

Analiza statyczna może być prowadzona z użyciem np. rozmytych drzew niezdatności [12, 13] i rozmytych drzew zdarzeń [4]. W drzewach tych, w odróżnieniu od klasycznych drzew niezdatności i zdarzeń gdzie stosuje się miary probabilistyczne, należy posługiwać się miarą możliwości reprezentującą rozmyte prawdopodobieństwo.

Analiza dynamiczna jest wykonywana w dziedzinie czasu. Jedną z możliwości jest posługiwanie się minimalnymi i maksymalnymi wartościami parametrów czasowych tak jak w przykładzie z zakresu kolejnictwa badanym w pracy [6]. Inną jest operowanie rozkładami prawdopodobieństwa wartości parametrów czasowych jak w pracy [2] gdzie rozważana jest koordynacja czasowa zabezpieczeń odległościowych linii wysokich napięć do transmisji energii elektrycznej. Kolejnym podejściem jest analiza oparta na zbiorach rozmytych prezentowana w naszej pracy.

W niniejszej pracy zostanie przedstawiony sposób prowadzenia analizy wybranego poważnego incydentu w ruchu lotniczym, który miał miejsce na lotnisku im. Chopina w Warszawie. W kolejnym etapie, na podstawie przyjętych wartości zmiennych lingwistycznych przeprowadzona będzie analiza ilościowa. W prezentowanym w pracy podejściu, wykorzystana będzie teoria zbiorów rozmytych do oszacowania prawdopodobieństwa przekształcenia się incydentu w wypadek. Szacowanie to przebiega dwuetapowo - w pierwszym etapie analizuje się scenariusze, w których zawiodą wszystkie bariery chroniące przed powstaniem wypadku, zaś w drugim etapie przeprowadza się analizę zjawisk dynamicznych zmierzającą do określenia prawdopodobieństwa kolizji w przypadku realizacji któregokolwiek ze scenariuszy z etapu pierwszego

2. ZDARZENIE LOTNICZE NR 344/07

Analiza incydentów wykorzystująca wnioskowanie rozmyte zostanie zilustrowana przykładem poważnego incydentu lotniczego, który wydarzył się w 2007 r. w Warszawie pomiędzy samolotami Boeing 767 a Boeing 737. Jego przyczyna została zakwalifikowana do kategorii „czynniki ludzkie” i grupy przyczynowej H4 – „błędy proceduralne” [14].

2.1. OPIS OKOLICZNOŚCI ZDARZENIA

W zdarzeniu w dniu 13 lipca 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 oczekiwanie 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 świadczyły, 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 się 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.

2.2. CZYNNIKI SPRZYJAJĄCE INCYDENTOWI I CZYNNIKI HAMUJĄCE ROZWÓJ WYPADKU

Oba samoloty biorące udział w incydencie rozpoczęły procedurę startu w tym samym momencie. Ich charakterystyka dynamiczna podczas startu jest podobna, zatem 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 takiego zagrożenia. 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.

2.3. PRZESŁANKI SPRZYJAJĄCE WYPADKOWI

W omawianym przypadku można zauważyć, że wystarczy nałożenie się tylko jednego dodatkowego czynnika zagrażającego (ewentualnie kombinacji dwóch czynników) i incydent byłby w rzeczywistości wypadkiem. Można wyróżnić kilka takich przesłanek sprzyjających wypadkowi [11].

1. Warunki pogodowe, widzialność jest na tyle słaba, że nie sposób zauważyć rzeczywistej sytuacji ruchowej. Dotyczy to zarówno załogi B767, pilota ATR 72 i kontrolera.
2. Pilot ATR 72 nie monitoruje wzrokowo sytuacji na drogach startowych tylko spokojnie czeka na zgodę dla siebie na zajęcie drogi startowej.
3. Pilot ATR 72 wprawdzie zauważa niebezpieczną sytuację, ale zamiast natychmiast poinformować o niej przez radio – omawia ją z pozostałymi członkami własnej załogi.
4. Załoga B767 zajęta realizowaniem procedury startu nie zwraca uwagi na komunikat przekazany przez radio przez pilota ATR 72.
5. 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.”
6. 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.
7. Załoga B737 reaguje niewłaściwie na polecenie kontrolera ruchu lotniczego i nie przerywa procedury startowej.
8. Stan nawierzchni uniemożliwia skuteczne hamowanie przed skrzyżowaniem dróg startowych.
9. Czas reakcji kontrolera i obu pilotów jest na tyle duży, że skuteczne hamowanie przed skrzyżowaniem dróg startowych jest niemożliwe.

2.4. SCENARIUSZE PROWADZĄCE DO WYPADKU

Jak wskazano wyżej, niewielka liczba zdarzeń sprzyjających wypadkowi wystarczy dla przekształcenia incydentu w wypadek. Istnieje kilka scenariuszy, które rozpatruje się w tym kontekście w niniejszej pracy. Zależności logiczne między scenariuszami prowadzącymi do wypadku a przesłankami sprzyjającymi wypadkowi, w sposób schematyczny, przedstawia Tabela 1. Przyjęto oznaczenia: 1 - przesłanka zaszła, 0 - przesłanka nie zaszła, b.z. - zajęcie przesłanki nie ma znaczenia dla przekształcenia się

incydentu w wypadek lub jest tylko jedna sensowna wartość tej przesłanki. W tabeli uwzględniono przesłanki 1-7, zaś przesłanki 8 i 9 zostały włączone do analizy dynamicznej.

Tabela 1

Scenariusze przekształcenia się incydentu 344/07 w wypadek

| | 1. Niewystarczająca widzialność | 2. ATR 72 nie monitoruje | 3. ATR 72 nie ostrzega | 4. B767 nie słyszy ostrzeżenia | 5. B767 nie przerywa startu | 6. Asystent nie informuje | 7. B737 nie wykonuje polecenia |
|--------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Scenariusz 1 | 1 | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. |
| Scenariusz 2 | 0 | 1 | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. |
| Scenariusz 3 | 0 | 0 | 1 | b.z. | b.z. | b.z. | b.z. |
| Scenariusz 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | b.z. | 1 | b.z. |
| Scenariusz 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | b.z. | 0 | 1 |
| Scenariusz 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | b.z. |
| Scenariusz 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Powyższe scenariusze kontynuacji startu przez samoloty B767 i B737 zostały wyznaczone z użyciem drzewa zdarzeń, które ze względu na ograniczenie objętości pracy jest pominięte.

2.5. KONCEPCJA METODY ANALIZY INCYDENTU

Oszacowanie prawdopodobieństwa realizacji poszczególnych scenariuszy pozwoliłoby na określenie prawdopodobieństwa zaistnienia wypadku w konsekwencji tego zdarzenia lotniczego. Niestety realizacja większości tych scenariuszy jest uzależniona od wielkości niemierzalnych a także niedostępnych dla analiz statystycznych. Na przykład w scenariuszu 2 nie sposób określić przy użyciu metod pomiarowych jak często załoga koncentruje się wyłącznie na swoich procedurach i zwraca niewielką uwagę na zdarzenia zewnętrzne. Podobnie jest w scenariuszach 5, 6 czy 7, w których mamy do czynienia z błędami załogi czy kontrolera. Oczywiście błędy takie się zdarzają jednak trudno jest oszacować statystycznie prawdopodobieństwo ich popełnienia. Nie znamy rzeczywistej liczby takich błędów (znamy co najwyżej te, które miały konsekwencje w postaci zdarzeń lotniczych), a tym bardziej nie znamy liczby okazji do ich popełnienia, nie ma więc do czego odnieść liczby popełnionych błędów w celu oszacowania ich częstości.

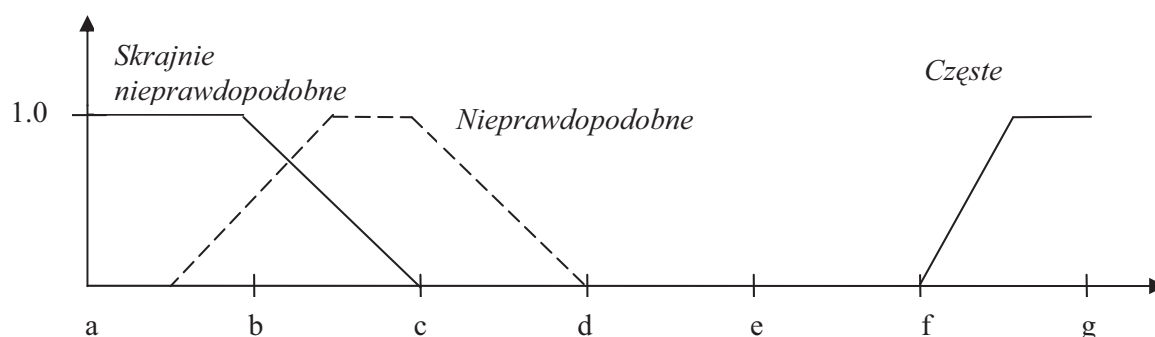
Wymienione powyżej przyczyny skłaniają do poszukiwania prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń sprzyjających wypadkowi w obszarze ocen eksperckich. Te w sposób oczywisty są często niejednoznaczne i nieprecyzyjne, co sprawia, że proponuje się zastosowanie metod rozmytych w analizie incydentów. W niniejszej pracy skoncentrujemy się na poszukiwaniu wyrażen dla rozmytego prawdopodobieństwa wypadku, przyjmując że

w tych okolicznościach konsekwencje miałyby katastrofalną dolegliwość. Przedstawione zostaną dwa zagadnienia. Dla scenariuszy kontynuacji startu przez oba samoloty przedstawione zostaną formuły na rozmyte prawdopodobieństwo ich realizacji. Podstawą będzie analiza drzewa zdarzeń za pomocą rozmytych prawdopodobieństw. Obliczenia wartości tych prawdopodobieństw wymagają ocen eksperckich i będą tematem następnej pracy. Drugie to analiza dynamiki incydentu, oparta na wnioskowaniu rozmytym, której celem będzie oszacowanie rozmytego prawdopodobieństwa kolizji w przypadku, gdy samoloty kontynuują start. Wielkość ta będzie uwzględniała także wymienione wcześniej przesłanki 8 i 9. Przedstawiony będzie schemat wnioskowania rozmytego, natomiast obliczenia będą tematem kolejnej pracy. Analiza dynamiczna nałożona na rozmyte oszacowanie prawdopodobieństwa realizacji scenariuszy pozwoli na określenie prawdopodobieństwa wypadku, a w przyszłości także na określenie innych niż katastrofalne skutków analizowanego zdarzenia.

3. ANALIZA STATYCZNA SCENARIUSZY PROWADZĄCYCH DO WYPADKU

Dla potrzeb zarządzania ryzykiem, skala dotkliwości zdarzeń może być następująca [8]: katastrofalna, niebezpieczna, poważna, niewielka, nieistotna. Analizowany incydent jest w swojej istocie podobny do największej w historii katastrofy lotniczej na Teneryfie. W związku z tym w analizie incydentu przyjmujemy, że wypadek groziłby katastrofalną dolegliwością i koncentrujemy się na wyznaczeniu prawdopodobieństwa.

W [8] zaproponowano następującą skalę prawdopodobieństwa: częste, sporadyczne, niewielkie, nieprawdopodobne, skrajnie nieprawdopodobne. Wartości obu powyższych skal nie są precyzyjne. Każdy ekspert może je zinterpretować nieco inaczej, szczególnie jeżeli pojawią się zdarzenia na krawędzi punktu skali. Niejednoznaczność tych elementów oceny jest możliwa do ujęcia za pomocą teorii zbiorów rozmytych [3, 9]. W dalszych badaniach, wartości skali będą wykorzystane do zbudowania zmiennych lingwistycznych tak jak to wstępnie pokazano na rys. 1 dla zmiennej *Prawdopodobieństwo*.



Rys. 1. Wykres zmiennej lingwistycznej *Prawdopodobieństwo* dla wartości *Skrajnie nieprawdopodobne*, *Nieprawdopodobne* i *Częste*

Oznaczmy przez P_1, P_2, \dots, P_7 prawdopodobieństwa zajścia przesłanek sprzyjających powstaniu wypadku lotniczego, zaś przez $P(S_1), P(S_2), \dots, P(S_7)$ - prawdopodobieństwa realizacji scenariuszy prowadzących do przekształcenia incydentu w wypadek. Prawdopodobieństwa realizacji poszczególnych scenariuszy są następujące:

$$P(S_1) = P_1 \quad (1)$$

$$P(S_2) = (1 - P_1) \cdot P_2 \quad (2)$$

$$P(S_3) = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot P_3 \quad (3)$$

$$P(S_4) = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot P_4 \cdot P_6 \quad (4)$$

$$P(S_5) = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot P_4 \cdot (1 - P_6) \cdot P_7 \quad (5)$$

$$P(S_6) = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_4) \cdot P_5 \cdot P_6 \quad (6)$$

$$P(S_7) = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_4) \cdot P_5 \cdot (1 - P_6) \cdot P_7 \quad (7)$$

Prawdopodobieństwo, że oba samoloty będą kontynuowały start, dane jest wyrażeniem:

$$P_k = P_1 + (1 - P_1) \cdot \left(P_2 + (1 - P_2) \cdot \left(P_3 + (1 - P_3) \cdot \left(P_4 \cdot (P_6 + (1 - P_6) \cdot P_7) + (1 - P_4) \cdot P_5 \cdot (P_6 + (1 - P_6) \cdot P_7) \right) \right) \right) \quad (8)$$

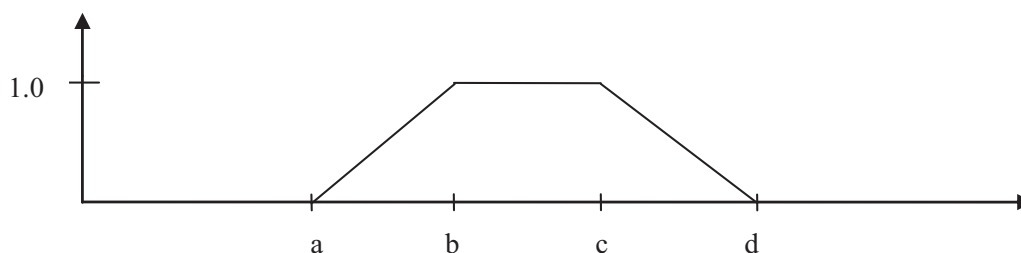
Prawdopodobieństwo wypadku określone jest formułą:

$$P_w = P_k \cdot P(w | k) \quad (9)$$

gdzie $P(w | k)$ jest prawdopodobieństwem wypadku pod warunkiem, że oba samoloty będą kontynuowały start. Prawdopodobieństwo to wyznaczone jest na podstawie analizy dynamicznej opisaną w następnym punkcie.

Prawdopodobieństwa zdarzeń wyrażone wartościami zmiennej lingwistycznej *Prawdopodobieństwo* opisane są trapezowymi funkcjami przynależności zbiorów rozmytych (Rys. 1). Podobnie przyjmuje się w przypadku analizy drzew niezdatności z zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych [12, 13].

Trapezowa funkcja przynależności zbioru rozmytego o parametrach a, b, c, d oznaczana symbolem (a, b, c, d) pokazana jest na Rys. 2



Rys. 2. Parametry trapezowej funkcji przynależności zbioru rozmytego

Użycie rozmytych prawdopodobieństw w analizie drzew zdarzeń opisano w pracy [4]. W publikacji tej pokazano przykład, w którym funkcja przynależności zbiorów rozmytych jest dyskretna. W naszej pracy funkcje przynależności zbiorów rozmytych dla prawdopodobieństw rozmytych reprezentujemy funkcjami trapezowymi.

Iloczyn rozmytych prawdopodobieństw nazwanych możliwościami, określonych dwoma trapezowymi funkcjami przynależności (a_1, b_1, c_1, d_1) i (a_2, b_2, c_2, d_2) jest aproksymowany trapezową funkcją przynależności $(a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2, d_1 \cdot d_2)$.

Dla możliwości P , danej trapezową funkcją przynależności (a_1, b_1, c_1, d_1) , możliwość $1-P$ zadana jest również trapezową funkcją przynależności z parametrami $(1-d_1, 1-c_1, 1-b_1, 1-a_1)$ [12, 13].

W celu określenia wartości zmiennej lingwistycznej *Prawdopodobieństwo* dla scenariusza $P(S_i)$ czy dla kontynuacji startu P_k , wyznaczane jest podobieństwo zbioru rozmytego $P(S_i)$ czy P_k do poszczególnych wartości zmiennej *Prawdopodobieństwo*.

Do wyznaczania podobieństwa zbiorów rozmytych A, B o funkcjach przynależności μ_A, μ_B można wykorzystać podobieństwo Jacard'a zgodnie ze wzorem:

$$s_J(A, B) = \frac{\int \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) dx}{\int \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) dx} \quad (10)$$

Jako wartość prawdopodobieństwa zmiennej lingwistycznej $P(S_i)$ czy P_k wybierana jest wartość zmiennej *Prawdopodobieństwo* o największym podobieństwie do $P(S_i)$ czy P_k , ale należy podać pełną listę podobieństw.

4. ANALIZA DYNAMIKI SCENARIUSZY PROWADZĄCYCH DO WYPADKU

W kontekście dynamicznym proces przekształcania incydentu w wypadek można podzielić na trzy etapy:

- etap pierwszy (Etap I) to czas pozwalający na zauważenie zagrożenia,
- etap drugi (Etap II) to czas potrzebny, na ostrzeżenie pilotów (jeżeli zagrożenie zostało dostrzeżone przez zewnętrznego obserwatora), zorientowanie się pilotów w sytuacji, uświadomienie sobie zagrożenia i podjęcie decyzji pozwalającej uniknąć zderzenia lub zminimalizowania jego skutków,
- etap trzeci (Etap III) to czas potrzebny na wykonanie zaplanowanego manewru awaryjnego.

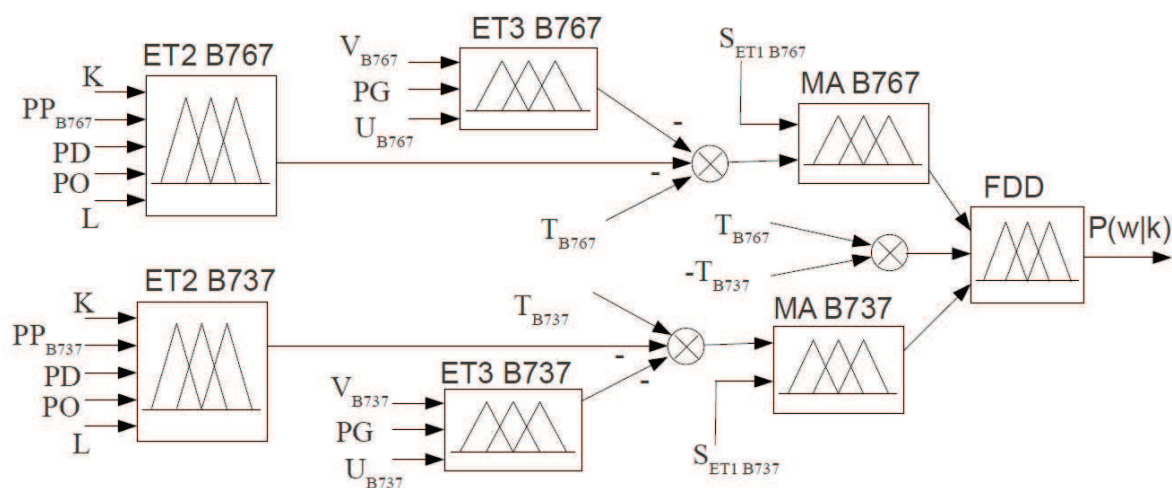
Można przyjąć, że zauważenie zagrożenia ma znaczenie dla zaistniałej sytuacji, jeżeli zrealizowane są wszystkie trzy etapy procesu zauważenia zagrożenia. Dlatego ilość czasu

upływającego od rozpoczęcia manewru do momentu potencjalnego zderzenia jest ważnym parametrem pozwalającym uniknąć wypadku. Im czas potrzebny do osiągnięcia punktu kolizyjnego jest dłuższy, tym większa jest szansa na zaistnienie wszystkich trzech etapów procesu – na zauważenie pomyłki, ostrzeżenie pilotów i sukces podjętych działań awaryjnych.

W omawianym przypadku można zauważyć, że gdyby zaistniał negatywny czynnik zmieniający dynamikę procesu zauważenia zagrożenia, wydłużający tylko jeden z etapów tego procesu o kilka sekund, to incydent byłby w rzeczywistości wypadkiem. Oba samoloty zatrzymały się około 200 m przed punktem zbieżnym. Tego typu samoloty startując są w stanie pokonać odległość 200 m w czasie nie przekraczającym 5 sekund. Można wyróżnić kilka scenariuszy wydłużających ten proces i w konsekwencji prowadzących do wypadku.

1. Wydłużenie czasu pozwalającego na zauważenie zagrożenia (Etap I) o kilka sekund.
 - Pilot ATR 72 zajęty własnymi czynnościami mógł zauważyć zagrożenie kilka sekund później. Należy zwrócić uwagę, że źródłem pozwalającym rozpocząć Etap II dla obu samolotów były działania pilota ATR 72, zatem opóźnienie tych działań wydłużyłoby czas trwania Etapu I dla obu samolotów.
 - Pilot ATR 72 mógł nie mieć możliwości zauważenia zagrożenia gdyby warunki atmosferyczne mu to uniemożliwiły, ograniczając widoczność. W takiej sytuacji jedynym obserwatorem mającym szansę zauważyć zagrożenie był kontroler ruchu lotniczego. Z przebiegu zdarzenia wiadomo, że osoby na wieży kontrolnej zauważyły zdarzenie dopiero po reakcji pilota ATR 72, zatem oczekiwanie na reakcję kontrolerów lotu, bez informacji od ATR72, prawdopodobnie wydłużyłoby czas etapu I poza krytyczne wartości.
2. Wydłużenie czasu potrzebnego na ostrzeżenie pilotów, zorientowanie się pilotów w sytuacji, uświadomienie sobie zagrożenia i podjęcie decyzji pozwalającej uniknąć zderzenia lub zminimalizowania jego skutków (Etap II). Z przebiegu zdarzenia wynika, że oba samoloty zdążyły zahamować, a zatrzymanie jednego z samolotów wystarczyło do uniknięcia wypadku. Zatem wypadek może być konsekwencją wydłużenia tego etapu dla obu samolotów. Piloci obu samolotów funkcjonowali w sugestywnym przeświadczeniu, że mają prawo do startu, mogli zatem nie zwracać uwagi na ostrzeżenia od ATR72. Duży ruch na lotnisku i konieczność wielu komunikatów mogły stać się źródłem zakłócenia sygnału radiowego, utrudniającego właściwe odebranie informacji przez pilotów jak również przez wieżę kontrolną. Na lotnisku mogły panować warunki atmosferyczne ograniczające widzialność i utrudniać zorientowanie się pilotów w sytuacji, z przebiegu zdarzenia wiadomo, że po usłyszeniu ostrzeżenia osobiste zauważenie zagrożenia przez pilota B767 miało znaczenie i pewnie przyśpieszyło jego reakcję. Reasumując można stwierdzić, że nałożenie się tych czynników mogłoby być przyczyną wydłużenia drugiego etapu procesu zauważenia zagrożenia dla obu samolotów.
3. Wydłużenie czasu (Etap III) potrzebnego na wykonanie zaplanowanego manewru awaryjnego. Oba samoloty zatrzymały się 200m przed punktem kolizyjnym, zatem posiadały niewielki zapas na wykonany manewr. Gdyby na lotnisku zaistniały warunki atmosferyczne np. oblodzenie płyty lotniska lub ulewny deszcz czas manewru awaryjnego mógłby wydłużyć się dla obu samolotów nawet kilkakrotnie. Taka sytuacja doprowadziłaby nieuchronnie do wypadku.

Rozmyty model dynamiki incydentu można podzielić na składowe części – modele lokalne, zgodnie z Rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy rozmytego modelu dynamiki incydentu

4.1. MODEL LOKALNY FDD

Model lokalny FDD ma za zadanie wyznaczenie prawdopodobieństwa rozmytego wypadku lotniczego w ujęciu dynamicznym.

Zmienne wejściowe modelu:

- różnica czasów osiągnięcia punktu zbieżnego obu samolotów ($T_z = T_{B767} - T_{B737}$) (wartości zmiennej lingwistycznej – *mała, średnia, duża*),
- manewr awaryjny MA (zauważenie zagrożenia) samolotu B767 (wartości zmiennej lingwistycznej – *bez znaczenia, ograniczający skutki, uniknięcie wypadku*),
- manewr awaryjny MA (zauważenie zagrożenia) samolotu B737 (wartości zmiennej lingwistycznej – *bez znaczenia, ograniczający skutki, uniknięcie wypadku*).

Zmienna wyjściowa modelu:

- prawdopodobieństwo rozmyte wypadku $P(w|k)$ (wartości zmiennej lingwistycznej – *częste, sporadyczne, niewielkie, nieprawdopodobne, skrajnie nieprawdopodobne*).

4.2. MODEL LOKALNY 'MA'

Zadaniem modelu lokalnego MA jest określenie znaczenia manewru awaryjnego (zauważenia zagrożenia).

Zmienne wejściowe modelu:

- czas pozwalający na zauważenie zagrożenia ($T_{R\ B767} = T_{B767} - T_{ET2\ B767} - T_{ET3\ B767}$) (Etap I), gdzie T_{B767} to czas osiągnięcia punktu zbieżnego samolotu, $T_{ET2\ B767}$ to czas potrzebny, na ostrzeżenie pilotów, zorientowanie się pilotów w sytuacji, uświadomienie sobie zagrożenia i podjęcie decyzji pozwalającej uniknąć wypadku (Etap II), $T_{ET3\ B767}$ to czas potrzebny na wykonanie manewru awaryjnego (Etap III) (wartości zmiennej lingwistycznej – *mały, średni, duży*),
- (Etap I) szansa na zauważenie zagrożenia, ($S_{ET1\ B767}$) (wartości zmiennej lingwistycznej – *mała, średnia, duża*).

Zmienna wyjściowa modelu:

- znaczenie manewru awaryjnego (wartości zmiennej lingwistycznej – *bez znaczenia, ograniczający skutki, uniknięcie wypadku*).

4.3. MODEL LOKALNY ET2

Model lokalny ET2 ma za zadanie wyznaczenie czasu potrzebnego na ostrzeżenie pilotów, zorientowanie się pilotów w sytuacji, uświadomienie sobie zagrożenia i podjęcie decyzji pozwalającej uniknąć zderzenia lub zminimalizować jego skutki.

Zmienne wejściowe modelu:

- możliwości komunikacyjne w danym momencie K (wartości zmiennej lingwistycznej – *uniemożliwiający, utrudniający, dobre*),
- pora dnia PD (wartości zmiennej lingwistycznej – *widna, przyciemniona, ciemna*),
- predyspozycji percepcyjnych pilota PP (wartości zmiennej lingwistycznej – *małe, średnie, duże*),
- predyspozycje innych osób biorących udział w zdarzeniu PO np. obserwatorów, (wartości zmiennej lingwistycznej – *małe, średnie, duże*),
- ukształtowanie elementów infrastruktury lotniska L (wartości zmiennej lingwistycznej – *uniemożliwiający, utrudniający, bez znaczenia*).

Zmienna wyjściowa modelu:

- (Etap II) czas potrzebny, na ostrzeżenie pilotów, zorientowanie się pilotów w sytuacji, uświadomienie sobie zagrożenia i podjęcie decyzji pozwalającej uniknąć zderzenia lub zminimalizowania jego skutków (wartości zmiennej lingwistycznej – *mały, średni, duży*).

4.4. MODEL LOKALNY ET3

Zadaniem modelu lokalnego ET3 jest wyznaczenie czasu potrzebnego na wykonanie zaplanowanego manewru awaryjnego.

Zmienne wejściowe modelu:

- prędkość samolotu V_{B767} (wartości zmiennej lingwistycznej – *mała, średnia, duża, VI*),

- warunki atmosferyczne PG (wartości zmiennej lingwistycznej – *złe, utrudniające, bez znaczenia*),
 - umiejętności pilota U_{B767} (wartości zmiennej lingwistycznej – *małe, średnie, duże*).
- Zmienna wyjściowa modelu:
- (Etap III) czas potrzebny na wykonanie zaplanowanego manewru awaryjnego (wartości zmiennej lingwistycznej – *mały, średni, duży*).

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono sposób analizy incydentów lotniczych z zastosowaniem zbiorów rozmytych na przykładzie wybranego poważnego incydentu, który miał miejsce na lotnisku im. Chopina w Warszawie.

Celem analizy jest oszacowanie prawdopodobieństwa przekształcenia incydentu w wypadek.

W pracy skoncentrowano się na poszukiwaniu wyrażeń dla rozmytego prawdopodobieństwa wypadku, przyjmując że w tych okolicznościach konsekwencje miałyby katastrofalną dolegliwość. Przedstawione zostały dwa zagadnienia. Dla scenariuszy kontynuacji startu przez oba samoloty przedstawione zostały formuły na rozmyte prawdopodobieństwo ich realizacji. Podstawą była analiza drzewa zdarzeń za pomocą rozmytych prawdopodobieństw. Drugie to analiza dynamiki incydentu, oparta na wnioskowaniu rozmytym, której celem jest oszacowanie rozmytego prawdopodobieństwa kolizji w przypadku, gdy samoloty kontynuują start. Przedstawiony został schemat wnioskowania rozmytego. Obliczenia wartości tych rozmytych prawdopodobieństw wymagają ocen eksperckich i będą tematem następnych prac.

Bibliografia

1. Aven T., Zio E.: Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making, *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, Vol. 96, p. 64-74.
2. Babczyński T., Łukowicz M., Magott J.: Time coordination of distance protections using probabilistic fault trees with time dependencies, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2010, Vol. 25, No. 3, p. 1402-1409.
3. Kacprzyk J.: *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1986.
4. Kenarangui R.: Event-tree analysis by fuzzy probability, *IEEE Transactions on Reliability*, 1991, Vol. 40 No. 1, p. 120-124.
5. Klich E.: *Bezpieczeństwo lotów w transporcie lotniczym*, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB, Radom 2011.
6. Magott J., Skrobaneck S.: Timing analysis of safety properties using fault trees with time dependencies and timed state-charts, *Reliability Engineering and Systems Safety*, 2012, Vol. 97 No. 1, p. 14-26.
7. Onisawa T., Kacprzyk J. (red.): *Reliability and Safety Analysis under Fuzziness*, Physica-Verlag, Springer, Heidelberg, 1995.
8. *Podręcznik zarządzania bezpieczeństwem*, wydanie drugie, 2009, Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, ICAO, Doc 9859, AN/474, Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2009.

9. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Łódź, 1997.
10. Rajati M. R., Mendel J. M., Wu D.: Solving Zadeh's Magnus challenge problem on linguistic probabilities via linguistic weighted averages, IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ, 2011, 27-30 June.
11. Skorupski J.: Method of analysis of the relation between serious incident and accident in air traffic, in: Advances in Safety, Reliability and Risk Management, Berenguer, Grall, Soares (eds), Taylor & Francis Group, 2012, p. 2393-2401.
12. Tanaka H., Fan L.T., Lai F. S., Toguchi K.: Fault-tree analysis by fuzzy probability, IEEE Transactions on Reliability, 1983, Vol. 32 No. 5, p. 453-457.
13. Tyagi S. K., Pandey D., Tyagi R.: Fuzzy set theoretic approach to fault tree analysis, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, Vol. 2 No. 5, p. 276-283.
14. 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.
15. Ustawa o zarządzaniu kryzysowym z dnia 26 kwietnia 2007 r, Dz. U. Nr 89, poz. 590 z 2007 r.

ANALYSIS OF AIR INCIDENTS WITH THE USE OF FUZZY SETS

Summary: In this paper, we propose a quantitative analysis with regard to serious air incidents. They are a very important and valuable source of information about safety assurance systems in air transport. The term "serious air incident" usually involves a very dangerous event in which almost all protections against accidents have failed (in most cases except one). This fact allows to try to quantify probability failure of each of the elements of the safety assurance system. Unfortunately, in most cases we do not have a statistical material that allows to determine events rate that makes up the accident scenarios.

Estimating probabilities of transforming an incident into an accident is the research problem undertaken in the article. Because of the lack of statistical data we incline towards search of probabilities of accident-conducive events in the field of expert evaluations. These evaluations are obviously often ambiguous and imprecise, which makes that we propose to use fuzzy rules in the incidents analysis. In this article we focus on search of expressions for fuzzy probability of accident, assuming that consequences would be catastrophic in these circumstances. In the case of static analysis, the formulas of fuzzy probability of implementation of near-accident scenarios are presented. The analysis of events tree using fuzzy probabilities is the basis. In the dynamic incident analysis based on fuzzy inference the purpose is the estimation of fuzzy probability of near-accident scenarios. The analysis of dynamics imposed on the fuzzy estimation of scenarios implementation probability allows to determine the accident probability and also to describe non-catastrophic effects of analyzed events.

The paper presents a mode of incidents analysis with the use of fuzzy sets on the chosen example of serious incident, which took place at the Warsaw Chopin Airport. During the incident, the simultaneous take-off of two aircrafts took place on intersecting runways. The fuzzy probability formulas are presented for the realization of scenarios to continue take-off of the two planes. In the analysis of the dynamics of the incident the fuzzy inference scheme has been developed to estimate the fuzzy probability of a collision in case the aircrafts continue to take off.

Keywords: serious air traffic incident, fuzzy probability, fuzzy inference