

Krzysztof Szafran

# Bezpieczeństwo w lotnictwie

## - sytuacje krytyczne w aspekcie teorii analizy subiektywnej

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2018.391  
 Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówiona została jedna z hipotez postawionych przez prof. Kasjanowa W.A. w publikacji [2] dotycząca teorii podejmowania decyzji w sytuacjach zagrożenia. Rozwijana w ostatnich latach metodologia określenia prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji niebezpiecznej, wykorzystująca analizę subiektywną, a w szczególności funkcję entropii, co daje nowe spojrzenie na subiekta, jako decydenta odpowiadającego za bezpieczeństwo w strukturze systemu aktywnego. W poniższej publikacji podjęto próbę zasygnalizowania zagadnień dotyczących pogranicza różnych obszarów wiedzy takich jak matematyka, psychologia, teoria informacji. Analogicznie do teorii informacji, gdzie przez matematyka-informatyka Claude E. Shannona wprowadzone zostało probabilistyczne pojęcie funkcji entropii, istnieje możliwość wyznaczenia wartości entropii w rozważaniach dotyczących teorii wyboru, co bezpośrednio związane jest z podejmowaniem decyzji w sytuacjach krytycznych. W niektórych pracach, które przytoczono w referacie nazwano funkcję określającą decyzję subiekta „entropią subiektywną”. Jest ona ściśle związana z pojęciem wartości informacji posiadanej przez subiekta podejmującego decyzję. Spróbowano pokazać, jak wykorzystanie zasady maksimum entropii stanu systemu dynamicznego może być skutecznym instrumentem badawczym określającym zapas bezpieczeństwa.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo lotu, podejmowanie decyzji, systemy aktywne.

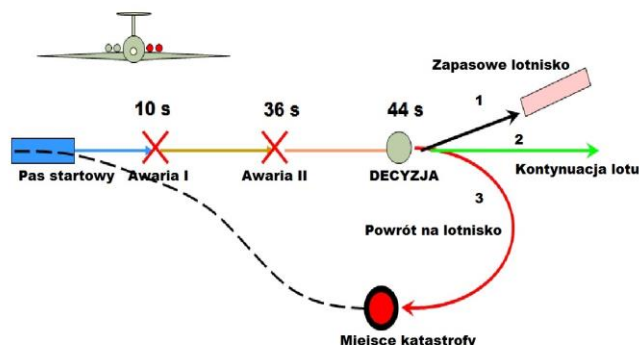
### Wstęp

Z podejmowaniem decyzji spotykamy się na przestrzeni całego świadomego życia. Rozwijana w ostatnich dziesięcioleciach teoria podejmowania decyzji może być zdefiniowana jako wspólny obszar zainteresowania wielu różnych dziedzin nauki obejmujących analizę oraz wspomaganie procesu wypracowania decyzji. Podjęcie decyzji to najczęściej banalne, codzienne sprawy, ale też bardzo ważne i wpływające na otaczający nas świat i bliższą oraz dalszą przyszłość. I tak, co to jest DECYZJA? Najogólniej można stwierdzić, iż jest to świadomy proces wnioskowania i działania na podstawie posiadanych oraz zebranych informacji mający wpływ na przyszłe wydarzenia i będąca wynikiem dokonania wyboru [2,3]. Przyjmijmy, że cała otaczająca nas przestrzeń stanowi aktywny system dynamiczny z niepoliczalną ilością parametrów, w którym decyzja to może być świadomy wybór pomiędzy kawą czy herbatą, a także może być to wydanie wyroku pomiędzy niewinnieniem lub karą śmierci. Waga tak błahych lub ważkich decyzji jest niewspółmierna. Z decyzjami nieodłącznie związany jest zbiór możliwości wyboru, który jest bazą informacyjną uzupełniającą całe spektrum aktywnego systemu. Rozważmy prosty, może nawet prymitywny przykład który zobrazuje proces podejmowania decyzji. Podjęcie decyzji kawa czy herbata ma kilka możliwości wyboru takich jak: możemy nic nie pić, możemy pić kawę, możemy pić herbatę oraz możemy pić kawę i herbatę. W sytuacjach bardziej złożonych decyzje nie są

tak banalne i często mogą być tragiczne w skutkach. Jedną z nich przedstawiono na rysunku 1. W uproszczonym omówieniu sytuacji lotnej pilot wykonujący procedurę startu z przyczyn technicznych - awarii silników miał do wyboru trzy sytuacje – podjęcie właściwej decyzji mogło zapobiec katastrofie. Zdarzenie z uwagi na pierwszy taki przypadek z nowym samolotem, było szczegółowo analizowane. Stworzono rozbudowany model matematyczny w którym uwzględniono parametry mające nawet niewielki wpływ na przebieg zdarzeń. Po wielu badaniach symulacyjnych opracowano model dostatecznie wiernie oddający przebieg awaryjnego startu. Przebieg sytuacji lotnej - w dziesiątej sekundzie po starcie, na wznoszeniu awarii uległ jeden silnik. Pilot nadal nabierał wysokość. W trzydziestej szóstej sekundzie na skutek bliskości z awaryjnym silnikiem, awarii uległ drugi silnik. Pilot wyrównał lot i kontynuował lot na stałej wysokości. W czterdziestej czwartej sekundzie rozpoczął manewr zawracania na lotnisko z którego wystartował, z jednoczesnym zmniejszaniem wysokości. Samolot upadł przy zachodzeniu na ścieżkę schodzenia do pasa startowego. Pilot miał do wyboru jeszcze dwie alternatywne możliwości: kontynuację lotu, lot po prostej na lotnisko zapasowe. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, iż podjęcie decyzji w dwóch pierwszych przypadkach lot z dużym prawdopodobieństwem mógł zakończyć się po myślnie.

Decyzje mogą być podzielone na kategorie. W tej publikacji przyjęto podział ze względu na działania w sytuacjach krytycznych. Możemy wyszczególnić kilka takich kategorii z uwagi na stopień ryzyka;

- decyzja pewna, która doprowadzi do przewidywalnego stanu w przyszłości ze zdefiniowanym zbiorem możliwości wyboru;
- decyzja ryzykowna, w której istnieje duże prawdopodobieństwo przewidywalnego stanu w przyszłości, a jednocześnie nie są możliwe do przewidzenia wszystkie warianty wyboru stanu systemu aktywnego;
- decyzja niepewna, w której jest małe prawdopodobieństwo zaistnienia zdefiniowanego stanu ze zbioru wszystkich możliwości wyboru, w którym nie jesteśmy w stanie wyliczyć prawdopodobieństwa wystąpienia pożądanego stanu systemu.



Rys. 1. Podjęcie błędnej decyzji doprowadziło do katastrofy [ 3,4 ].

W rozważaniach teoretycznych do dalszych analiz przyjmowane są modele podejmowania decyzji. Jednym z nich jest model decyzji

optymalnej, inaczej nazywany modelem racjonalnym. W modelu tym podejmowanie decyzji wiąże się z przyjętą procedurą, w której zbierane są możliwe dostępne informacje o systemie aktywnym, rozpatrywane warianty w zbiorze możliwych wyborów oraz ustalone są kryteria decyzyjne – przykładem może być podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwach produkcyjnych. [4]

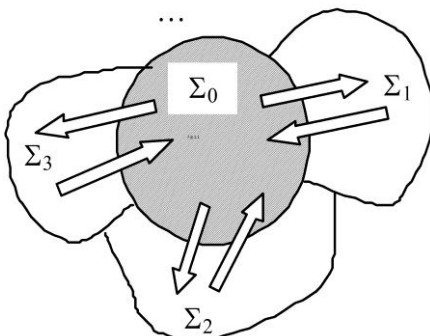
Model racjonalny przyjmowany jest w systemach wolnozmiennych, gdzie decydent dysponuje relatywnie dużym zapasem czasu na wszystkie działania proceduralne. Innym przykładem takiego działania może być podjęcie decyzji o przyznaniu kredytu lub też decyzji o wyborze produktu w postępowaniu przetargowym. [7]

Model ograniczonej racjonalności podejmowania decyzji związany jest z dynamicznym rozwojem stanu systemu i deficytem czasu. Z reguły decydent – subiekt podejmuje decyzję zadowolającą ze wszystkich dostępnych możliwości w danej chwili. Nie jest przeprowadzana procedura optymalizacji. W takim modelu decyzje mają charakter ryzykowny lub niepewny. Przykładem zastosowania takiego modelu ograniczonej racjonalności podejmowania decyzji jest działanie subiekta w sytuacji krytycznej – szczególnie w zagrożeniach związanych z nieprzewidywalnym rozwojem stanów awaryjnych. Także ma to zastosowanie w badaniach przyczyn katastrof, gdzie wiele parametrów jest niewiadome. Modelowanie przebiegu zaistniałej sytuacji i na podstawie modeli zasymulowanie wszystkich możliwych wariantów przebiegu zdarzenia, pozwala wypracować rekomendacje dla decydentów ułatwiające podejmowanie optymalnych decyzji w przyszłych stanach awaryjnych systemów aktywnych. Autor niniejszej pracy wykonywał analizy zaistniałych zdarzeń katastroficznych w oparciu o zasady i metody wynikające z analizy subiektywnej [1,4,5].

## 1. Decyzyjność w systemach aktywnych

Sytuacje konfliktowe, zdarzenia losowe, nagła zmiana stanu w systemach aktywnych prowadzą do powstania sytuacji krytycznych. Rezultatem dynamicznie zmieniających się parametrów może być jakościowo inny, nieprzewidywalny stan systemu. Decyzyjność pewna z dużym prawdopodobieństwem prowadzi do pozytywnego rozwoju systemu w oczekiwanym kierunku i dąży do pozytywnego rezultatu. Natomiast decyzyjność ryzykowna lub niepewna może sprowadzić system aktywny do chaotycznego działania, którego rezultatem z dużym prawdopodobieństwem będzie katastrofa.

Jedną z właściwości systemu aktywnego jest tworzenie własnych problemów, a następnie ich pokonywanie, co w ostateczności nie ma zasadniczego wpływu na końcowy stan systemu [3]. Należy tu zauważyć, iż zasadniczy wpływ na rozwój aktywnego systemu ma subiekt lub grupa subiektów, którzy posiadają swoje indywidualne cechy. Ważną cechą subiekta jest jego preferencja, która zawiera się wyłącznie w psychicznych cechach. Te właściwości subiekta opisane zostały funkcją entropii, a w procesie decyzyjnym nazwane entropią subiektywną.



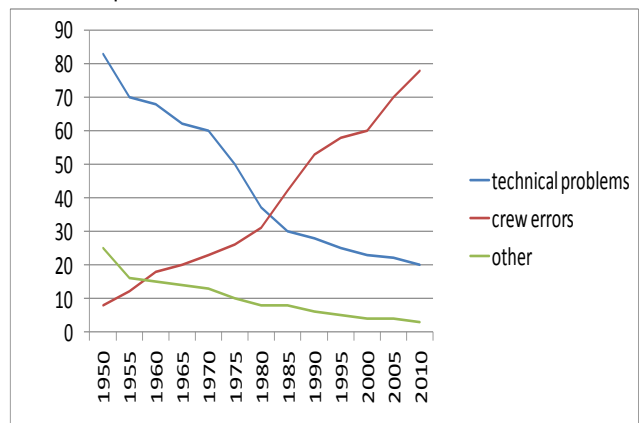
**Rys. 2.** Schemat zależności pomiędzy subiektem, decyzyjnością i systemem aktywnym [2]  $\Sigma_0$  – decydent,  $\Sigma_{1,2,3}$  – subiekt w systemie zależnym.

Na rysunku 1 przedstawiono system aktywny złożony z obiektów, pomiędzy którymi występują zależności decyzyjne, a także prowadzona jest wymiana informacji, która w kolejności ma wpływ na proces decyzyjny.

## 2. Decyzyjność a bezpieczeństwo w lotnictwie

W czasie ostatnich 50 lat analiza danych statystycznych zebranych przez ICAO pokazuje, że poziom bezpieczeństwa lotów w komunikacji pasażerskiej i transportowej wzrósł prawie dziesięciokrotnie w stosunku do danych z 1960 roku. Niewątpliwie jest to spowodowane przez wdrożenie do linii lotniczych bardziej doskonałych oraz niezawodnych samolotów i śmigłowców. Poprawa jakości szkolenia personelu Lotniczego, wprowadzenie nowoczesnych systemów zarządzania ruchem lotniczym, meteorologii wykorzystującej obserwacje satelitarne i przewidywającej zmienne warunki pogodowe w czasie rzeczywistym pozwoliły wyeliminować znaczną ilość zdarzeń związaną z uszkodzeniem sprzętu. Także wzrost poprawy bezpieczeństwa został uzyskany przez zastosowanie udoskonalonych i sprawdzonych procedur na każdym szczeblu działań w transporcie lotniczym.

Jednakże, w ciągu ostatnich dwudziestu lat nie ma oczywistej poprawy uogólnionych wskaźników bezpieczeństwa lotu. Biorąc pod uwagę przewidywany wielokrotny wzrost transportu Lotniczego, przy jednoczesnym braku jakościowo lepszych środków wpływających na poprawę bezpieczeństwa lotów, w obecnym stuleciu prognozowane jest występowanie jednej katastrofy lotniczej co 10 dni. Na rysunku 2 przedstawiono procentowy udział czynników przyczyn katastrof na przestrzeni 60 lat.



**Rys. 3.** Wpływ głównych czynników na przyczyny katastrof lotniczych na przestrzeni 60 lat [1]

Można przyjąć, iż od początku XXI wieku podstawowymi przyczynami wypadków lotniczych są błędy i naruszenia wymaganych procedur przez personel lotny - prawie (70%), a także awarie samolotów, niepomyślne warunki meteorologiczne oraz błędy w organizacji i kontroli lotów [1].

W związku z powyższym wydaje się celowym zwrócenie uwagi na pilota – subiekta, który jest główną przyczyną wypadków lotniczych. Jedną z metod badań przyczyn zwiększających poziom bezpieczeństwa lotów może być wspomniana wyżej zasada maksimum entropii charakteryzująca zachowanie subiekta w złożonych systemach dynamicznych [2,5].

Już w początkach rozwoju komunikacji lotniczej zdano sobie sprawę z potrzeby stworzenia organizacji koordynującej ruch lotniczy. I tak w dniu 4 kwietnia 1947 oficjalnie powstała „Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym” ICAO, a Montreal został wybrany, jako miejsce siedziby tej organizacji. Podstawowe założenia i cele ICAO to rozwijanie zasad i techniki międzynarodowej żeglugi powietrznej:

- zapewnienie bezpiecznego i uporządkowanego rozwoju międzynarodowego Lotnictwa cywilnego na całym świecie;
- zachęcanie do projektowania i eksploatacji statków powietrznych dla celów pokojowych;
- wspieranie rozwoju dróg powietrznych, portów lotniczych i urządzeń żeglugi powietrznej dla międzynarodowego Lotnictwa cywilnego;
- zapewnianie pomocy członkom organizacji nad bezpiecznym, regularnym, sprawnym i ekonomicznym transportem lotniczym;
- zapobieganie powstawaniu zanieczyszczeń gospodarczych spowodowanych niewłaściwą eksploatacją;
- nadzór nad tym, że prawa umawiających się państw są w pełni przestrzegane i że każde z państw ma szansę na prowadzenie międzynarodowych linii lotniczych;
- unikanie dyskryminacji umawiających się państw;
- promowanie bezpieczeństwa lotów w żegludze powietrznej;
- promowanie ogólnego rozwoju wszystkich aspektów międzynarodowej aeronautyki cywilnej.

Wydaje się, iż bez przepisów ICAO dzisiaj nie byłoby możliwe utrzymanie wysokich standardów dotyczących projektowania samolotów, produkcji, certyfikacji, utrzymania sprawności technicznej i eksploatacji. Wytyczne i zalecenia ICAO dążą do zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Bezpieczeństwo lotów wymaga ścisłej współpracy między administracją, producentami i operatorami ruchu Lotniczego zarówno na poziomie krajowym jak i międzynarodowym.

W dalszej części pracy autor zawiąże zagadnienie bezpieczeństwa lotów do jednego z działów współczesnej wiedzy opartej na analizie subiektywnej, oraz jaki to ma wpływ na metody badawcze i nowe teorie zmierzające do zwiększenia bezpieczeństwa lotów. Przedstawione zostanie jedno z narzędzi do badania w teorii podejmowania decyzji, a mianowicie zasada *maksimum entropii*, która jest bezpośrednio związana z bezpiecznym lotem. Praca nad teorią entropii preferencji, jako efektywnego narzędzia do badań nad teorią bezpieczeństwa lotów wpisana jest w działalność Instytutu Lotnictwa w Warszawie [6].

### 3.Zasada maksimum entropii a podejmowanie decyzji

Podobnie jak w teorii informacji, gdzie zostało wprowadzone probabilistyczne pojęcie entropii przez matematyka-informatyka Claude E. Shannona, istnieje również analogiczna możliwość wprowadzenia funkcji entropii w rozważaniach dotyczących teorii wyboru, co bezpośrednio związane jest z podejmowaniem decyzji w sytuacjach krytycznych [8].

Nazwijmy tę funkcję dotyczącą wyboru i wpływającą na podjęcie decyzji *entropią subiektywną*. Funkcja ta jest ściśle związana z pojęciem wartości informacji. W pracach dotyczących teorii informacji, entropia jest wyrażona w odniesieniu do rozkładu prawdopodobieństwa i definiowana jest w następującej formie:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n p(i) \log_r \frac{1}{p(i)} = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_r p(i) \quad (1)$$

W teorii informacji wg. C.E. Shannona entropia jest ustalana, jako średnia informacja dla jednej wiadomości, wyrażona poprzez szczególności prawdopodobieństw  $p(i)$ .

Z kolei w pracach teoretycznych dotyczących analizy subiektywnej entropia definiowana jest, jako funkcja preferencji  $\pi(\sigma_k)$  i opisywana zależnością:

$$H(\sigma_k) = -\sum_{j=1}^M \pi_j(\sigma_k) \ln \pi_j(\sigma_k) \quad (2)$$

Entropia, w tej postaci ma następujące właściwości:

- gdy wszystkie wartości funkcji  $\pi(\sigma_k)$  są identyczne, alternatywy są równie korzystne, a wartość entropii  $H_{\max} = \ln M$ , jest maksymalną wartością.

- gdy preferencje wszystkich alternatywnych  $\pi(\sigma_k)$  są równe zero, z wyjątkiem preferencji jednej alternatywy, entropia ma wartość minimalną i równą zero.

Warunki te oznaczają, że subiektywna entropia ma wartość maksymalną, gdy zbiór stanowi jeden rodzaj preferencji równoważnych i w przypadku pojedynczego rozkładu preferencji istnieje całkowita pewność w alternatywnym wyborze. [2,3].

Przy pomocy zależności (2) możliwe jest zdefiniowanie kolejnych granic (obszarów) entropii subiektywnych preferencji zależnych od ich wartości w zbiorze alternatyw.

I tak, jeśli będziemy mieli:

$$H_{\pi}^* = f(\ln M) = f(\max H) \quad (3)$$

Gdzie  $H_{\pi}^*$  określa granicę stanu decyzyjnego z możliwością wyboru – sytuacja bezpieczna. W dostępnym dla subiekta zbiorze alternatyw istnieją możliwości podejmowania pozytywnych i negatywnych decyzji.

Od subiekta zależy właściwa interpretacja i wybór działań utrzymujących stan układu dynamicznego w sytuacji bezpiecznej. Jeśli spełniony jest warunek nierówności:

$$f(\ln M) < \ln M \quad (4)$$

to możliwe jest wyznaczenie kolejnej granicy:

$$H_{\pi^*} = f(\ln M) \quad (5)$$

co interpretowane jest jako granica możliwości podjęcia ostatecznych decyzji a właściwie ich braku. Przekroczenie tej granicy prowadzi do sytuacji katastroficznej.

Spełnienie warunku:

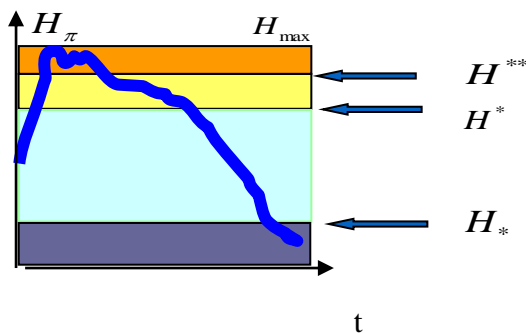
$$f(\ln M) > \ln M \quad (6)$$

Jest wyznaczeniem granicy entropii dążącej do maksymalnej wartości

$$H_{\pi}^{**} = f(\ln M) \rightarrow (\max H) \quad (7)$$

Jeśli wartość entropii układu dynamicznego jest powyżej  $H_{\pi}^{**}$  to stan jest bezpieczny. W tym obszarze wybór dowolnego działania nie spowoduje skutków niebezpiecznych [9,10].

Powyższe rozważania można przedstawić graficznie w przestrzeni czasu  $t$ .



Rys. 4. Graficzne zobrazowanie granic entropii [5,11]

### Podsumowanie

Analiza subiektywna daje zasadniczo nowe instrumenty teoretyczne w badaniu dynamicznych systemów aktywnych. Wprowadzenie funkcji entropii, jako narzędzia do badania przyczyn zaistniałych sytuacji krytycznych, pozwala oszacować i ocenić właściwość podjętej decyzji.

Subiektywne preferencje mają zasadniczy wpływ na podejmowanie ryzykownych i niepewnych decyzji w sytuacjach krytycznych. Wyznaczenie granic entropii preferencji pozwala określić obszar niebezpieczny, w którym prawdopodobieństwo wystąpienia katastrofy jest duże.

Narzędzia badawcze wykorzystujące metody analizy subiektywnej przyjmowane są w projektowaniu nowych sieci transportowych [12]. Trudności wynikające z konieczności optymalizacji wykonania zadania transportowego – deficyt czasu, mogą być pomniejszone przy zastosowaniu aparatu modelowego wyznaczenia granic entropii.

### Bibliografia:

1. *Aircraft Safety- accident investigations, analyses & applications*. Shari Stamford Krause. ISBN 0-07-140974-2 McGraw-Hill - 2003. – 483s.
2. Kasianov Vladimir– *SUBJECTIVE ENTROPY OF PREFERENCES* – ISBN 978-83-63539-08-5, Institute of Aviation Scientific Publications, Warsaw 2013. – 644s.
3. Kasyanov V., Szafran K., Goncharenko A. „Control in a Hierarchical Active System on the Basis of Entropy Paradigm of Subjective Analysis”. Transaction of the Institute of Aviation. 237 Nr 4. pp. 30–38. 2014
4. Kasyanov V., Szafran K., Goncharenko A. „Modeling of Control in a Hierarchical Active System on the Basis of Entropy Paradigm of Subjective Analysis”. Transaction of the Institute of Aviation. Nr 237 (4). pp. 39–48. 2014
5. Szafran K. „Bezpieczeństwo lotu – zasada maksymalnej entropii”. Bezpieczeństwo na lądzie, morzu i w powietrzu w XXI wieku. Czasopisma naukowe pod redakcją J. Zboiny. – Centrum Naukowo Badawcze Ochrony Przeciwożarowej. – Józefów, s. 247–251. 2014
6. Wiśniowski W., „Specjalizacje Instytutu Lotnictwa. Przegląd i wnioski”. Transaction of the Institute of Aviation. Nr 235 (2). pp. 7–16. 2014

7. Szafran K. Pagowski Z., (2017) “Efficient and Extremely Fast Transport including Search and Rescue Units Using Ground Effect”. MARINE NAVIGATION; Marine navigation & safety of sea transportation. ISBN: 978-1-138-29762-3, eISBN:978-1-315-09913-2 pp.305-310
8. Касьянов В.А., SZAFRAN K. «БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ КАК ОБЪЕКТ СУБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА» УДК 687.157.017; «Восточно-европейский журнал передовых технологий» - Харьков. Nr. 214 – s. 47 - 54. 2012
9. Kasyanov V., Szafran K., „Some hybrid models of subjective analysis In the theory of active systems”. Transaction of the Institute of Aviation. Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa. ISSN 0509-6669 240 Nr 3. s. 27–31. 2015
10. Касьянов В.А., Szafran K. „Принцип максимума субъективной энтропии в задачах безопасности активных систем”. Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы: Международная научно-техническая конференция, 23-27 сентября 2013 р.: тези доп. – Донецк,. с. 15–25. 2013
11. Kasyanov V.A., Szafran K., Goncharenko A., Shipitjak T., „Entropy Paradigm in the theory of Hierarchical Active Systems. Elements of Conflict Theory”. Transaction of the Institute of Aviation. Wydawnictwa Naukowe. № 5–6 (232–233). – s. 115–128. 2013
12. Pagowski Z.T. & Szafran K., „Ground effect” Inter-Modal Fast Sea Transport. Trans Nav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. DOI 10.12716/1001.08.02.18 vol. 8 nr 2 pp 317 – 320, 2014

### Safety in aviation - critical situations in the aspect of the theory of subjective analysis

The article discusses one of the hypotheses of the theory of making decisions in emergency situations. The methodology developed in recent years to determine the probability of a dangerous situation, using subjective analysis, and in particular the function of entropy, gives a new look to the agent, as the decision-maker responsible for security in the structure of the active system. The following publication attempts to signal issues affecting the borderline of various areas of knowledge. Analogously to information theory, where the mathematics-computer scientist Claude E. Shannon introduced the probabilistic concept of entropy, it is possible to determine entropy in the considerations of the theory of choice, which is directly related to making decisions in critical situations. In some works, which were quoted in the paper, the function was called "subjective entropy". It is closely related to the concept of information value. It was shown how the use of the maximum entropy principle of a dynamic system's state can be an effective research instrument determining the security stock.

**Keywords:** flight safety, decision making, active systems.

### Autor:

dr hab. inż. Krzysztof SZAFRAN, adiunkt Instytutu Lotnictwa, /aerodynamika i dynamika obiektów latających, bezpieczeństwo lotów, ratownictwo / specjalista budowy i pilotażu poduszkowców, ponad 50 publikacji, 4 patenty UPRP, jeden wzór użytkowy, /uczestnictwo w ponad 40 konferencjach w tym międzynarodowych, ekspert w projektach, recenzent w PIL.