



MIĘDZYNARODOWA WYŻSZA
SZKOŁA LOGISTYKI
I TRANSPORTU
WE WROCŁAWIU

Volodymyr Kharchenko
Dmytro Bugayko
Marcin Pawęska

GLOBALNE WYZWANIA W ZARZĄDZANIU TRANSPORTEM LOTNICZYM



Fundusze
Europejskie
Wiedza Edukacja Rozwój



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



SPIS TREŚCI

Volodymyr Kharchenko
Dmytro Bugayko
Marcin Pawęska

GLOBALNE WYZWANIA W ZARZĄDZANIU TRANSPORTEM LOTNICZYM

Wrocław 2022

Recenzenci:

prof. dr hab. Zbigniew Ścibiorek – Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

prof. dr Wołodymyr Wasiliew – NAU Kijów

Autorzy:

Volodymyr Kharchenko

Dmytro Bugayko

Marcin Pawęska

Koordynacja prac redakcyjnych: Bogda Kalińska-Pawęska

Opracowanie graficzne: Łukasz Lebioda

Tłumaczenie: Marcin Wąsiel

Korekta: Eliza Orman

Skład: Łukasz Lebioda

Redakcja techniczna: Łukasz Lebioda

© Copyright by Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu, 2022

DOI 10.26411/978-83-7977-695-5.11-22

ISBN 978-83-7977-695-5

Wydawca:

Oficyna Wydawnicza ATUT –
Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe
ul. Kościuszki 142, 50-439 Wrocław
www.atutoficyna.pl

SŁOWNICZEK TER**WSTĘP.....****1. SYSTEM ZARZĄDZANIA W LOTNICTWIE**

- 1.1. Bezpieczeństwo transportu lotniczego
- 1.2. Teoretyczne podstawy – sekwencyjne
- 1.3. Multiplikacja lotniczych i tolerancji ryzyka
- 1.4. Zintegrowany ruch lotniczy
 - 1.4.1. Globalne ruchem lotniczym
 - 1.4.2. Metody i
 - 1.4.3. Opis zintegrowany w służbach

2. ZARZĄDZANIE JEJ MOŻLIWOŚCI

- 2.1. Zarządzanie
 - 2.1.1. Zasady w przestrzeni
 - 2.1.2. Koncepcje ruchu lotniczego
 - 2.1.3. Metoda zintegrowany lotniczy

SPIS TREŚCI

Rozdział	Strona
Słowniczek terminów	5
Wstęp	9
1. System zarządzania bezpieczeństwem w lotnictwie	12
1.1. Bezpieczeństwo w lotnictwie w kontekście rozwoju światowego transportu lotniczego.	12
1.2. Teoretyczne podejście do pomiaru poziomu bezpieczeństwa – sekwencyjny test ilorazu prawdopodobieństwa (SPRT)	21
1.3. Multiplikacja współczynników częstotliwości wypadków lotniczych i celowości podejmowania ryzyka w macierzy tolerancji ryzyka bezpieczeństwa ICAO	28
1.4. Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem w służbach ruchu lotniczego	35
1.4.1. Globalne podejście ICAO do systemu bezpieczeństwa w zarządzaniu ruchem lotniczym	35
1.4.2. Metody i narzędzia analizy ryzyka w kontroli ruchu lotniczego	36
1.4.3. Opis zintegrowanego systemu zarządzania bezpieczeństwem w służbach ruchu lotniczego	37
2. Zarządzanie żeglugą powietrzną, jej możliwości i efektywność	41
2.1. Zarządzanie żeglugą powietrzną w Europie	41
2.1.1. Zasady wdrożenia programu jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej	41
2.1.2. Koncepcja zarządzania przepływem ruchu i przepustowością ruchu lotniczego w regionie europejskim	47
2.1.3. Metoda zintegrowanego obrazu ryzyka w zarządzaniu ruchem lotniczym w Europie	58
2.2. Satelitarne systemy zapobiegania kolizjom statków powietrznych	66
2.2.1. Badanie przesyłania komunikatów ADS-B kanałami łączności satelitarnej	66
2.2.2. Modelowanie transmisji satelitarnej komunikatów ADS-B z wykorzystaniem systemu MIMO	72
2.2.3. Kodowanie korekcyjne komunikatów ADS-B dla satelitów Iridium	78
2.2.4. Badanie wpływu schematów modulacyjnych i nieliniowości nadajników na transmisję komunikatów ADS-B przez łącze satelitarne OFDM	83
2.2.5. Komputerowe modelowanie transpondera satelitarnej o częstotliwości radiowej do przesyłania komunikatów ADS-B kanałem komunikacji satelitarnej	91
2.2.6. Analiza działania łącza “statek powietrzny – satelita – stacja naziemna” z wykorzystaniem kodowania korekcyjnego	98
2.2.7. Badanie parametrów anteny współliniowej w systemie odbiorczym za pomocą metod	107

<i>numerycznych</i>	115
2.3. Modelowanie i technologie w zarządzaniu żeglugą powietrzną	115
<i>2.3.1. Innowacyjne koncepcje synergicznego zarządzania ruchem lotniczym w warunkach zwielokrotnionego konfliktu</i>	124
<i>2.3.2. Zasady doskonalenia zarządzania przepływem ruchu lotniczego i przepustowością w rejonach kontrolowanych lotniska w warunkach niepewności</i>	131
<i>2.3.3. Analiza koncepcji obiektu lotu</i>	135
<i>2.3.4. Symulacja wielocelowego rozwiązywania sytuacji konfliktowych w lotnictwie</i>	140
<i>2.3.5. Prawdopodobieństwo kolizji statków powietrznych lecących trasami równoległymi</i>	146
<i>2.3.6 Modelowanie działania pokładowego systemu zapobiegania kolizjom</i>	152
<i>2.3.7. Ocena dopuszczalnego zakresu odchyłeń poziomych statku powietrznego podczas fazy podejścia do lądowania</i>	158
<i>2.3.8. Metodyka oceny dokładności identyfikacji typów sygnałów za pomocą narzędzi sprzętowych</i>	165
<i>2.3.9. Pomiar dokładności właściwości metrologicznych narzędzi sprzętowych wykorzystywanych w identyfikacji sygnałów na podstawie fragmentów widma</i>	172
2.4. Czynniki ludzkie w zarządzaniu żeglugą powietrzną	172
<i>2.4.1. Wpływ obciążeń wynikających z wielojęzyczności na jakość kontroli ruchu lotniczego i monitorowania</i>	181
<i>2.4.2 Metodologia analizy procesu decyzyjnego w systemie żeglugi powietrznej</i>	191
<i>2.4.3. Modelowanie zachowań operatorów systemów żeglugi powietrznej podczas sytuacji awaryjnych</i>	205
3. Efektywność i rozwój ekonomiczny transportu lotniczego	205
3.1. Wyzwania wynikające z globalizacji rynku usług lotniczych	221
3.2. Międzynarodowe regulacje w obszarze taryf lotniczych w kontekście globalizacji i liberalizacji rynku lotniczego	226
3.3. Analiza opóźnień statków powietrznych w fazie przylotu do portu lotniczego	233
3.4. Analiza opóźnień w ruchu naziemnym w portach lotniczych	238
4. Rozwój i wykorzystanie zdalnie sterowanych systemów latających	238
4.1. Podstawy bezpieczeństwa bezzałogowych systemów latających nowej generacji	242
4.2. Stan obecny i perspektywy rozwoju bezzałogowych technologii lotniczych w National Aviation University	257
4.3. Wykorzystanie technologii i możliwości zdalnie sterowanych systemów latających w realizacji różnego typu zadań	257
<i>4.3.1. Wykorzystanie technologii i możliwości zdalnie sterowanych systemów latających w</i>	

<i>rozwiązywaniu problemów logistycznych związanych z infrastrukturą terytorialną</i>	262
<i>4.3.2. Stan obecny i perspektywy rozwoju zdalnie sterowanych systemów latających (RPAS) wykorzystywanych do zadań morskich</i>	266
4.4. Modelowanie i technologie bezzałogowych systemów latających	266
<i>4.4.1. Pomiar danych lotu eksperymentalnych bezzałogowych statków powietrznych i ich późniejsza analiza</i>	272
<i>4.4.2. Analiza czynników wpływających na maksymalny zasięg lotu bezzałogowych statków powietrznych</i>	278
<i>4.4.3. Minimalizacja odchyłeń trajektorii lotu bezzałogowych statków powietrznych podczas przelotu nad przeszkodami lotniczymi</i>	282
<i>4.4.4. Wykorzystanie cyfrowych modeli terenu do zapobiegania kolizjom bezzałogowych statków powietrznych</i>	287
<i>4.4.5. Obróbka danych lotu bezzałogowych statków powietrznych metodą funkcji sklepanych</i>	291
<i>4.4.6. Budowa i testowanie zintegrowanych układów nawigacyjnych dla wielozadaniowych zdalnie sterowanych systemów latających</i>	298
<i>4.4.7. Synergia załogowych, zdalnie sterowanych i bezzałogowych statków powietrznych w jednej przestrzeni nawigacyjnej</i>	305
5. Nowe technologie w światowym nauczaniu w dziedzinie transportu lotniczego	305
5.1. Struktura światowych regulacji lotniczych	305
<i>5.1.1 Ogólnoświatowe regulacje w dziedzinie transportu lotniczego</i>	320
<i>5.1.2. Struktura regulacji lotniczych na poziomie regionalnym Unii Europejskiej</i>	323
<i>5.1.3. Regulacje lotnicze na poziomie krajowym</i>	325
5.2. Najważniejsze aspekty kształcenia w specjalistów dziedzinie transportu lotniczego w National Aviation University.	325
<i>5.2.1. Najważniejsze aspekty kształcenia inżynierów transportu lotniczego w National Aviation University (cykle kształcenia 1 i 2)</i>	327
<i>5.2.2. Najważniejsze aspekty kształcenia inżynierów transportu lotniczego w National Aviation University (3 stopień kształcenia)</i>	334
5.3. Nowe technologie w kształceniu w dziedzinie transportu lotniczego w NAU	338
Zakończenie	339
Bibliografia	

Słowniczek terminów
Najważniejsze skróty i terminy

AAA	Adaptive Antenna Array	Antena adaptacyjna
ACC	Area Control Centre	Ośrodek kontroli obszaru
ACI	Airports Council International	Międzynarodowa Rada Portów Lotniczych
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	Automatyczne zależne dozоровanie-Rozgłaszanie
AEA	Association of European Airlines	Stowarzyszenie Europejskich Linii Lotniczych
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics	Amerykański Instytut Aeronautyki i Astronautyki
ALoSP	Acceptable Level of Safety Performance	Akceptowalny poziom bezpieczeństwa
ANS	Air Navigation Service	Służby żeglugi powietrznej
AO&M	Airspace Organization and Management	Organizacja i zarządzanie przestrzenią powietrzną
ATC	Air Traffic Control	Kontrola ruchu lotniczego
ATFCM	Air Traffic Flow and Capacity Management	Zarządzanie przepływem i przepustowością ruchu lotniczego
ATM	Air Traffic Management	Zarządzanie ruchem lotniczym
ATN	Aeronautical Telecommunication Network	Lotnicza sieć telekomunikacyjna
ATS	Air Traffic Services	Służby ruchu lotniczego
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Addytywny biały szum gaussowski
BADA	EUROCONTROL Base of Aircraft Data	Baza danych statków powietrznych EUROCONTROL
BITA	Bilateral Interline Agreement	Dwustronna umowa o wzajemnym honorowaniu dokumentów przewozowych (porozumienie międzyliniowe)
BER	Bit Error Rate	Współczynnik błędu (stopa błędu)
BSP	Billing and Settlement Plan	Standard BSP (rozliczeń między przewoźnikami lotniczymi)
CA	Civil Aviation	Lotnictwo cywilne
CAA	Civil Aviation Authority	Krajowy organ nadzoru lotnictwa cywilnego (np. Urząd Lotnictwa Cywilnego w Polsce)
CACConf	IATA Cargo Agency Conference	Konferencja Agentów Cargo IATA
CASS	Cargo Accounting Settlement System	System rozliczeniowo-księgowy cargo
CFMU	Central Flow Management Unit	Centralna Jednostka Zarządzania Ruchem Lotniczym
Cir	Circular	Okólnik
CNS	Communications, Navigation and Surveillance	System łączności, nawigacji i dozоровania
CSBSA	Code-share Blocked Space	Umowa o wspólnej obsłudze połączeń lotniczych

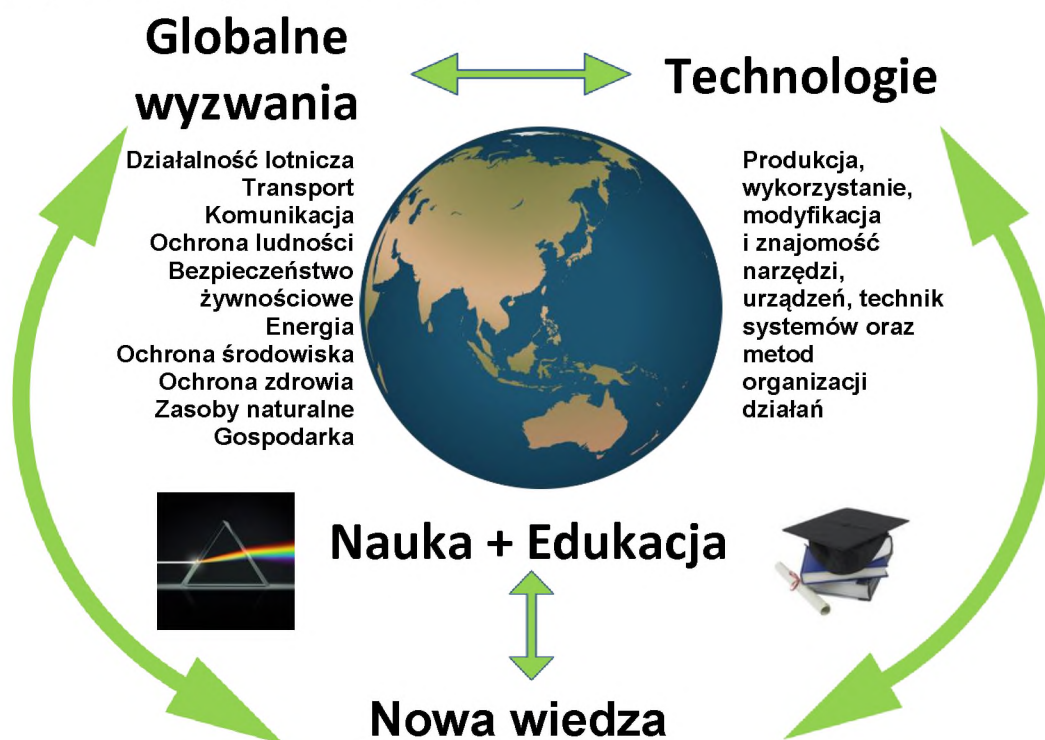
	Agreement	
CSC	IATA Cargo Services Conference	Konferencja służb cargo IATA
CSFSA	Code-share Free Sale Agreement	Umowa o nieograniczonej sprzedaży biletów na wspólne połączenia lotnicze
CTC	IATA Cargo Tariff Coordinating Conference	Konferencja nt. koordynacji taryf cargo IATA
DMEAN	Dynamic Management of European Airspace Network Framework Program	Program ramowy dynamicznego zarządzania europejską siecią przestrzeni powietrznej
DNM	Directorate Network Management	Dyrekcja ds. zarządzania siecią
Doc	Document	Dokument
EASA	European Aviation Safety Agency	Agencja UE ds. Bezpieczeństwa Lotniczego
EBAA	European Business Aviation Association	Europejskie Stowarzyszenie Lotnictwa Biznesowego
ECA	European Cockpit Association	Europejskie Stowarzyszenie Pilotów Linii Lotniczych
ECAC	European Civil Aviation Conference	Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego
EATM	European Air Traffic Management	Europejska Organizacja ds. Zarządzania Ruchem Lotniczym
EDA	European Defense Agency	Europejska Agencja Obrony
EDIFACT	Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport	Elektroniczna wymiana danych w administracji, handlu i transporcie
EHEA	European Higher Education Area	Europejski Obszar Szkolnictwa Wyższego
EMC	Electromagnetic Compatibility	Kompatybilność elektromagnetyczna
ERA	European Research Area	Europejska Przestrzeń Badawcza
ESA	European Space Agency	Europejska Agencja Kosmiczna
EUA	European University Association	Stowarzyszenie Uniwersytetów Europejskich
EUROCONTROL	European Organization for the Safety of Air Navigation	Europejska Organizacja ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment	Europejska Organizacja ds. Wyposażenia Lotnictwa Cywilnego
FAA	Federal Aviation Administration	Federalna Administracja Lotnictwa
FIATA	International Federation of Freight Forwarders Associations	Międzynarodowa Federacja Zrzeszeń Spedytorów
FIFO	First-In-First-Out	„Pierwsze weszło, pierwsze wyszło” – metoda zarządzania zapasami
FO	Flight Object	Moduł lotu
FOIPS	Flight Object Interoperability Proposed Standard	Proponowany standard interoperacyjności modułów lotu
FOS	Flight Object Servers	Serwery modułów lotu
FS	Flight Safety	Bezpieczeństwo lotu

GEA	Global Express Association	Światowe Stowarzyszenie Firm Kurierskich
GPS	Global Positioning System	Amerykański system nawigacji satelitarnej
GSNS	Global Satellite Navigation Systems	Globalne systemy nawigacji satelitarnej
GTO	Global Transport Organization	Światowa Organizacja Transportowa
HF	Human Factor	Czynnik ludzki
IAOPA	International Council of Aircraft Owner and Pilot Associations	Stowarzyszenie Pilotów i Właścicieli Samolotów
IATA	International Air Transport Association	Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Lotniczych
ICAO	International Civil Aviation Organization	Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego
IBAC	International Business Aviation Council	Międzynarodowa Rada Lotnictwa Biznesowego
IEEE	Technical Committee on Aerial Robots	Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników
IFALPA	International Federation of Air Line Pilots' Associations	Międzynarodowa Federacja Stowarzyszeń Pilotów Linii Lotniczych
ILS	Instrument Landing System	System lądowania według wskazań przyrządów
IRP	Integrated Risk Picture	Zintegrowany obraz ryzyka
LCC	Low-Cost Carrier	Przewoźnik niskokosztowy
LEO	Low Earth Orbit	Niska orbita okołoziemska
MASPS	Minimum Aviation Performance Standards	Minimalne standardy operacji lotniczych
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Transmisja wieloantenowa (nadawanie i odbiór)
MITA	Multilateral Interline Agreement	Wielostronna umowa międzyliniowa
NASA	National Agency of Space and Aeronautics	Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej
NATO	North Atlantic Treaty Organization	Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego
NAU	National Aviation University	Narodowy Uniwersytet Lotniczy
NEVAC	Network Estimation & Visualization of ACC Capacity	Ocena sieci i wizualizacja zdolności przewozowych statków powietrznych
NMEA	National Marine Electronics Association	Stowarzyszenie Przemysłu Elektroniki Morskiej
OPS	Operations	Operacje
ORP	Organization Risk Profile	Profil ryzyka organizacyjnego
OSC	Organization Safety Culture	Kultura bezpieczeństwa organizacyjnego
OSTBCs	Orthogonal Space-Time Block Codes	Ortogonalne kody bloków czasoprzestrzeni
PACConf	IATA Passenger Agency Conference	Konferencja Agentów Pasażerskich IATA
PANS	Procedures for Air Navigation Services	Procedury służb żeglugi powietrznej
PSC	IATA Passenger Services	Konferencja służb pasażerskich IATA

	Conference	
PTC	IATA Passenger Tariff Coordinating Conference	Konferencja nt. koordynacji taryf pasażerskich IATA
RASGs	Regional Aviation Safety Groups	Regionalne Grupy ds. Bezpieczeństwa Lotniczego
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems	Zdalnie sterowane systemy lotnicze
RSOO	Regional Safety Oversight Organizations	Regionalne Organizacje Nadzoru nad Bezpieczeństwem
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	Radiotechniczna Komisja Aeronautyki
S&A	Sense and Avoid	System zapobiegania kolizji
SAE	Society of Automotive Engineers	Stowarzyszenie inżynierów branży motoryzacyjnej
SARPs	Standards and Recommended Practices	Normy i zalecane metody postępowania
SESAR	Single European Sky	Program jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej
SFAR	Special Federal Aviation Regulation	Specjalne federalne przepisy lotnicze
SINR	Signal to Interference-Plus-Noise Ratio	Współczynnik jakości sygnału użytkowego w stosunku do zakłóceń szumu
SISO	Single-Input-Single-Output	System pojedynczego nadawania i odbioru
SMS	Safety Management System	System zarządzania bezpieczeństwem
SPA	Special Prorate Agreement	Umowa o proporcjonalnym podziale zysków
SSP	State Safety Program	Krajowy program bezpieczeństwa
TC	IATA Tariff Coordinating Conference	Konferencja nt. koordynacji taryf IATA
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System	System kontroli ruchu i unikania kolizji
TIACA	The International Air Cargo Association	Międzynarodowe Zrzeszenie Lotniczego Transportu Towarowego
TMA	Terminal Control Areas	Rejon kontrolowany lotniska
UAS	Unmanned Aircraft Systems	Bezzałogowe systemy powietrzne
UAV	Unmanned Aerial Vehicles	Bezzałogowe statki powietrzne
UPU	Universal Postal Union	Światowy Związek Pocztowy
WCO	World Customs Organization	Światowa Organizacja Celna

Wstęp

Rozwój ludzkości oznacza ciągle pokonywanie problemów i wyzwań. Te, z którymi mierzymy się dziś, dotyczą zróżnicowanych dziedzin i aspektów życia. Największe współczesne światowe wyzwania wiążą się ściśle z rozwojem technologii, a ich przewyżczenie wymaga określonych zmian w nauce i kształceniu, czyli doskonalenia metod zdobywania nowej wiedzy. Naszym zdaniem bardzo wiele zależy od rozwoju takich systemów socjotechnicznych, jak transport i przemysł lotniczy, energetyka jądrowa czy przemysł chemiczny. Chcąc sprostać wyzwaniom w przyszłości, będziemy musieli stale rozwijać dziedziny nauki koncentrujące się na perspektywach światowej gospodarki i technologii. Równocześnie konieczne będzie właściwe kształcenie kolejnych pokoleń naukowców, ekspertów, specjalistów i menedżerów, zapewniające odpowiedni poziom wiedzy i konkurencyjności (ilustracja 1).



Ilustracja 1. Wstęp. Światowe podejście do nowoczesnej nauki i edukacji [1]

Transport lotniczy jest jednym z kluczowych elementów współczesnej gospodarki. Bez względu na to, czy mówimy o pasażerach, czy towarach, możliwość szybkiego i bezpiecznego transportu cennych zasobów na duże odległości poprawia jakość i standard życia ludzi na całym świecie.

Najważniejsze cechy transportu lotniczego to bardzo duża szybkość, wysoki poziom niezawodności, wysoki koszt oraz średnia elastyczność. Innym ważnym aspektem podróży lotniczych jest stosunkowo wysoki poziom bezpieczeństwa.

Wynika to nie tylko z faktu, że same samoloty jako maszyny stają coraz bezpieczniejsze, ale także z danych pokazujących, iż transport lotniczy to najbezpieczniejsza forma podróżowania. Wszystkie inne codzienne rodzaje transportu, od poruszania się na piechotę po jazdę samochodem, są ciągle znacznie bardziej ryzykowne. Według statystyk w przypadku komercyjnych linii lotniczych wypadki śmiertelne zdarzają się 1 raz na 45 mln lotów. „New York Times” pisze, że podróżując samolotem codziennie przez 123 000 lat, nadal byłibyśmy bezpieczni. Możemy

zmierzyć bezpieczeństwo pasażerów lotniczych, wykorzystując również inne metody, np. porównując wskaźnik śmiertelności na jedną podróż. Według tej metody najniebezpieczniejszym środkiem transportu jest samochód. W przypadku podróży samochodem prawdopodobieństwo śmiertelnego wypadku jest niemal dwukrotnie większe niż w przypadku jazdy motocyklem i wynosi aż 1 do 415. Drugim najniebezpieczniejszym środkiem transportu jest właśnie motocykl. Prawdopodobieństwo śmiertelnego wypadku podczas podróży motocyklem wynosi 1 do 907. Znacznie bezpieczniejsza od obu tych form transportu jest jazda na rowerze, gdzie według raportu US National Safety Council, ryzyko śmiertelnego wypadku wynosi 1 do 4982. Jednak zdecydowanie najbezpieczniejszym środkiem transportu jest samolot. Prawdopodobieństwo śmierci w wypadku lotniczym wynosi obecnie 1 do 7229 i to z uwzględnieniem znacznie mniej bezpiecznych lotów niekomercyjnych. Jest ono zatem ponad 18 razy mniejsze niż w przypadku osób podróżujących samochodem, ponad 8 razy mniejsze niż w przypadku motocyklistów i ponad 1,5 razy mniejsze niż w przypadku rowerzystów [2].

Innym sposobem oceny bezpieczeństwa podróży różnymi środkami transportu może być porównanie liczby ofiar śmiertelnych na pasażeromile. I tak np. w przypadku transportu kolejowego wskaźnik śmiertelności wynosi 0,06 na 100 mln pasażeromil, zaś w przypadku transportu autobusowego – 0,05 na 100 mln pasażeromil. Za to w transporcie lotniczym wskaźnik ten wynosi 0,003 ofiar śmiertelnych na 100 mln pasażeromil, czyli jest ponad 16-krotnie niższy niż w przewozach autobusowych i ponad 20-krotnie niższy niż w transporcie kolejowym [2].

Tradycyjnie potrzebę zarządzania bezpieczeństwem uzasadniono na podstawie spodziewanego rozwoju branży i wynikającego z niego przewidywanego wzrostu liczby wypadków. O ile dążenie do ograniczenia tej liczby będzie zawsze najważniejszym priorytetem w lotnictwie, to nie możemy zapominać o innych istotnych kwestiach, takich jak wpływ środowiska na zarządzanie bezpieczeństwem w międzynarodowym lotnictwie cywilnym.

Lotnictwo to bezsprzecznie najbezpieczniejszy z masowych środków transportu, a także jeden z najbezpieczniejszych socjotechnicznych systemów produkcyjnych w historii ludzkości. Takie osiągnięcie zasługuje na szczególną uwagę, zwłaszcza biorąc pod uwagę fakt, iż lotnictwo, rozwijające się zaledwie od kilku dekad, jest stosunkowo młodą branżą w porównaniu z innymi sektorami gospodarki, często o kilkusetletniej historii. Branża lotnicza zasługuje na najwyższe uznanie za swoje nieustanne wysiłki, które w ciągu zaledwie wieku od powstania pierwszych, delikatnych i nietrwałych maszyn latających doprowadziły do zbudowania ultrabezpiecznego systemu, jedyne w dotychczasowej historii transportu. Oczywiście, osiągnięcie tego poziomu nie nastąpiło od razu, lecz było wynikiem wielu lat niestrudzonych działań naukowców, inżynierów i projektantów w sektorze lotniczym.

W rezultacie 38 sesja Zgromadzenia Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aviation Organization, ICAO) zakończyła się przyjęciem strategii organizacji na kolejne 3-letnie (2014–2016), obejmującej pięć najważniejszych obszarów: bezpieczeństwo, możliwości i efektywność żeglugi powietrznej, ochrona i ułatwienie procedur, rozwój ekonomiczny transportu lotniczego oraz ochrona środowiska naturalnego. Omówienie tych obszarów w skali globalnej znalazło się w rozdziałach 1, 2 i 3 niniejszej monografii [3].

Analiza dostępnych źródeł wskazuje, że XXI w. będzie erą lotnictwa bezzałogowego. Według prognoz niemal 90% maszyn wojskowych będą stanowić maszyny bezzałogowe, a jedynie 10% – samoloty pilotowane przez ludzi. Podobny trend obserwujemy również w lotnictwie cywilnym [4]. Pokazuje to, że w przyszłości znaczenie bezzałogowych statków powietrznych w lotnictwie cywilnym będzie stale rosło. Dlatego właśnie 4 rozdział naszej książki poświęcamy przede wszystkim zdalnie sterowanym systemom latającym.

Jak wspomnieliśmy, chcąc sprostać globalnym wyzwaniom, w przyszłości będziemy potrzebowali nowego pokolenia specjalistów, profesjonalnych i kompetentnych. W związku z tym

w rozdziale 5 skupiamy się na wyzwaniach stojących dziś przed kształceniem w obszarze transportu lotniczego.

Najważniejszym celem naszej monografii, zatytułowanej *Globalne wyzwania w zarządzaniu transportem lotniczym*, jest przekazanie wiedzy i doświadczeń w zakresie technologii i operacji, bezpieczeństwa, wydajności i efektywności oraz planowania operacyjnego w obszarze transportu lotniczego, a także analiza dróg rozwoju tej branży, z uwzględnieniem szkolenia operatorów, ram regulacyjnych i eksploatacji UAV.

Głównymi tematami naszej pracy są: rozwój metodologii systemów zarządzania bezpieczeństwem; badanie elementów zarządzania żeglugą powietrzną oraz możliwości tworzenia innowacyjnych technologii wspierających rozwój ekonomiczny branży lotniczej; poszukiwanie sposobów budowy zdalnie sterowanych systemów latających, a także wykorzystanie nowoczesnych technologii w nauce i kształceniu w obszarze transportu lotniczego.

Monografia prezentuje nowe metody zarządzania różnymi aspektami działań w sektorze transportu lotniczego, oryginalne modele matematyczne oraz praktyczne zalecenia dla branży lotniczej.

Nasza praca może zainteresować społeczność naukową w obszarze lotnictwa, ekspertów organizacji lotniczych i innych interesariuszy. Może być również wykorzystywana jako podręcznik dla studentów kierunków związanych z zarządzaniem lotnictwem.

1. System zarządzania bezpieczeństwem w lotnictwie

Bezpieczeństwo lotnictwa to centralny element podstawowych celów Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO). ICAO, we współpracy z całym środowiskiem transportu lotniczego, podejmuje nieustanne wysiłki w celu stałego podnoszenia poziomu bezpieczeństwa, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej wydajności operacji lotniczych. Lotnicza społeczność naukowa uczestniczy w tworzeniu światowego systemu bezpieczeństwa w lotnictwie i uznaje go za jeden z najbardziej obiecujących obszarów badań naukowych. W niniejszym rozdziale przedstawimy materiały analityczne, podejścia teoretyczne oraz oryginalne modele matematyczne dotyczące rozmaitych aspektów bezpieczeństwa. Omówimy w nim następujące tematy:

- *Bezpieczeństwo w lotnictwie w kontekście rozwoju światowego transportu lotniczego;*
- *Teoretyczne podejście do pomiaru poziomu bezpieczeństwa – sekwencyjny test ilorazu prawdopodobieństwa (SPRT);*
- *Multiplikacja współczynników częstotliwości wypadków lotniczych i celowości podejmowania ryzyka w macierzy tolerancji ryzyka bezpieczeństwa ICAO;*
- *Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem służb ruchu lotniczego.*

1.1. Bezpieczeństwo w lotnictwie w kontekście rozwoju światowego transportu lotniczego

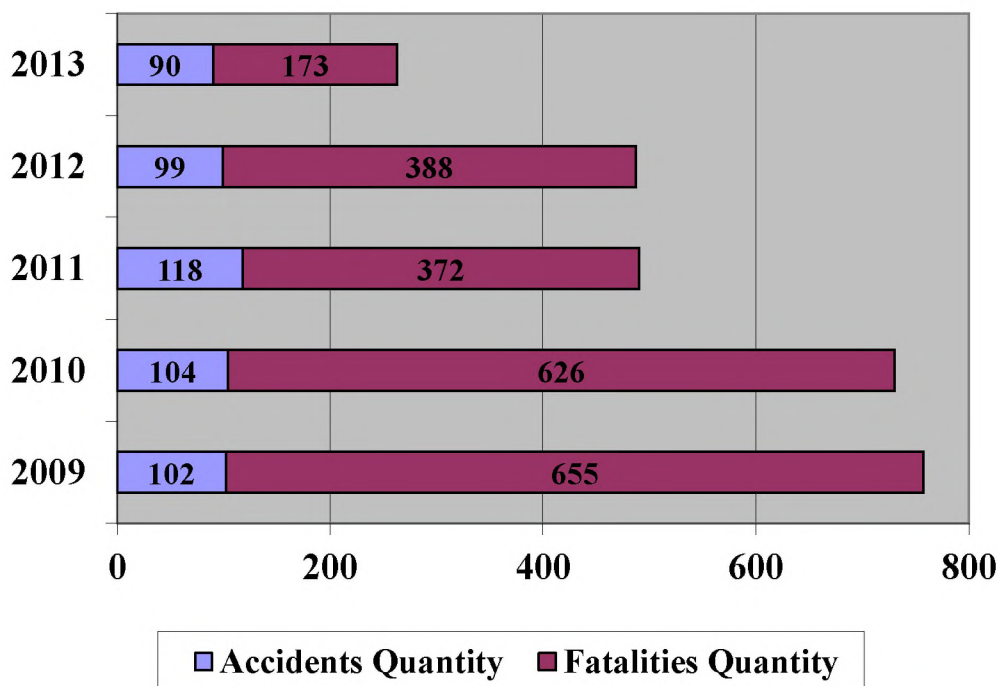
Globalizacja międzynarodowego transportu lotniczego obejmuje wiele aspektów i odgrywa istotną rolę w procesie rozwoju międzynarodowego lotnictwa cywilnego. Jednym z najważniejszych pozytywnych aspektów globalizacji jest doskonalenie światowego systemu bezpieczeństwa w lotnictwie, który łączy czołowe ogólnoswiatowe i regionalne organizacje międzyrządowe i pozarządowe, rządy i branżę lotniczą w dążeniu do wspólnego celu poprawy bezpieczeństwa, ochrony, efektywności oraz rentowności działań lotniczych (więcej w rozdziale 5.1).

Według Dokumentu ICAO nr 9859 [5] bezpieczeństwo to stan, w którym prawdopodobieństwo szkód osobowych oraz rzeczowych jest ograniczone i utrzymane na dopuszczalnym poziomie lub poniżej tego poziomu, osiągniany poprzez ciągły proces identyfikacji zagrożeń i zarządzania ryzykiem bezpieczeństwa. W dalszej części książki używamy terminu „bezpieczeństwo” właśnie w takim znaczeniu. Teraz przejdźmy do tematu zarządzania bezpieczeństwem. Obecnie wszystkie organizacje lotnicze mają jakiś związek z działalnością biznesową. Wszystkie muszą z jednej strony świadczyć usługi, do jakich zostały powołane, osiągać wyznaczone cele i, ostatecznie, zapewniać zyski swoim udziałowcom. Z drugiej strony w swoich działaniach muszą zawsze utrzymywać akceptowalny poziom bezpieczeństwa (ALoS).

Zasoby dostępne dla organizacji lotniczych są ograniczone, jednak są one niezbędne do wykonywania podstawowych funkcji biznesowych wspierających bezpośrednio i pośrednio świadczenie usług przez organizację. Powszechnie uważa się, że zasoby te muszą być rozdzielane na zasadzie albo/albo, czyli służyć realizacji sprzecznych celów: związanych z produkcją (świadczeniem usług) lub ochroną (bezpieczeństwem). Naczelną zasadą zarządzania bezpieczeństwem jest stworzenie tzw. przestrzeni bezpieczeństwa, w której zasoby służące realizacji celów związanych z produkcją i ochroną dzielone i wykorzystywane są w sposób zrównoważony.

Wszystkie produkty w lotnictwie cywilnym muszą być przede wszystkim bezpieczne. Musimy jednak przyznać, że osiągnięcie całkowitego bezpieczeństwa w lotnictwie nie jest

możliwe. Popatrzmy na statystyki bezpieczeństwa ICAO. Ilustracja 1.1 przedstawia dane z rejestru wypadków ICAO za okres 2009–2013 (dla rozkładowych lotów komercyjnych) [6].



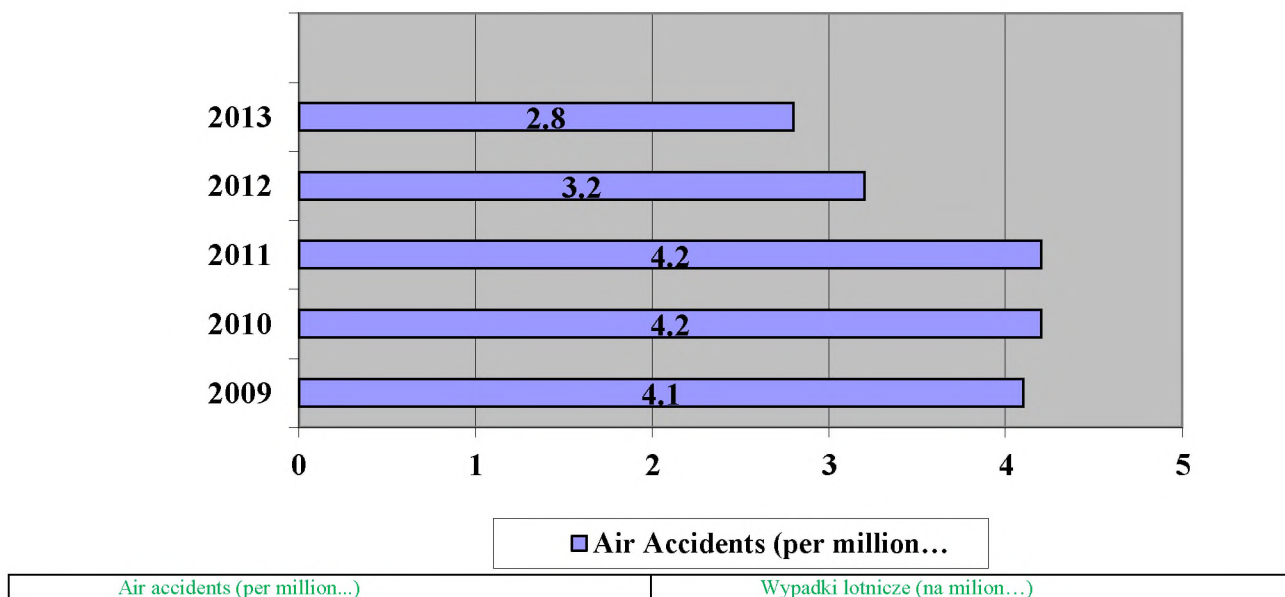
Accidents quantity	Liczba wypadków
Fatalities quantity	Liczba ofiar śmiertelnych

Ilustracja 1.1. Rejestr wypadków ICAO za okres 2009–2013 (rozkładowe loty komercyjne) [6]

W 2013 r. regularnymi rozkładowymi lotami komercyjnymi, międzynarodowymi i krajowymi, podróżowało w sumie ok. 3,1 mld pasażerów, co oznacza wzrost w porównaniu z 2,9 mld w 2012 r. Łącznie w ramach regularnego rozkładowego ruchu pasażerskiego linie lotnicze wykonały ok. 32,1 mln połączeń. Statystyka wypadków prowadzona rok do roku pokazuje wyraźny spadek zarówno ogólnej liczby samych wypadków, jak i wskaźnika wypadków, co oznacza pozytywny trend w rozwoju bezpieczeństwa lotniczego. W porównaniu z 2012 r. liczba wypadków (zgodnie z definicją Aneksu 13 ICAO uwzględniająca wszystkie statki powietrzne o maksymalnej dopuszczalnej masie startowej przekraczającej 5700 kg i potwierdzona przez Grupę Roboczą ds. Wskaźników Bezpieczeństwa ICAO) zmniejszyła się w 2013 r. o 10%.

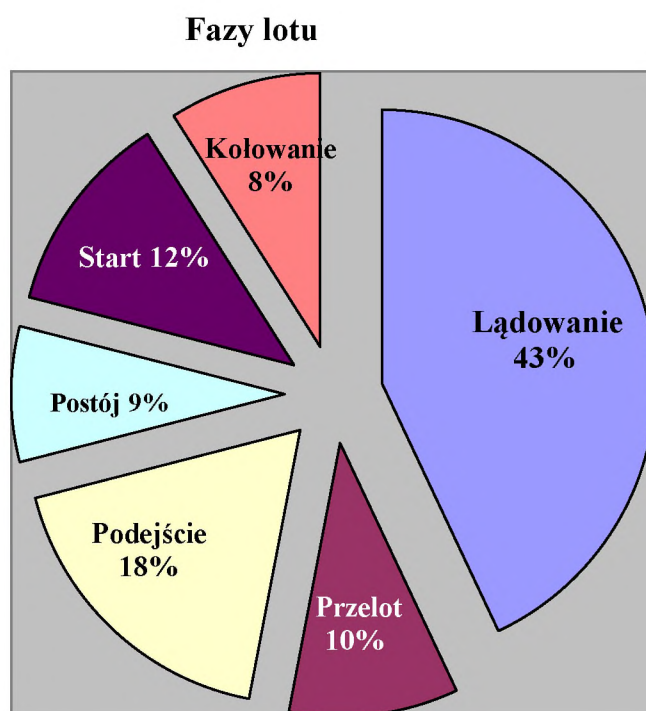
Zanotowane w 2013 r. 173 ofiary śmiertelne to najniższa liczba ofiar wypadków lotniczych od 2000 r. W porównaniu z latami wcześniejszymi liczba ofiar śmiertelnych w 2013 r. oznacza spadek o 53% wobec danych z 2012 r. i jest o 65% niższa od średniej liczby ofiar śmiertelnych wypadków lotniczych z poprzednich 5 lat [6].

Światowe statystyki wypadków lotniczych



Ilustracja 1.2. Światowe statystyki wypadków lotniczych (na milion odlotów) [6]

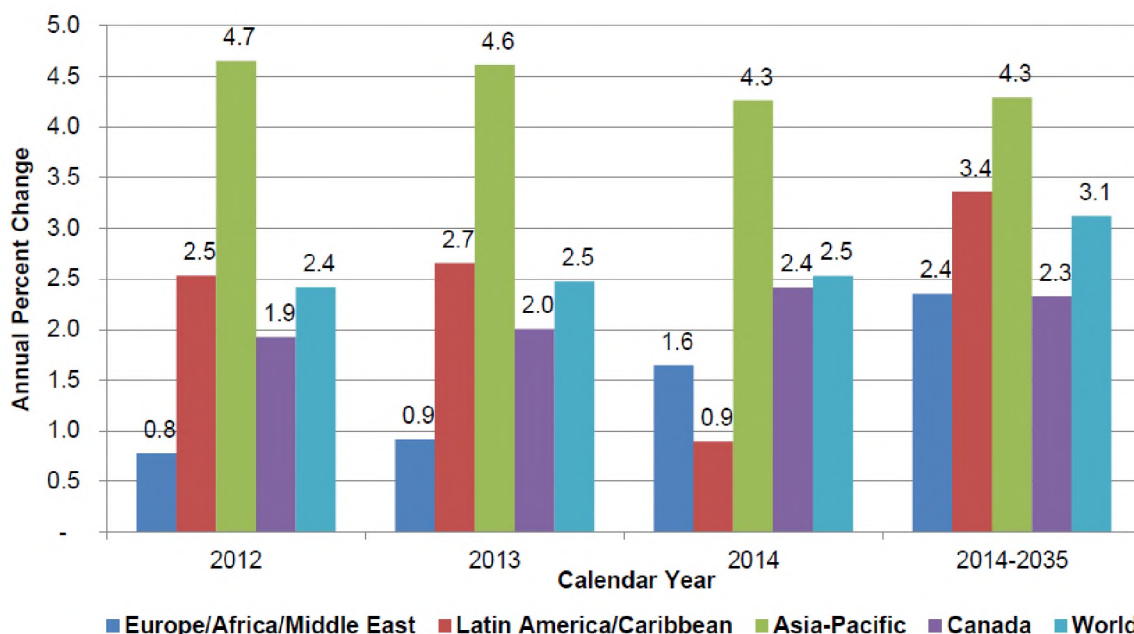
Co więcej, światowy wskaźnik wypadków lotniczych dotyczący regularnych operacji komercyjnych zmniejszył się o 13%, z 3,2 wypadku na milion odlotów w 2012 r. do 2,8 wypadku na milion odlotów w 2013 r. Spadek ten pokazuje ilustracja 1.2 [6].



Ilustracja 1.3. Wypadki w poszczególnych fazach lotu [6]

Ilustracja 1.3 pokazuje nam procentowy rozkład wypadków w poszczególnych fazach lotu. Fazy lotu zostały określone na podstawie podziału wykorzystywanego w ujednoczonej analizie bezpieczeństwa ICAO/ IATA. Podczas oceny 103 wypadków z 2013 r. uzyskano następujący rozkład procentowy: lądowanie – 43%, podejście – 18%, start – 12%, przelot – 10%, postój – 9%, kołowanie – 8%. Jak pokazują te dane, najniebezpieczniejszą fazą lotu jest bez wątpienia lądowanie [6].

Jednocześnie, niestety, stały wyraźny spadek całkowitej liczby wypadków nie zwalnia nas z konieczności ciągłego podnoszenia poziomu bezpieczeństwa. Prognozy czołowych organizacji w obszarze lotnictwa cywilnego oraz najważniejszych producentów w branży lotniczej przewidują znaczący wzrost liczby komercyjnych lotów w przyszłości. Ma to związek z dynamicznym rozwojem gospodarczym w skali globalnej [7]. Ilustracja 1.4 przedstawia zmiany rzeczywistego poziomu produktu krajowego brutto w poszczególnych regionach świata.



Source: IHS Global Insight

Annual Percent Change	Roczna zmiana procentowa
Calendar year	Rok kalendarzowy
Europe/Africa/Middle East	Europa/Afryka/Bliiski Wschód
Latin America/ Caribbean	Ameryka Łacińska/Karaiby
Asia-Pacific	Azja-Pacyfik
Canada	Kanada
World	Świat
Source	Źródło

Ilustracja 1.4. Rzeczywisty produkt krajowy brutto w poszczególnych regionach świata (FAA) [8]

Outlook ICAO dla transportu lotniczego na 2025 r. prognozuje, że światowy wzrost gospodarczy (PKB) w ujęciu realnym będzie się utrzymywał na poziomie ok. 3,5% rocznie. Z kolei przeciętne realne zyski linii lotniczych w tym okresie pozostaną bez zmian. Wielkość światowego ruchu lotniczego mierzona w pasażerokilometrach będzie w okresie 2005–2025 najprawdopodobniej wzrastać w tempie 4,6% rocznie. Ruch międzynarodowy będzie się zwiększał średnio o 5,3% rocznie, a ruch krajowy – średnio o 3,4% rocznie (tabela 1.1) [9].

Tabela 1.1. Prognozy ICAO dotyczące ruchu lotniczego na świecie w okresie 1985–2025 [9]

(ICAO Contracting States)

Scheduled services	Actual 1985	Actual 2005	Forecast 2025	Average annual growth rate (per cent)	
				1985–2005	2005–2025
TOTAL					
Passenger-kilometres (billions)	1 366	3 720	9 180	5.1	4.6
Freight tonne-kilometres (millions)	39 813	142 579	510 000	6.6	6.6
Passengers carried (millions)	896	2 022	4 500	4.2	4.1
Freight tonnes carried (thousands)	13 742	37 660	145 000	5.2	5.5
Aircraft-kilometres (millions) ¹	n.a.	30 845	69 040	n.a.	4.1
Aircraft departures (thousands) ¹	n.a.	24 904	50 450	n.a.	3.6
INTERNATIONAL					
Passenger-kilometres (billions)	589	2 197	6 225	6.8	5.3
Freight tonne-kilometres (millions)	29 384	118 482	452 120	7.2	6.9
Passengers carried (millions)	194	704	1 950	6.7	5.2
Freight tonnes carried (thousands)	5 884	22 630	110 000	7.0	6.5

1. Data on operations of airlines registered in the former USSR not available for 1985.

Source: ICAO

ICAO (Contracting states)	ICAO (państwa członkowskie)
Scheduled services	Usługi rozkładowe
Actual	Rzeczywiste
Forecast	Prognozowane
Average annual growth rate (per cent)	Średni roczny wskaźnik wzrostu (w procentach)
TOTAL	ŁĄCZNIE
Passenger-kilometers (billions)	Pasażerokilometry (mld)
Freight tonne-kilometers (millions)	Tonokilometry ładunków (mln)
Passengers carried (millions)	Przewiezieni pasażerowie (mln)
Freight tonnes carried (thousands)	Ładunki przewiezione (tysiące ton)
Aircraft-kilometers (millions)	Samolotokilometry (mln)
Aircraft departures (thousands)	Odloty samolotów (tys.)
INTERNATIONAL	MIĘDZYNARODOWE
1. Data on operations of airlines registered...	1. Dane dotyczące operacji linii lotniczych zarejestrowanych w ZSRR nie są dostępne dla 1985 r.
n.a.	b.d.
Source	Źródło

Prognozy na okres 2006–2025, przygotowane przez Międzynarodową Radę Portów Lotniczych (ACI), wskazują średnie roczne wzrosty całkowitej liczby pasażerów i ton ładunku o odpowiednio 4% i 5,4% [9].

Niektóre prognozy opracowane przez najważniejszych producentów płatowców i silników lotniczych, dotyczące zmian światowego ruchu rozkładowego, przedstawione zostały w tabeli 1.2. Przewidują one w okresie 2005–2026 roczny wzrost liczby pasażerów pomiędzy 4,8 a 5% rocznie, zaś liczby ton ładunków – nawet na nieco wyższym poziomie.

Tabela 1.2. Prognozy głównych producentów płatowców i silników lotniczych na okres 2006–2025 [9]

	Forecast period	Average annual growth rate (per cent)	
		Passenger-kilometres	Freight tonne-kilometres
Airbus Industrie	2006–2025	4.8	6.0
Boeing	2005–2025	4.9	—
Embraer	2007-2026	5.0	—
Rolls-Royce	2006–2025	4.8	6.8

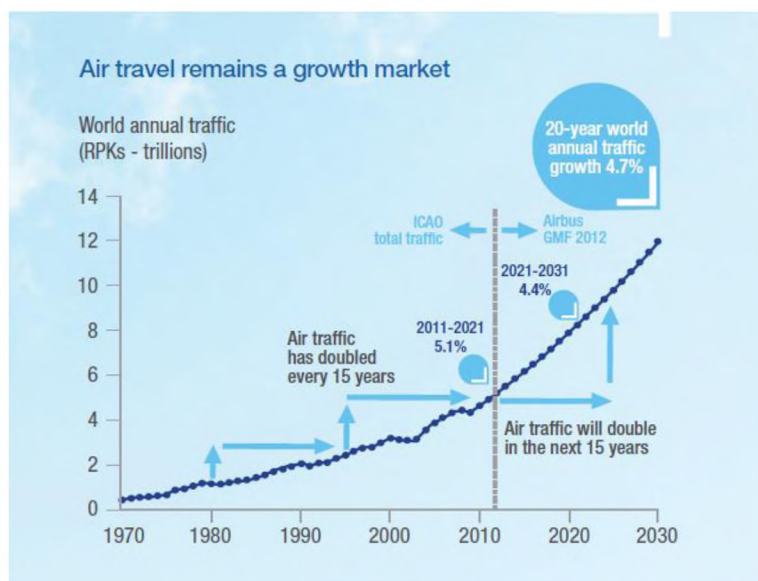
Source: Airbus Industrie, "Global Market Forecast", 2006; Boeing Commercial Airplanes, "Current Market Outlook", 2006; Rolls-Royce, "The Outlook", 2006.

Forecast period	Okres prognozy
Average annual growth rate (per cent)	Średni roczny wskaźnik wzrostu (w procentach)
Passenger-kilometres	Pasażerokilometry
Freight tonne-kilometres	Tonokilometry ładunków
Source	Źródło

Długookresowa prognoza firmy Boeing

W przeszłości komercyjne lotnictwo doświadczyło wielu kryzysów, jednakże odbudowa i ożywienie następowały zazwyczaj szybko i branża mogła powrócić do swoich długookresowych wzrostów na poziomie ok. 5% rocznie. Pomimo niepewności ruch pasażerski w 2012 r. zwiększył się o 5,3% w porównaniu z poziomem z 2011 r. Eksperti firmy Boeing przewidują, że trend wzrostowy utrzyma się przez kolejne 20 lat, pozostając na poziomie ok. 5% rocznie. Ruch towarowy nieco spowolnił po rekordowym 2010 r. W porównaniu z nim w 2012 r. ilość przewiezionych towarów zmniejszyła się o 1,5%. Jednakże rozwój gospodarek wschodzących będzie w przyszłości stwarzał potrzebę wykorzystania szybkich i efektywnych rozwiązań transportowych. Eksperti szacują, że ruch towarowy będzie się zwiększał o ok. 5% rocznie przynajmniej do 2032 r. [9].

Również eksperci firmy Airbus przewidują podobny rozwój wypadków. Ich zdaniem w perspektywie 20-letniej światowy ruch lotniczy będzie się zwiększał w tempie 4,7% rocznie (ilustracja 1.5) [10].



Air travel remains a growth market	Transport lotniczy pozostaje rynkiem wzrostowym
World annual traffic (RPKs- trillions)	Roczny ruch na świecie (biliony pasażerokilometrów)
20-year world annual traffic growth 4.7%	20-letni wzrost ruchu na świecie na poziomie 4.7% rocznie
ICAO total traffic	Łączny ruch wg ICAO
Airbus GMF	Prognoza rynkowa Airbus
Air traffic has doubled...	Ruch lotniczy podwajał się co 15 lat
Air traffic will double...	Ruch lotniczy podwoi się w ciągu kolejnych 15 lat

Ilustracja 1.5. Prognozy na okres 2006-2025, przygotowane przez ekspertów firmy Airbus [10]

Wszystkie te trendy sprawiają, że niezbędne jest ciągłe podnoszenie poziomu bezpieczeństwa, ochrony i efektywności systemu lotnictwa, ponieważ stanowią one fundamenty jego przyszłego rozwoju.

To prawda, że wypadki lotnicze są zawsze wstrząsem dla opinii publicznej, jednak zdarzają się one niezwykle rzadko. Niestety, zagrożenia dla bezpieczeństwa zazwyczaj pozostają niewidoczne. Według statystyk na 1 wypadek przypada 30 poważnych incydentów, 100 drobniejszych incydentów i nawet 1000 sytuacji ukrytych zagrożeń, które mogą doprowadzić do incydentu lub wypadku [5]. Celem systemu zarządzania bezpieczeństwem jest zatem nie tylko badanie wypadków oraz incydentów lotniczych, ale również stałe monitorowanie warunków działań w celu wykrycia ukrytych zagrożeń i zapobiegania potencjalnym problemom.

Choć z jednej strony eliminacja wypadków i poważnych incydentów lotniczych pozostaje najważniejszym celem zarządzania bezpieczeństwem, to jednak zdajemy sobie sprawę, że nie da się całkowicie wykluczyć zagrożeń i ryzyka występujących w systemie lotnictwa. Wszelka działalność ludzka i działania systemów stworzonych przez człowieka zawsze są i będą narażone na błędy oraz ich konsekwencje [5]. Dlatego właśnie bezpieczeństwo stanowi dynamiczny element lotnictwa i wszelkie związane z nim ryzyko powinno być stale monitorowane, by umożliwić jego ograniczanie. Tak długo, jak uda się utrzymać ryzyko bezpieczeństwa pod kontrolą i na odpowiednim poziomie, można także zarządzać skutecznie nawet tak otwartym i dynamicznym systemem jak lotnictwo, zachowując równowagę pomiędzy realizacją celów związanych z produkcją i ochroną.

Kultura bezpieczeństwa [5] obejmuje wspólne wartości i przekonania członków organizacji dotyczące bezpieczeństwa publicznego i może mieć decydujący wpływ na ich zachowania. Zdrowa kultura bezpieczeństwa opiera się na zaufaniu oraz szacunku pomiędzy załogą i kierownictwem przedsiębiorstwa, dlatego musi być tworzona i wzmacniana na najwyższym szczeblu zarządzania.

Zarządzanie ryzykiem bezpieczeństwa [5] obejmuje ocenę i ograniczanie ryzyka bezpieczeństwa. Celem zarządzania ryzykiem jest ocena potencjalnych skutków wykrytych zagrożeń oraz przygotowanie i wdrożenie właściwych, efektywnych metod ich ograniczania. Zarządzanie ryzykiem bezpieczeństwa jest zatem kluczowym składnikiem procesu zarządzania bezpieczeństwem, zarówno na poziomie państwa, jak i dostawcy produktów/usług.

System zarządzania bezpieczeństwem (Safety Management System, SMS) [5] służy zapewnieniu bezpiecznej eksploatacji statków powietrznych poprzez efektywne zarządzanie ryzykiem bezpieczeństwa. Umożliwia on ciągłe zwiększanie bezpieczeństwa poprzez identyfikację zagrożeń, gromadzenie i analizę danych oraz ciągłą ocenę ryzyka. Celem SMS jest proaktywne ograniczanie lub eliminacja zagrożeń, zanim doprowadzą one do wypadków lub incydentów.

W ramach SMS wyróżniamy cztery podstawowe składniki stanowiące minimalne wymagania dla wdrożenia SMS [5]:

- polityka i cele bezpieczeństwa,
- zarządzanie ryzykiem bezpieczeństwa,
- zapewnienie bezpieczeństwa,
- promocja bezpieczeństwa.

Z perspektywy ICAO celem światowego systemu lotnictwa jest stworzenie międzynarodowej normatywnej bazy danych zgodnej z normami i zalecanymi metodami postępowania (ICAO SARPs). Termin „zarządzanie bezpieczeństwem” obejmuje dwie kluczowe koncepcje. Pierwszą z nich jest koncepcja Krajowych Programów Bezpieczeństwa (State Safety Program, SSP), stanowiących zintegrowane systemy regulacji i działań skierowanych na poprawę bezpieczeństwa. Drugą koncepcją jest stworzenie systemów zarządzania bezpieczeństwem (SMS), zdefiniowanych jako kompleksowe podejście do zarządzania bezpieczeństwem, obejmujące niezbędne struktury organizacyjne, zakresy odpowiedzialności i obowiązków, politykę oraz procedury. Poszczególne kraje zobowiązane są do wdrożenia SSP, obejmującego właściwą legislację, tworzenie polityk oraz nadzór nad działaniami lotniczymi. Zgodnie z SSP przepisy dotyczące bezpieczeństwa muszą być oparte na szczegółowej analizie systemu lotniczego danego kraju. Politykę bezpieczeństwa tworzy się z wykorzystaniem informacji na temat bezpieczeństwa, w tym danych na temat wykrywanych zagrożeń i działań w zakresie zarządzania ryzykiem. Wreszcie, nadzór nad działaniami lotniczymi oznacza przede wszystkim skuteczne monitorowanie ośmiu krytycznych elementów bezpieczeństwa, w tym obszarów podwyższonego ryzyka, mogących stanowić potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa.

Celem skoordynowanych działań ICAO na rzecz bezpieczeństwa jest wdrożenie praktycznych i konkretnych rozwiązań służących poprawie bezpieczeństwa i efektywności we wszystkich sektorach systemu transportu lotniczego. Podejście to zapewnia, że niezwykle osiągnięcia branży lotniczej w zakresie bezpieczeństwa mają ogromne znaczenie dla realizacji ogólnoswiatowych priorytetów społecznych i gospodarczych.

Jednym z podstawowych celów i jednocześnie najsilniejszych atutów branży lotniczej jest budowa i utrzymanie współpracy. Aby nadażyć za ekspansją i rozwojem w sektorze, ICAO stale przygotowuje i wdraża kolejne inicjatywy w obszarze bezpieczeństwa. Przykładami takich inicjatyw, realizowanych przez organizację wspólnie z innymi podmiotami z branży lotniczej, są program bezpieczeństwa na drogach startowych lub systemy zarządzania ryzykiem wynikającym ze zmęczenia pilotów. To dwa spośród wielu projektów ICAO służących poprawie poziomu bezpieczeństwa w lotnictwie, a także rozwijaniu harmonijnej współpracy i komunikacji pomiędzy wszystkimi zainteresowanymi stronami. ICAO współpracuje stale z uznanymi organizacjami regionalnymi, takimi jak Regionalne Grupy Bezpieczeństwa Lotniczego (RASGs) czy Regionalne Organizacje Nadzoru Bezpieczeństwa (RSOOs), a także organizuje i wspiera szkolenia oraz inne działania służące rozwiązywaniu problemów związanych z bezpieczeństwem. Organizacja podejmuje również liczne wspólne działania z innymi agencjami ONZ – np. Światową Organizacją Meteorologiczną – służące odpowiedniemu przygotowaniu i reagowaniu na zagrożenia naturalne, takie jak wybuchy wulkanów, które mogą wpływać negatywnie na bezpieczeństwo i efektywność światowej żeglugi lotniczej [11].

Drugim z najważniejszych celów strategicznych w procesie rozwoju światowego lotnictwa jest skuteczna ochrona. Główny problem stanowi tu dynamiczny wzrost w branży lotniczej i rosnące liczby pasażerów, a także nadawców i odbiorców towarów wykorzystujących transport lotniczy. Obecnie wyróżniamy dwa główne obszary ochrony w światowych systemach lotniczych:

- ochrona fizyczna – ochrona statków powietrznych, pasażerów i ładunków; ochrona przed nieuprawnionym dostępem do systemów kontrolnych i infrastruktury lotniczej;
- zapewnienie bezpieczeństwa cybernetycznego – zabezpieczenie oprogramowania i łączy przed włamaniami, ingerencją, zakłóceniami czy przejęciem danych [12].

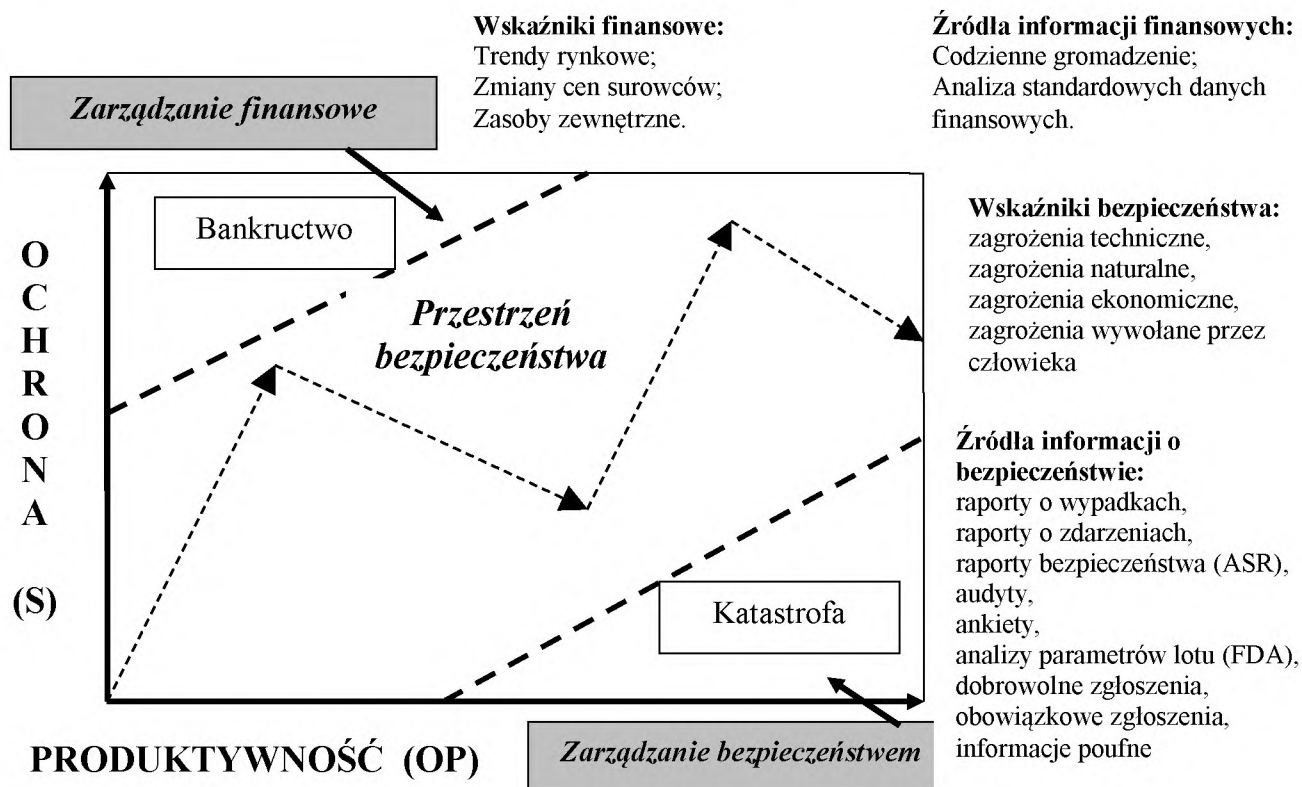
Chcąc zapewnić zintegrowane podejście do zarządzania bezpieczeństwem w lotnictwie, operatorzy transportowi powinni, obok systemu zarządzania bezpieczeństwem, stworzyć i wprowadzać również systemy zarządzania ochroną (Security Management System, SeMS). System zarządzania ochroną to element odpowiedzialności kierownictwa organizacji, który określa politykę

zarządzania ochroną i jej cele z ogólnej perspektywy całej organizacji. SeMS oznacza biznesowe podejście do zarządzania ochroną. Powinien on obejmować kluczowe elementy i podsystemy. Ponieważ nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie w tym zakresie, każdy z przewoźników lotniczych może wybrać najodpowiedniejsze dla siebie elementy lub podzielić je w sposób najbardziej dostosowany do własnych praktyk i struktury zarządzania bezpieczeństwem, pamiętając jednak o uwzględnieniu następujących kwestii: zaangażowaniu kierownictwa organizacji, zarządzaniu zasobami, ocenie zagrożeń i zarządzaniu ryzykiem, zarządzaniu sytuacjami nagłymi i incydentami (budowaniu odporności), kontroli i zapewnieniu jakości, programie ochrony lotnictwa [13].

1.2. Teoretyczne podejście do pomiaru poziomu bezpieczeństwa – sekwencyjny test ilorazu prawdopodobieństwa (SPRT)

Transport lotniczy to branża odgrywająca niezwykle istotną rolę w światowej gospodarce. Jednym z kluczowych elementów utrzymania właściwej dynamiki rozwoju lotnictwa cywilnego jest zapewnienie odpowiednich poziomów bezpieczeństwa i ochrony transportu. W tym celu Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) opracowuje normy i zalecane metody postępowania (SARPs), dotyczące bezpieczeństwa i ochrony lotnictwa w skali globalnej. Stworzenie światowego systemu bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego to zadanie łączące wiodące międzynarodowe oraz regionalne organizacje międzyrządowe i pozarządowe, a także instytuty badawcze i uczelnie na całym świecie. Współczesne wyzwania sprawiają, że niezbędne staje się ciągle podnoszenie poziomu bezpieczeństwa i ochrony lotnictwa oraz doskonalenie systemu transportu lotniczego. Dlatego poszukiwanie nowych metod wyznaczania „przestrzeni bezpieczeństwa” dla działań lotniczych wydaje się kwestią niezwykle istotną z punktu widzenia przyszłego rozwoju całego sektora lotnictwa.

Nowoczesne lotnictwo to system ultrabezpieczny (tzn. system, w którym zdarza się mniej niż jedno katastrofalne naruszenie bezpieczeństwa na milion cykli produkcyjnych). Jednym z głównych trendów w obecnej działalności lotniczej jest zastosowanie podejścia biznesowego w zarządzaniu bezpieczeństwem. Przejawem tego trendu jest coraz częstsze wykorzystywanie systemów zarządzania bezpieczeństwem w lotnictwie (SMS). Wprowadzenie instrumentów zarządzania biznesowego ma umożliwić stworzenie „przestrzeni bezpieczeństwa”, w której przedsiębiorstwo lotnicze może prowadzić swoją działalność ze świadomością, że w tej przestrzeni jest najbardziej odporne na ryzyko bezpieczeństwa i potencjalne zagrożenia. Granicami „przestrzeni bezpieczeństwa” są produktywność i ochrona (ilustracja 1.6) [5].



Ilustracja 1.6. Przestrzeń bezpieczeństwa
Źródło: Safety Management Manual (SMM): ICAO [5].

Z tego punktu widzenia niezwykle istotne jest znalezienie najskuteczniejszej metody wyznaczenia tych granic, tak by uniknąć błędnej alokacji zasobów, którymi dysponuje przedsiębiorstwo lotnicze. Dwie strony lub dwie granice bezpiecznej strefy to granica finansowa (zapewniająca produktywność) i granica bezpieczeństwa (zapewniająca ochronę) [5].

Granica finansowa (gwarantująca produktywność) to element zarządzania finansowego organizacji. Określając ją, można wykorzystać następujące wskaźniki:

- trendy rynkowe,
- zmiany cen surowców,
- zasoby zewnętrzne [5].

Najważniejsze źródła informacji finansowych to:

- codzienne gromadzenie informacji,
- analiza standardowych, dostępnych danych finansowych [5].

Granica bezpieczeństwa / ochrony bezpiecznej strefy powinna być określona w ramach systemu zarządzania bezpieczeństwem w organizacji. Właściwe jej wyznaczenie zapobiega błędnej alokacji zasobów, która z kolei może doprowadzić do katastrofy. Określając granicę bezpieczeństwa, możemy wykorzystać następujące wskaźniki:

- zagrożenia techniczne,
- zagrożenia naturalne,
- zagrożenia ekonomiczne [5].

Najważniejsze dostępne obecnie źródła informacji na temat bezpieczeństwa to:

- raporty o wypadkach,
- raporty o zdarzeniach,
- raporty bezpieczeństwa (ASR),
- audyty,
- ankiety,
- analiza parametrów lotu (FDA),
- dobrowolne zgłaszanie zdarzeń,
- przymusowe zgłaszanie zdarzeń,
- informacje poufne [5].

Biorąc pod uwagę powyższe informacje, poszukiwanie nowych metod określania „przestrzeni bezpieczeństwa” do działania dla przedsiębiorstw lotniczych wydaje się zasadne i istotne z punktu widzenia przyszłego rozwoju, wydajności i bezpieczeństwa branży lotnictwa cywilnego. W podręcznikach statystyki możemy znaleźć różne metody testowania hipotez. My proponujemy poniżej przydatny test, opracowany przez Abrahama Walda [14], który według jego autora może być bardzo skutecznym instrumentem umożliwiającym dokładne wyznaczenie strefy, w której przedsiębiorstwo lotnicze może bezpiecznie prowadzić swoją działalność, a którą nazwalismy „przestrzenią bezpieczeństwa”.

Hipoteza to proponowane wyjaśnienie jakiegoś zjawiska. By postawiona hipoteza stała się hipotezą naukową, musimy przeprowadzić test, który ją zweryfikuje. Naukowcy zazwyczaj opierają swoje hipotezy na wcześniejszych obserwacjach, których nie da się w sposób zadowalający wyjaśnić istniejącymi teoriami naukowymi. Choć określenia „hipoteza” i „teoria” są często używane wymiennie, to musimy pamiętać, że hipoteza naukowa i teoria naukowa to dwie różne rzeczy.

Hipoteza statystyczna to zazwyczaj stwierdzenie na temat określonego zbioru parametrów opisujących jakiś rozkład w populacji. Nazywamy je hipotezą, ponieważ nie wiemy, czy jest prawdziwe, czy też nie.

Przyjrzyjmy się np. populacji o rozkładzie normalnym i nieznaney wartości średniej θ oraz znanej wariancji $= 1$. Stwierdzenie „ $\theta = 2$ ” to hipoteza statystyczna, którą moglibyśmy przetestować, obserwując próbę losową z tej populacji. Nazywamy je *hipotezą zerową* i oznaczamy symbolem H_0 . Symbolicznie możemy wyrazić hipotezę zerową jako:

$$H_0: \theta = 2.$$

Podstawową kwestią jest opracowanie procedury, która pozwoli ustalić, czy wartości próby losowej z danej populacji potwierdzają postawioną hipotezę. Proces ten nazywamy *testowaniem hipotezy*. Jeśli uznamy, że próba losowa potwierdza testowaną hipotezę, uznajemy ją za „przyjętą”; w przeciwnym przypadku hipoteza zostaje „odrzucona”.

Opcja alternatywna dla hipotezy zerowej, którą osoba testująca stara się odnaleźć, nazywana jest *hipotezą alternatywną* i oznaczana symbolem H_1 . W naszym przykładzie hipoteza alternatywna H_1 mówi, że „ θ jest mniejsze niż 2”, co możemy zapisać jako:

$$H_1: \theta < 2.$$

Załóżmy, że X to zmienna losowa o rozkładzie prawdopodobieństwa $f(x)$. Niech hipoteza H_0 , którą chcemy przetestować, zakłada, że rozkład X wynosi $f(x, \theta_0)$. Załóżmy również, że alternatywna hipoteza H_1 zakłada, że rozkład X wynosi $f(x, \theta_1)$.

Jeśli zapiszemy serię n obserwacji jako $X_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, to prawdopodobieństwo tych n obserwacji wynosi:

$$P_0 = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta_0)$$

jeśli H_0 jest prawdziwa i:

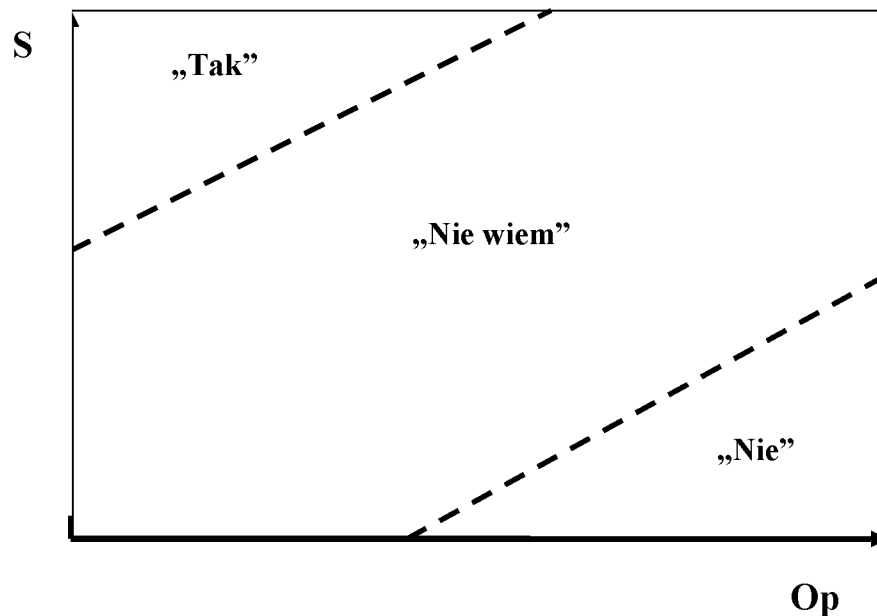
$$P_1 = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta_1)$$

jeśli H_1 jest prawdziwa.

Obecne testy hipotez statystycznych zakładają:

- 1) wątpliwość co do prawdziwości badanej hipotezy,
- 2) możliwość przynajmniej dwóch wyników testów:
 - a) przyjęcia hipotezy,
 - b) odrzucenia hipotezy.

W odróżnieniu od obecnie stosowanych procedur metoda sekwencyjnych testów hipotez statystycznych uzupełniona jest o trzeci możliwy wynik: „nie wiem”. W takich przypadkach schemat testowania hipotezy przybiera następującą formę:



Ilustracja 1.7. Schemat testowania hipotezy

Współczynnik prawdopodobieństwa możemy przedstawić w następujący sposób:

$$L = \frac{P_1}{P_0} = \prod_{i=1}^n \frac{f(x_i, \theta_1)}{f(x_i, \theta_0)}$$

lub w postaci logarytmicznej:

$$\log L_n = \log P_1 - \log P_0 = \sum_{i=1}^n [\log f(x_i, \theta_1) - \log f(x_i, \theta_0)]$$

Ten logarytm współczynnika prawdopodobieństwa $\log L_n$ jest obliczany po każdym i-tym eksperymencie i porównywany z granicami przedziału ufności $\log A$ i $\log B$, wyliczanymi na podstawie wartości błędów pierwszego (α) i drugiego typu (β), gdzie:

$$\begin{aligned} P(H_1 \text{ odrzucona} \mid H_0 \text{ prawdziwa}) &\leq \alpha, \\ P(H_0 \text{ odrzucona} \mid H_1 \text{ prawdziwa}) &\leq \beta. \end{aligned}$$

Abraham Wald pokazał, że dolna granica A jest wyliczana jako:

$$A = \frac{\beta}{1 - \alpha} \leq 1$$

A dolna granica B jako:

$$B = \frac{1 - \beta}{\alpha} \geq 1$$

Jeśli nie ma wystarczających dowodów na przyjęcie którejkolwiek z hipotez, eksperymenty są kontynuowane i wykorzystywane do obliczenia tzw. ilorazu prawdopodobieństwa. Jest to iloraz dwóch funkcji prawdopodobieństwa, z których jedna odnosi się do hipotezy H_0 , a druga – do

alternatywnej hipotezy H_1 . Zatem procedura sekwencyjnego testowania ilorazu prawdopodobieństwa (SPRT) wygląda następująco: na każdym n -tym etapie analizy sekwencyjnej:

1. jeśli $\log L_n \leq \log A$, to przyjmujemy hipotezę H_0 ,
2. jeśli $\log L_n \geq \log B$, to przyjmujemy hipotezę H_1 ,
3. jeśli $\log A < \log L_n < \log B$, kontynuujemy obserwacje.

W przypadku funkcji o rozkładzie podstawowym liniowe równania na wyliczenie dolnej (S_0) i górnej (S_1) granicy otrzymujemy po dokonaniu specjalnych przekształceń:

$$S_0(n) = h_0 + kn \text{ i } S_1(n) = h_1 + kn,$$

gdzie n to stale rosnąca liczba eksperymentów, zaś wartości k , h_0 , h_1 podane są w tabeli w postaci wyrażeń analitycznych.

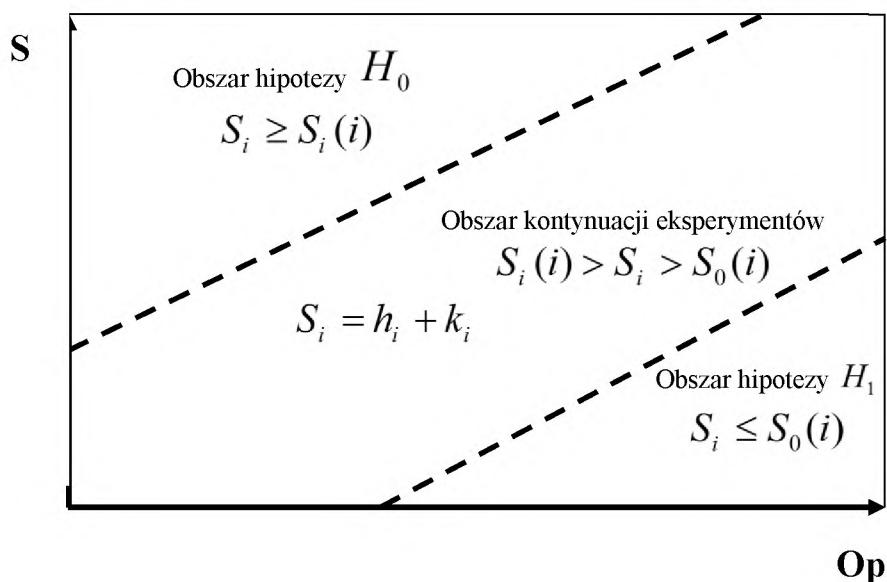
Dodatkowo parametry θ_0 i θ_1 są zazwyczaj wybierane podczas ustalania wstępnych założeń.

Zatem α i β są wstępnie określone, k , h_0 , h_1 są wyliczane po każdym i -tym eksperymencie ($i = 1, 2, \dots, n$ lub $i = Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_n$), a:

$$S_n = \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^s x_{ij} \right),$$

co porównywane jest z wartościami s_0 i s_1 wyliczonymi dla $n = i$, jak pokazano na ilustracji 1.8.

Jedna z hipotez – H_0 lub H_1 – jest akceptowana, kiedy punkt o współrzędnych (S_i, i) znajduje się na jednej z linii granicznych.



Ilustracja 1.8. Wyjaśnienie procesu testowania sekwencyjnego hipotez statystycznych

Liczba kroków ν to zmienna losowa, która zależy od tego, na ile zbliżone są obie hipotezy (różnica $\theta_1 - \theta_0$), wartości α i β , a także prawdopodobieństwo prawdziwości każdej z hipotez.

Praktycznie, znając wstępnie określone wartości α i β oraz różnicę między wartościami parametrów θ_0 i θ_1 , możemy oszacować liczbę kroków koniecznych do przeprowadzenia pełnej procedury testowania sekwencyjnego $M(\nu, H_0)$ – weryfikującej prawdziwość hipotezy H_0 ; $M(\nu, H_1)$ – weryfikującej prawdziwość hipotezy H_1 i $M(\nu)$ – w najgorszym przypadku, jeśli $\theta = 0,5(\theta_1 + \theta_2)$.

Wzory umożliwiające wstępne wyliczenie tych wartości przedstawia tabela 1.3. Efektywność analizy sekwencyjnej można obliczyć za pomocą następującego wzoru:

$$E = 1 - M(\nu) : N$$

Jak widać, jeśli $E > 0$, metoda sekwencyjna jest lepszym rozwiązaniem niż obecnie stosowane procedury, zalecanym, jeśli zezwalają na nie okoliczności.

Tabela 1.3. Wzory do obliczania wartości granicznych z wykorzystaniem metody serii czasowych

Typ rozkładu	Wskaźnik nachylenia k	Wartość stała w wyrażeniu $H_0 : h_0$	Wartość stała w wyrażeniu $H_1 : h_1$
Rozkład dwumianowy P_0 i P_1	$\frac{\log \frac{1-P_1}{1-P_0}}{\log \frac{P_1}{P_0} - \log \frac{1-P_1}{1-P_0}}$	$\frac{\log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\log \frac{P_1}{P_0} - \log \frac{1-P_1}{1-P_0}}$	$\frac{\log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\log \frac{P_1}{P_0} - \log \frac{1-P_1}{1-P_0}}$
Rozkład normalny (rozkład Gaussa)	$\frac{M_1(X) + M_2(X)}{2}$	$\frac{D(X)}{M_1(X) - M_0(X)} \cdot \log \frac{\beta}{1-\alpha}$	$\frac{D(X)}{M_1(X) - M_0(X)} \cdot \log \frac{1-\beta}{\alpha}$
Rozkład wykładniczy $\lambda = \frac{M(X)}{D(X)}$	$\frac{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}}{\lambda_1 - \lambda_0}$	$\frac{\log \frac{\beta}{1-\alpha}}{\lambda_1 - \lambda_0}$	$\frac{\log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\lambda_1 - \lambda_0}$

We wszystkich przykładach $S = \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^s x_{ij})$, w przypadku rozkładu dwumianowego

$x_{ij} = \begin{cases} 0 - \text{brak zdarzenia} \\ 1 - \text{zdarzenie} \end{cases}$, dla rozkładu normalnego lub wykładniczego x_{ij} o wartości wskazanej w zbiorze ij , dla liczby testów $z \geq 1$ i wartości losowej X .

Tabela 1.4. Wzory do obliczania a priori średniej liczby kroków (ν) w skutecznej procedurze Walda

Typ rozkładu	Dla oceny prawdziwości przyjęcia hipotezy „zerowej”, $M(\nu, H_1)$	Dla oceny prawdziwości hipotezy alternatywnej, $M(\nu, H_1)$	W najbardziej niesprzyjającej sytuacji, $M(\nu)$
Rozkład dwumianowy	$\frac{(1-\alpha) \log \frac{\beta}{1-\alpha} + \alpha \cdot \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{P_0 \log \frac{P_1}{P_0} + (1-P_0) \cdot \log \frac{1-P_1}{1-P_0}}$	$\frac{\beta \log \frac{\beta}{1-\alpha} + (1-\beta) \cdot \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{P_1 \log \frac{P_1}{P_0} + (1-P_1) \cdot \log \frac{1-P_1}{1-P_0}}$	-
Rozkład normalny	$\frac{(1-\alpha) \log \frac{\beta}{1-\alpha} + \alpha \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{-\left[\frac{M_1(X) - M_0(X)}{\sigma(X)}\right]^2}$	$\frac{\beta \log \frac{\beta}{1-\alpha} + (1-\beta) \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\left[\frac{M_1(X) - M_0(X)}{\sigma(X)}\right]^2}$	$\frac{-\log \frac{\beta}{1-\alpha} \cdot \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\left[\frac{M_1(X) - M_0(X)}{\sigma(X)}\right]^2} = -\frac{h_0 h_1}{D(X)}$
Rozkład wykładniczy	$\frac{(1-\alpha) \log \frac{\beta}{1-\alpha} + \alpha \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_1}}$	$\frac{\beta \log \frac{\beta}{1-\alpha} + (1-\beta) \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_1}}$	$\frac{-\log \frac{\beta}{1-\alpha} \cdot \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{\left(\log \frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^2} = -h_0 h_1 \cdot \frac{(\lambda_1 + \lambda_0)^2}{4}$

Zastosowanie metody sekwencyjnego testowania ilorazu prawdopodobieństwa może być skutecznym sposobem wyznaczenia „przestrzeni bezpieczeństwa” do działania dla przedsiębiorstw w branży lotniczej. Ze względu na różne typy zagrożeń (techniczne, naturalne i ekonomiczne) oraz zróżnicowane kanały informacyjne (raporty o wypadkach i zdarzeniach, audyty, ankiety, analizy parametrów lotu, zgłoszenia dobrowolne i przymusowe czy wiadomości poufne), wykorzystanie metody sekwencyjnej zwiększa dokładność procesu wyznaczania „przestrzeni bezpieczeństwa”. Wyznaczenie tej przestrzeni ułatwia wybór prawidłowych reakcji na pojawiające się zagrożenia i ryzyka i jest warunkiem dalszej poprawy bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym na poziomie ogólnosiwiatowym.

1.3. Multiplikacja współczynników częstotliwości wypadków lotniczych i celowości podejmowania ryzyka w macierzy tolerancji ryzyka bezpieczeństwa ICAO

Lotnictwo cywilne odgrywa ogromną rolę we współczesnej gospodarce i jest jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się sektorów rynku. Jednym z kluczowych składników rozwoju lotnictwa jest utrzymanie bezpiecznych, chronionych, efektywnych i zrównoważonych środowiskowo warunków operacji statków powietrznych oraz technicznej niezawodności na poziomie globalnym, regionalnym i krajowym. W tym celu ICAO opracowała globalny plan bezpieczeństwa lotnictwa, dokument strategiczny, zawierający metody planowania prowadzące do osiągnięcia ujednoliconych rozwiązań globalnych w zakresie bezpieczeństwa lotu (Flight Safety, FS) [15].

Według definicji ICAO bezpieczeństwo lotu to „oczekiwana charakterystyka” oparta przede wszystkim na szacunkach i zarządzaniu zróżnicowanymi rodzajami ryzyka występującymi w systemie transportu lotniczego. W kontekście niniejszego rozdziału będziemy definiować ryzyko jako „szansę wystąpienia niepożądanego zdarzenia” [2, 3]. ICAO stwierdza również jednoznacznie, że ryzyko można kontrolować, wykorzystując w tym celu różne środki przewidywania i ograniczania jego poziomu.

Z pewnością wykonywanie zadań związanych z zarządzaniem ryzykiem nie byłoby możliwe bez odpowiednich wskaźników jakościowych i ilościowych, które są szczególnie istotne z perspektywy oceny wpływu czynnika ludzkiego na poziom bezpieczeństwa lotu.

Zwracając uwagę na znaczenie proaktywnego zarządzania bezpieczeństwem lotu, ICAO przygotowała Podręcznik zarządzania bezpieczeństwem (Safety Management Manual, SMM), w którym przedstawia „macierz tolerancji ryzyka bezpieczeństwa”, ułatwiającą ocenę zagrożeń w lotnictwie (tabela 1.5), która określa trzy poziomy ryzyka – niedopuszczalne, dopuszczalne i akceptowalne.

Pierwsze działania w tym zakresie podjęto już w tym samym roku [19, 20]. Dotyczyły one możliwości określenia kluczowych punktów w szacowanych funkcjach korzyści–bezpieczeństwa, umożliwiających obliczenie poziomu ryzyka. Funkcje te stworzone są za pomocą ograniczonej liczby punktów i wykorzystywane przez operatorów lotniczych jako wskaźniki w procesie podejmowania decyzji.

SMM zawiera pięć różnych wskaźników oceny dotkliwości i prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanych zdarzeń [18], które możemy przedstawić jako różne określenie poziomu (Term-Multitude, TM) odpowiednich zmiennych lingwistycznych (Linguistic Variables, LV) zaczerpniętych z rozmytych systemów matematycznych [21, 22].

Tabela 1.5. Macierz tolerancji ryzyka bezpieczeństwa ICAO [5]

Proponowane kryteria	Wskaźnik oceny ryzyka	Dopuszczalność ryzyka
1	2	3
Niedopuszczalne	5A, 5B, 5C, 4A, 4B, 3A	Nieakceptowalne w obecnych warunkach

Dopuszczalne

Akceptowalne

	5D, 5E, 4C, 4D, 4E, 3B, 3C, 3D, 2A, 2B, 2C	Częściowo akceptowalne w przypadku zastosowania procedur ograniczających ryzyko. Może wymagać zgody przełożonego
	3E, 2D, 2E, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E	Akceptowalne

Są to:

– określenie poziomu (TM) zmiennych lingwistycznych (LV) „ryzyka zdarzenia (ED)”:

$$T^M(ED) = \overset{\tilde{R}_a}{katastrofalne} + \overset{\tilde{R}_b}{niebezpieczne} + \overset{\tilde{R}_d}{większe} \overset{\tilde{R}_c}{+} \overset{\tilde{R}_e}{niewielkie} + \overset{\tilde{R}_e}{nieistotne} \quad (1.3.1)$$

– określenie poziomu (TM) zmiennych lingwistycznych (LV) „częstotliwości zdarzenia (ED)”:

$$T^M(EF) = \overset{\tilde{R}_5}{katastrofalne} + \overset{\tilde{R}_4}{niebezpieczne} + \overset{\tilde{R}_3}{dalekie} + \overset{\tilde{R}_2}{nieprawdopodobne} + \overset{\tilde{R}_1}{skrajnie nieprawdopodobne} \quad (1.3.2)$$

Wydaje się, że wprowadzając narzędzia (macierz ryzyka, RM), oparte na różnych kombinacjach parametrów lingwistycznych EF i ED (tabela 1.5), ICAO znalazła integralne rozwiązanie problemu zarządzania ryzykiem (tabela 1.6) związanego z niepewnością. W rzeczywistości 24% przypadków uznaje się za nieakceptowalne, 44% za częściowo akceptowalne, a 32% za akceptowalne (ilustracja 1.9a).

Jednocześnie definicje te wydają się oparte na doświadczeniu empirycznym. I tak np. typ 1A, czyli „skrajnie nieprawdopodobne katastrofalne ryzyko”, na oryginalnej macierzy ICAO należy do grupy ryzyka akceptowalnego, razem z typem 5E, czyli „częstym nieistotnym ryzykiem”. Jednak w rzeczywistości, zgodnie ze współczesnym rozumieniem ryzyka, zagrożenia kumulujące się w dłuższym okresie mogą być nawet poważniejszym źródłem wypadków. Również kwestia oddziaływania [23] oraz ukryte zagrożenia lub wady [18, 24], powodują, iż ryzyko to staje się nieakceptowalne, nawet pomimo wprowadzania „procedur ograniczających” (tabela 1.5). Wdrażając system zarządzania bezpieczeństwem lotu ICAO, FAA opublikowała specjalny okólnik [25], w którym 76% elementów znajdujących się na macierzy ryzyka uznano za akceptowalne (ilustracja 1.9b). Wprowadzono tam również pewne modyfikacje zaleceń ICAO. Liczba akceptowalnych typów ryzyka została zwiększona do 40%, zaś liczba typów częściowo akceptowalnych została zmniejszona do 36%.

Autorzy publikacji [26] proponują, by zdefiniować poziom ryzyka R jako wynik mnożenia wskaźników ED i EF:

$$R = P \cdot S \quad (1.3.3)$$

gdzie:

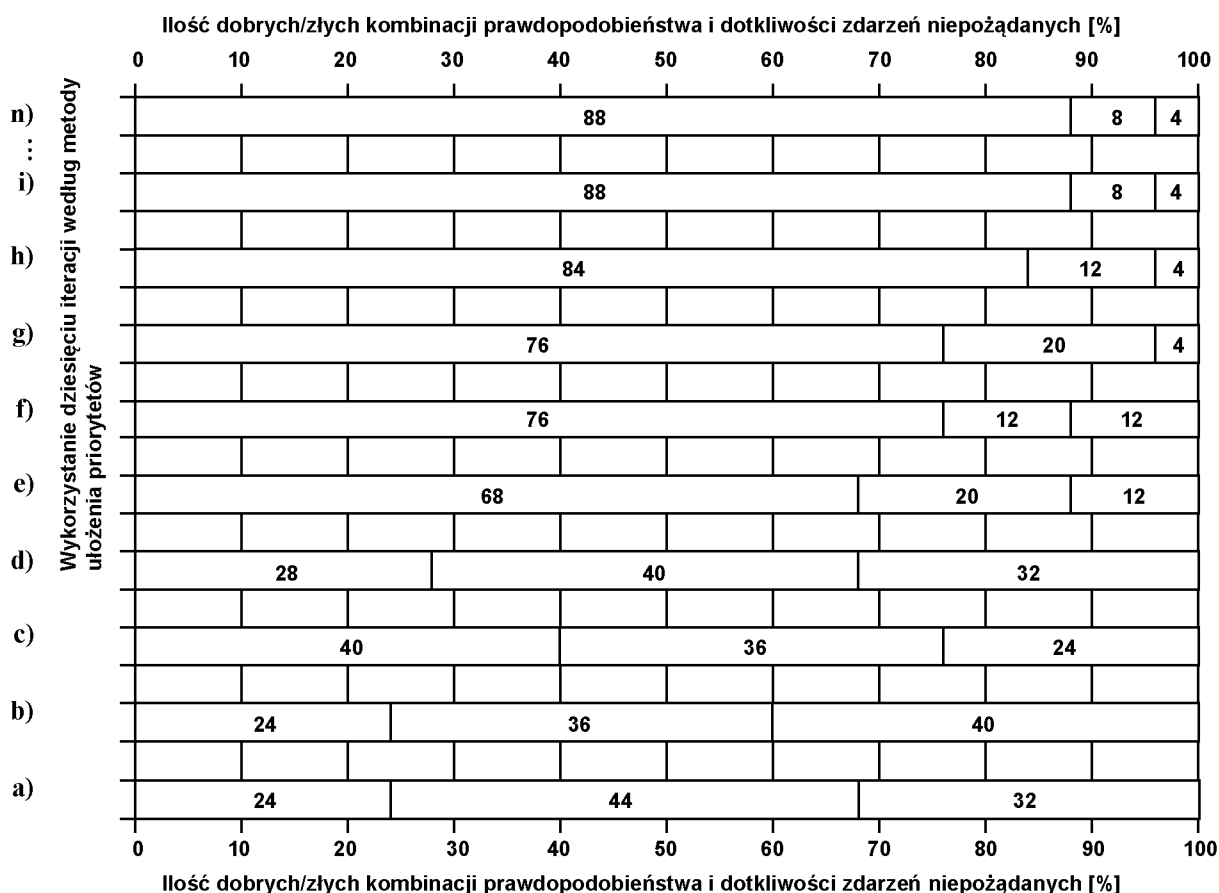
P – wskaźnik prawdopodobieństwa,

S – wskaźnik dotkliwości.

Zakładając, że zdarzeniom skrajnie nieprawdopodobnym i zdarzeniom o niewielkich lub nieistotnych skutkach odpowiadają wartości $P = 0$ i $S = 0$, zaś zdarzeniom najbardziej

prawdopodobnym i katastrofalnym – wartości $P = 1$ i $S = 1$, wiemy, że parametry te mieszczą się w przedziałach: $P = \overline{0,1}$, $S = \overline{0,1}$.

Przedziały parametrów podzielone są na pięć obszarów, umożliwiających multiplikatywne podejście do tworzenia kombinacji wskaźników, zgodnie ze wzorem (1.3.3). Każdy z typów pokazanych na macierzy ryzyka uzyskuje łączną wartość tych wskaźników, o pewnym stopniu niepewności. Na przykład wartość $R = 0,48$ mają zarówno nieakceptowalne typy ryzyka 5C, 4B, 3A, jak i częściowo akceptowalne typy 4B, 3C.



Ilustracja 1.9. Macierz tolerancji ryzyka przygotowana za pomocą różnych metod analitycznych (w każdym rzędzie wartości po lewej stronie oznaczają niedopuszczalne ryzyko, wartości w środku oznaczają ryzyko dopuszczalne, zaś wartości po prawej stronie – ryzyko akceptowalne); a) podejście ICAO; b) podejście FAA; c) współczynniki Harringtona; d)–j) wyniki metody zmian ułożenia priorytetów, dziesięć iteracji [39]

Jedną z przyczyn takich wyników mogą być różne sposoby rozkładu wartości. Inną może być potrzeba zastosowania multiplikacji wektorowej zamiast skalarnej [27]:

$$\vec{R} = \vec{P} \times \vec{S} \quad (4)$$

Szczegółowe badania macierzy ryzyka zawarliśmy w rozdziale [28], gdzie przeanalizowane zostały macierze o wymiarach od 2×2 do 5×5 , obejmujące różne obszary działalności. Proponujemy tam koncepcję „słabej spójności”, która musi charakteryzować analizowane macierze. Mówiąc w skrócie, koncepcja ta oznacza, że ilościowa reprezentacja niedopuszczalnego ryzyka musi być mniejsza od reprezentacji ryzyka akceptowalnego. „Słaba spójność” to cecha obowiązkowa macierzy ryzyka. Nasze badania dowodzą również dwóch ważnych twierdzeń:

1. Obszary kombinacji parametrów ED i EF, które odpowiadają niedopuszczalnym i akceptowalnym ryzykom, nie mogą mieć wspólnych granic.

2. Zwiększenie grup pośrednich (np. grupy „częściowo dopuszczalnych” w macierzy 5×5) nie powoduje wzrostu efektywności macierzy.

Możemy wyciągnąć wniosek, że macierz ryzyka pozwala odróżnić jedynie akceptowalne i niedopuszczalne rodzaje ryzyka. Co więcej, jak pokazuje rozdział [29], za pomocą tego narzędzia można porównać jedynie 10% wszystkich zagrożeń. Nawet uwzględniając konieczność dalszych badań w tym zakresie, już dziś widać wyraźnie, że macierz ryzyka to rozwiązanie, z którego należy korzystać bardzo ostrożnie. Jasne jest również, że proces podejmowania decyzji w ramach zarządzania bezpieczeństwem lotu nie może się opierać wyłącznie na macierzy ryzyka. Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe kwestie, warto zwrócić uwagę na propozycje zawarte w rozdziale [30], mówiące o wprowadzeniu dodatkowych parametrów szacowania, analizy i zarządzania ryzykiem.

Z punktu widzenia analizy celem niniejszego rozdziału jest przede wszystkim ocena rozwiązania, jakim jest „macierz tolerancji ryzyka” ICAO, dokonana za pomocą współczynników celowości podejmowania ryzyka oraz wskaźników jakościowych częstotliwości zdarzeń i zagrożeń lotniczych określonych na podstawie funkcji Harringtona. Poza tym celem rozdziału jest również badanie nowych metod wykorzystania, rozwiązań i modeli „macierzy tolerancji ryzyka” z perspektywy służb i operatorów lotniczych (kontrolerów ruchu lotniczego i załóg samolotów).

Współczynniki niebezpieczeństwa i celowości podejmowania ryzyka

Należy zauważyć, że powyższe cele można osiągnąć również za pomocą współczynników celowości podejmowania ryzyka Harringtona, wykorzystanych dokładnie dla jakościowej skali lingwistycznej o wymiarach podobnych do skal objętych badaniami (1.3.1) i (1.3.2).

Następnie można z łatwością otrzymać zintegrowany wskaźnik ryzyka, wykorzystując multiplikatywną funkcję celowości Harringtona, w której obliczenia ograniczają się do wyznaczenia średniej geometrycznej współczynników zagrożenia i częstotliwości zdarzeń [31].

W takim przypadku (ilustracja 1.9c) ilość ogólnie dopuszczalnych kombinacji wskaźników ED i EF ograniczona jest do 60% w porównaniu z zaleceniami ICAO i FAA. Można to wyjaśnić nieliniowością współczynników celowości Harringtona. Takie podejście jest w pełni prawidłowe, biorąc pod uwagę nieliniowe postrzeganie wskaźników ED i EF, i zgodne z wymaganiami wsparcia bezpieczeństwa lotu.

Z wyrażeń (1.3.1) i (1.3.2) wynika oczywista klasyfikacja częstotliwości i dotkliwości niepożądanych zdarzeń:

– dla wskaźników ED:

$$\tilde{R}_e \succ \tilde{R}_d \succ \tilde{R}_c \succ \tilde{R}_b \succ \tilde{R}_a ; \quad (1.3.5)$$

– dla wskaźników EF:

$$\tilde{R}_1 \succ \tilde{R}_2 \succ \tilde{R}_3 \succ \tilde{R}_4 \succ \tilde{R}_5 \quad (1.3.6)$$

Prowadzi to do możliwości sprecyzowania rozmytych wskaźników za pomocą matematycznej metody ułożenia priorytetów (MPA), opierającej się na doświadczeniach badawczych [32, 33, 34]. MPA wykorzystuje kwadratową macierz sąsiedztwa $C = \|c_{ij}\|$ do szacowania wskaźników jakościowych, zdefiniowanych za pomocą klasyfikacji (5) (6):

$$c_{ij} = \begin{cases} 2 \text{ jeśli } \tilde{R}_i \text{ jest bardziej pożądane od } \tilde{R}_j : \tilde{R}_i \succ \tilde{R}_j \\ 0 \text{ jeśli przeciwnie, } \tilde{R}_i \prec \tilde{R}_j \end{cases}$$

Jeśli macierzy C nie da się rozłożyć, można wykorzystać procedury, które zgodnie z twierdzeniem Perrona–Frobeniusa prowadzą do największej wartości własnej o odpowiednim wektorze własnym. To z kolei pozwala udowodnić, że znormalizowany proces obliczania iteracyjnej celowości podejmowania ryzyka dla wskaźnika jakościowego \tilde{R}_j jest konwergentny.

Jak wynika z [32, 34], wykorzystanie MPA pozwala badaczowi porównać również dodatkowe (pośrednie) zalety poszczególnych wartości wskaźników jakościowych. Wyniki obliczeń tych wartości przedstawione zostały w tabeli 1.7.

Wyznaczanie zintegrowanych wskaźników i rozwiązanie „macierzy tolerancji ryzyka”

By wyznaczyć zintegrowany wskaźnik ryzyka wystąpienia niepożądanego zdarzenia, wykorzystamy multiplikatywną metodę agregowania współczynników celowości podejmowania ryzyka i częstotliwości zdarzeń niepożądanych. Jak wskazuje doświadczenie [31, 35], najczęściej stosowanym w takich przypadkach narzędziem jest funkcja celowości ryzyka Harringtona, którą w kontekście naszych rozważań możemy zapisać w następujący sposób:

$$\alpha R_i = \sqrt{\alpha_j^{ED} \alpha_k^{EF}}, \quad (1.3.7)$$

gdzie αR_i – zintegrowany wskaźnik ilościowy i -tej kombinacji ($i = \overline{1,25}$) wskaźników celowości ED α_j^{ED} , $j = \overline{1,5}$, i EF α_k^{EF} , $k = \overline{1,5}$.

W odróżnieniu od powszechnie stosowanego podejścia addytywnego wzór (1.3.7) stwarza możliwość zrekompensowania niskich wartości współczynników celowości wartościami wysokimi. Wzór ten możemy wykorzystać jako jeden uniwersalny i zintegrowany wskaźnik ryzyka wynikającego ze skali i częstotliwości występowania zdarzeń niepożądanych. Biorąc pod uwagę jej sposób postrzegania i efektywność, uogólniona funkcja celowości ryzyka (1.3.7) może służyć również jako kryterium optymalizacji.

Tabela 1.7 przedstawia przykład macierzy ryzyka oraz rozwiązania „macierzy tolerancji” na podstawie pierwszej iteracji według metody MPA. Dzieląc uzyskany przedział $\alpha_{\tilde{R}_i} = [0.04 - 0.36]$ na trzy części, otrzymujemy rozwiązanie „macierzy tolerancji” zgodne z odpowiednimi wskaźnikami akceptowalności. Dodatkowo wykorzystując dane z tabeli 1.6, możemy stworzyć przydatny nomogram (ilustracja 1.9) umożliwiający dokładniejszą analizę ryzyka.

Ilustracja 1.9 przedstawia dynamikę dopuszczalności kombinacji współczynników zagrożenia i częstotliwości, otrzymaną na podstawie trzeciej iteracji według MPA, w porównaniu z propozycją ICAO i FAA oraz współczynnikiem celowości ryzyka Harringtona.

Pierwsza iteracja według MPA pokazuje ogólną liczbę akceptowalnych typów ryzyka, równą 72%, co jest wynikiem najbliższym propozycji ICAO. Choć z tabeli 2 wynika, iż mamy do czynienia z relacją liniową, która nie jest odpowiednia w przypadku występowania czynnika ludzkiego, zdrowy rozsądek podpowiada, że współczynniki nie mogą mieć charakteru liniowego, kiedy badanie uwzględnia działania człowieka. Dowodzą tego częściowo rozmyte operacje skupienia i rozproszenia [21, 22], wykorzystywane w przypadku skal lingwistycznych. Nieliniowość rozpoczyna się od drugiej iteracji według MPA. W rezultacie większość kombinacji (68%) jest niedopuszczalna przy zastosowaniu proponowanej metody akceptacji, która wydaje się zasadna dla bezpieczeństwa lotu.

Tabela 1.6. Wyniki metody ułożenia priorytetów ułatwiającej wyznaczenie wskaźników celowości ryzyka [39]

Wskaźnik		Iteracja, w której uzyskano odpowiednie współczynniki										
ED	EF	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
E	1	0,36	0,4824	0,5733	0,6407	0,6914	0,7303	0,7610	0,7856	0,8057	0,8225	0,8367
D	2	0,28	0,2941	0,2800	0,2575	0,2345	0,2136	0,1953	0,1793	0,1656	0,1536	0,1431
C	3	0,20	0,1529	0,1111	0,0818	0,0619	0,0482	0,0384	0,0312	0,0259	0,0217	0,0185
B	4	0,12	0,0588	0,0311	0,0180	0,0112	0,0074	0,0051	0,0037	0,0027	0,0021	0,0016
A	5	0,04	0,0118	0,0044	0,0020	0,0010	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
Σ		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
UWAGA: ED – ryzyko zdarzenia, EF – częstotliwość zdarzenia.												

Wykorzystując dalej metodę MPA, obserwujemy znaczący spadek liczby akceptowalnych kombinacji. Począwszy od szóstej iteracji, tylko dwie z tych kombinacji będą oznaczać częściowo dopuszczalny poziom ryzyka, a tylko jedna – ryzyko akceptowalne. Wywołuje to pewne wątpliwości dotyczące proporcji grup zaproponowanych w „macierzy tolerancji ryzyka” ICAO.

Nowe metody rozwiązywania „macierzy tolerancji”, uwzględniające czynnik ludzki

Opisane możliwości badań analitycznych można zastosować również do analizy ryzyka i zarządzania bezpieczeństwem lotu w instytucjach lotniczych. W odniesieniu do AO można je wykorzystać jednak tylko w teoretycznej części szkoleń. Jednocześnie należy pamiętać o nowych metodach oraz trendach proaktywnego zarządzania badaniami nad czynnikiem ludzkim, które można wykorzystać w zarządzaniu bezpieczeństwem lotu oraz w szkoleniach personelu AO.

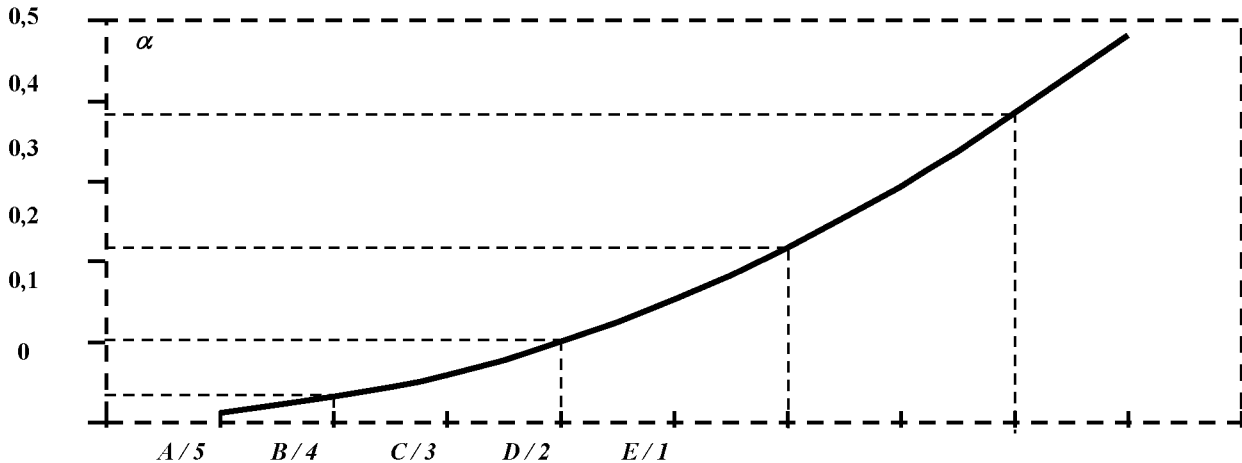
Autorzy publikacji [21], analizującej wspomniane wskaźniki ryzyka i częstotliwości wystąpienia zdarzeń niepożądanych jako zmiennych lingwistycznych o zróżnicowanych poziomach, wskazują możliwość stworzenia odpowiednich funkcji przynależności, które – połączone za pomocą metody Dubois–Prade’a [22, 37] – pozwalają oszacować zintegrowane ryzyko. Jak dotąd nie przedstawiono jednak żadnych propozycji praktycznego zastosowania tych funkcji ani nie wskazano rzeczywistego sensu prezentowanych argumentów.

Kolejny problem został usunięty przez autorów publikacji [38], którzy opracowali funkcję przynależności zmiennych lingwistycznych dla jasnego argumentu ilościowego, jakim jest norma poziomu lotu. Otworzyło to możliwość ustalenia przedziałów ilościowych naruszeń normy poziomu lotu w odniesieniu do szacunków lingwistycznych. Jednakże ciągle jeszcze nie przeprowadzono badań tego rodzaju dotyczących funkcji przynależności zmiennych lingwistycznych „częstotliwości zdarzeń niepożądanych”, które doprowadziłyby do opracowania nowej „macierzy tolerancji ryzyka”.

Tabela 1.7. Przykład macierzy tolerancji ryzyka ICAO, wykorzystujący współczynniki dotkliwości/częstotliwości zdarzenia oraz multiplikatywne podejście przy pierwszej iteracji według metody ułożenia priorytetów [39]

Częstotliwość ryzyka	Dotkliwość ryzyka									
	A		B		C		D		E	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	5A	0,04	5B	0,0693	5C	0,0894	5D	0,1058	5E	0,12
4	4A	0,0693	4B	0,12	4C	0,1549	4D	0,1833	4E	0,2078
3	3A	0,0894	3B	0,1549	3C	0,20	3D	0,2366	3E	0,2683
2	2A	0,1058	2B	0,1833	2C	0,2366	2D	0,28	2E	0,3175
1	1A	0,12	1B	0,2078	1C	0,2683	1D	0,3175	1E	0,36
UWAGA: pola nr 2, 4, 6, 8, 10 pokazują zalecenia ICAO; pola nr 3, 5, 7, 9, 11 – wartość współczynników ryzyka;										

pogrubienie oznacza rozwiązania niedopuszczalne, *kursywa* oznacza wyniki częściowo dopuszczalne.



Ilustracja 1.10. Nomogram współczynników dotkliwości/częstotliwości ryzyka od pierwszej iteracji według metody ułożenia priorytetów [39]

„Macierz tolerancji ryzyka” opracowana za pomocą nieograniczonej liczby kluczowych punktów A/C oraz wskaźników problemu podejmowania decyzji w działalności zawodowej została opisana również w artykule [38].

Podsumowując wyniki naukowe omówione w niniejszym rozdziale, możemy stwierdzić, że:

1. Rozwiązanie w postaci „macierzy tolerancji ryzyka” ICAO zostało zaproponowane na podstawie multiplikatywnego zbioru współczynników dotkliwości i częstotliwości zdarzeń niepożądanych.
2. Współczynniki te wyznaczono z wykorzystaniem metody MPA umożliwiającej sprecyzowanie rozmytych wartości zmiennych lingwistycznych wskaźników «ED» i «EF», która pozwala również uzyskać nieliniowość ilościową, dostosowaną do wymagań bezpieczeństwa lotu.
3. Odkryto, iż nieliniowość ta prowadzi do znaczącego spadku liczby dopuszczalnych opcji.

Dalsze badania powinny się koncentrować na:

- dokładniejszej analizie zmiennych lingwistycznych wskaźników «ED» i «EF» jako podstawy opracowania „macierzy tolerancji ryzyka”;
- tworzeniu funkcji przynależności zmiennych lingwistycznych wskaźników «ED» i «EF» umożliwiających budowanie jasnych argumentów, a także rozwijaniu metod wyznaczania zintegrowanego ryzyka;
- tworzeniu funkcji estymacji użyteczności względem bezpieczeństwa w procesach podejmowania decyzji.

W skrócie – wszystko to wiąże się z rolą czynnika ludzkiego w zarządzaniu bezpieczeństwem lotu [39].

1.4. Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem w służbach ruchu lotniczego

1.4.1. Globalne podejście ICAO do systemu bezpieczeństwa w zarządzaniu ruchem lotniczym

Bezpieczeństwo pozostaje najwyższym priorytetem w lotnictwie, a bezpieczeństwo ruchu lotniczego jest zawsze najważniejszym czynnikiem we wszystkich fazach działań systemu zarządzania ruchem lotniczym (Air Traffic Management, ATM), począwszy od koncepcji, przez projektowanie, rozwój i produkcję, skończywszy na eksploatacji i utrzymaniu. Przedstawione poniżej systemowe podejście do bezpieczeństwa jest podejściem holistycznym, stosowanym w całym systemie ATM, obejmującym ludzi, procedury oraz technologie wykonywania poszczególnych zadań w określonym środowisku. Maksymalną wydajność i skuteczność rozwiązań zapewniają działania podejmowane we wczesnych fazach cyklu życia systemu – od identyfikowania i likwidowania problemów na etapie definiowania wymagań i projektowania procesów oraz produktów.

Osiągnięcie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa w służbach ruchu lotniczego na poziomie globalnym jest możliwe dzięki:

1. opracowaniu globalnych strategii zawartych w Globalnym Planie Bezpieczeństwa w Lotnictwie oraz Globalnym Planie Żeglugi Powietrznej;
2. opracowaniu i utrzymaniu norm, zalecanych metod postępowania oraz procedur obowiązujących w międzynarodowym lotnictwie cywilnym, które zawarte są w aneksach do konwencji chicagowskiej oraz dokumentach PANS (Procedury służb żeglugi powietrznej). Uzupełnieniem tych norm jest 50 podręczników i okólników zawierających wytyczne dotyczące ich wdrożenia (patrz więcej: rozdział 5.1);
3. monitorowaniu trendów i wskaźników bezpieczeństwa. ICAO monitoruje wdrożenie norm i zalecanych metod postępowania poprzez swój program audytów nadzoru bezpieczeństwa; organizacja przygotowała również zaawansowane narzędzia gromadzenia i analizy zróżnicowanych danych na temat bezpieczeństwa, umożliwiające identyfikację istniejących i przewidywanie potencjalnych zagrożeń;
4. wdrożeniu programów zarządzania bezpieczeństwem, ukierunkowanych na wykrywanie i usuwanie zaniedbań w zakresie bezpieczeństwa oraz infrastruktury;
5. skutecznemu reagowaniu na zakłócenia w systemie lotnictwa cywilnego, wywołane przez katastrofy naturalne, konflikty lub inne przyczyny [15].

Akceptowalny lub tolerowalny poziom bezpieczeństwa określany jest na podstawie formułowanych przez społeczeństwo lub społeczność międzynarodową potrzeb w tym zakresie. Wynika on również z poziomu zaufania wobec całego systemu ATM. Wyznaczany w każdym przypadku docelowy poziom bezpieczeństwa to poziom minimalny, jaki system musi zapewnić w danej sytuacji. Często jest on wynikiem obowiązujących regulacji i musi być przynajmniej równy lub wyższy niż poziom akceptowalny. Poziom docelowy oparty jest na ocenie ryzyka i kryteriach dopuszczalności. Poziom akceptowalny i docelowy można określać za pomocą wskaźników jakościowych i/lub ilościowych, często związanych z występowaniem zdarzeń zagrażających bezpieczeństwu, takich jak np.:

- maksymalne prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń niepożądanych, takich jak kolizja, naruszenie zasad separacji lub wtargnięcie na drogę startową;
- maksymalna liczba zdarzeń na godzinę lotu;

- maksymalna liczba incydentów na jedną operację samolotu;
- maksymalna liczba ważnych ostrzeżeń o sytuacji konfliktowej na operację samolotu [40].

Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem (SMS) w służbach ruchu lotniczego (ATS) obejmuje omówione powyżej ogólne wymagania i skupia się przede wszystkim na rozwiązywaniu poniższych złożonych kwestii [9, 41, 42]:

- ocenie poziomu bezpieczeństwa lotu, ryzyka i zagrożeń występujących w różnych obszarach przestrzeni powietrznej (w ruchu lotniskowym, w rejonie kontrolowanym lotniska [ATM] oraz innych rejonach kontrolowanych);
- szacowaniu/optymalizacji parametrów przepływu ruchu lotniczego w rejonach kontrolowanych lotniska i innych rejonach kontrolowanych;
- doskonaleniu sieci struktur/tras w przestrzeni powietrznej na podstawie wyników ocen poziomu bezpieczeństwa i szacunkowych parametrów przepływu ruchu lotniczego.

Zadania te rozwiązywane są przez specjalistyczne moduły zintegrowanego SMS w służbach ruchu lotniczego, które omawiamy poniżej.

1.4.2. Metody i narzędzia analizy ryzyka w kontroli ruchu lotniczego

Ocena poziomu bezpieczeństwa lotu, ryzyka i zagrożeń to złożony problem, obejmujący szerokie spektrum działań i wymagające zastosowania zróżnicowanych narzędzi. Kwestie te zostały obszernie omówione w publikacjach [43, 45, 46, 47].

Wykorzystywane w tym celu metody i narzędzia zostały podzielone na siedem klas. Klasyfikacja opiera się na funkcjach poszczególnych narzędzi, choć można również zastosować w tym celu inne kryteria, a niektóre narzędzia mogą należeć do kilku klas, ponieważ można je wykorzystywać w różnych, opisanych poniżej, funkcjach [44].

Systemy danych nt. incydentów bezpieczeństwa. Tego typu narzędzia umożliwiają gromadzenie, analizę i zarządzanie danymi na temat zdarzeń zagrażających utrzymaniu poziomu bezpieczeństwa pożądanego z punktu widzenia zarządzania ruchem lotniczym. Narzędzia te mogą być stosowane do analizy pojedynczych zdarzeń lub grup zdarzeń.

Przykłady takich narzędzi/systemów to:

- automatyczne narzędzie monitorowania bezpieczeństwa (ASMT, EUROCONTROL),
- zestaw narzędzi do badania zdarzeń ATM (TOKAI, EUROCONTROL),
- system raportowania codziennych zdarzeń w lotnictwie cywilnym (CADORS, Transport Canada),
- program obowiązkowego raportowania zdarzeń (MORS, UK CAA).

Należy wspomnieć również o Europejskim Centrum Koordynacji Systemów Raportowania o Incydentach Lotniczych (ECCAIRS), będącym inicjatywą Unii Europejskiej, którego celem jest harmonizacja systemów raportowania poszczególnych krajów członkowskich i umożliwienie stałej równorzędnej wymiany danych na temat incydentów lotniczych.

Odtwarzanie ruchu lotniczego i symulacje nieinteraktywne. Są to narzędzia umożliwiające odtwarzanie w czasie rzeczywistym (lub z niewielkim opóźnieniem) lub statyczna prezentacja zarejestrowanych tras samolotów i działań kontrolerów ruchu

lotniczego, które ułatwiają analizę zdarzeń oraz identyfikację ich przyczyn. Narzędzia te umożliwiają analizę zdarzeń przy różnym natężeniu ruchu, na różnych trasach i w różnych warunkach.

Przykładami takich narzędzi/systemów są:

- narzędzia oceny przyszłych koncepcji ATM (FACET, NASA),
- zaawansowany symulator matematyczny ATC (RAMS Plus),
- interfejs do odtwarzania ostrzeżeń TCAS (RITA, EUROCONTROL),
- graficzne odwzorowanie przestrzeni powietrznej (GRADE, USA).

Interaktywne narzędzia i urządzenia symulacyjne to narzędzia symulacyjne działające w czasie rzeczywistym, obsługiwane przez jedną lub więcej osób symulujących działania kontrolerów ruchu lotniczego i pilotów samolotów. Są one niezwykle przydatnym narzędziem analizy zachowań ludzkich w rzeczywistych i hipotetycznych sytuacjach. Służą również do weryfikacji proponowanych zmian wyposażenia, zasad działania lub procedur.

Przykładami takich narzędzi/systemów są:

- kontrolowane syntetyczne środowisko przestrzeni powietrznej (CASE, Alenia Marconi Systems),
- centrum symulacji lotniczej FAA, symulator badawczy NLR ATC (NARSIM, Niderlandy).

Innym ważnym narzędziem tego typu jest platforma do symulacji i eksperymentów stworzona przez EUROCONTROL (ESCAPE). Jest to największy symulator ATC działający w czasie rzeczywistym w Europie, wykorzystywany w działaniach badawczo-rozwojowych, szkoleniach i różnego rodzaju projektach naukowych.

Analiza ryzyka. Narzędzia tego typu mają swoje miejsce w pozyskiwaniu przykładowych danych. Jednak chcąc oszacować ryzyko, należy zastosować specjalne narzędzia analityczne, symulujące różne replikacje scenariusza ryzyka i w ten sposób umożliwiające ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanego zdarzenia. Narzędzia te pozwalają oszacować ryzyko związane z określonym zdarzeniem, procedurą lub działaniem.

Przykładami takich narzędzi/systemów są:

- analizatory organizacji i zakłóceń ruchu lotniczego (TOPAZ, Niderlandy),
- systemy ilościowej oceny ryzyka (QRAS, University of Maryland).

Analizą czynnika ludzkiego nazywamy badanie zachowań ludzkich (np. kognitywne, percepcyjne, fizjologiczne lub motoryczne) oraz działań na styku człowiek–maszyna. Wykorzystujemy w nim narzędzia analizy, szacowania lub przewidywania ludzkich błędów, zdolności i możliwości, a także obciążenia w różnych sytuacjach (patrz więcej w rozdziale 2.4).

Przykładami tego typu narzędzi/systemów są:

- systemy ograniczania błędów ludzkich w ATM (HERA, EUROCONTROL),
- techniki przewidywania liczby błędów ludzkich (THERP),
- TRACER lite (EUROCONTROL).

Eksploracja tekstów/danych i wizualizacja danych. Narzędzia eksploracji tekstu pozwalają pozyskiwać uporządkowane informacje z badanych tekstów. Z kolei narzędzia eksploracji danych przetwarzają ogromne ilości uporządkowanych danych w poszukiwaniu potencjalnych związków przyczynowo-skutkowych, modeli, trendów itd. Większość z tych narzędzi nie powstała z myślą o zapewnieniu bezpieczeństwa w lotnictwie, ale mogą być pomocne podczas analizy danych na temat bezpieczeństwa w ruchu lotniczym.

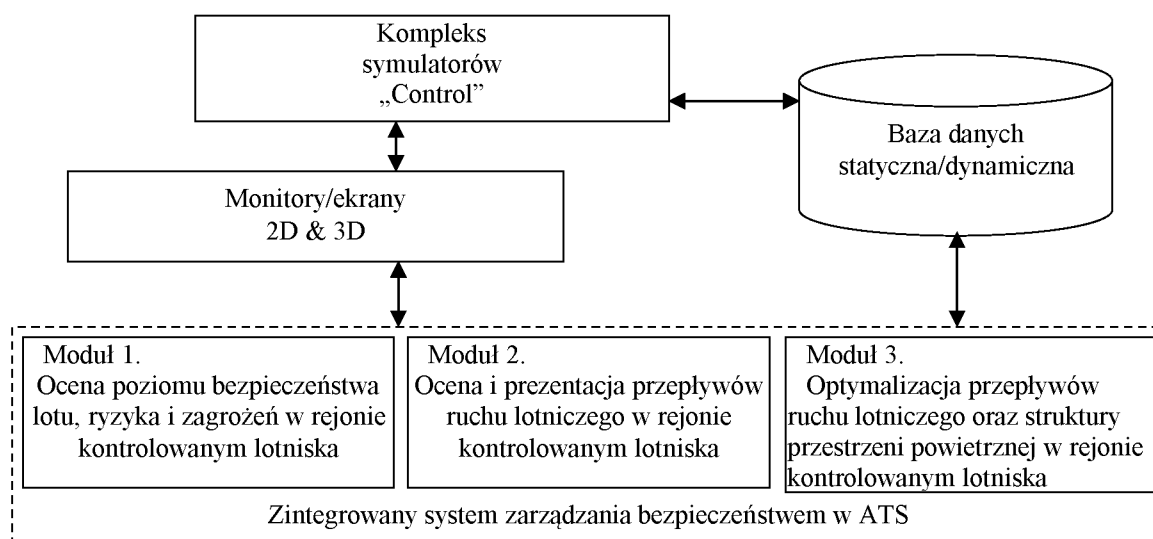
Narzędzia ogólnej analizy danych. Skuteczna obsługa danych wymaga stworzenia odpowiednich baz danych. To z kolei wiąże się z zastosowaniem skutecznych narzędzi umożliwiających budowę baz, a także wyszukiwanie i przetwarzanie danych. Ułatwiają one wykrywanie potencjalnych zależności i trendów. Jedynym powodem stworzenia osobnej kategorii takich narzędzi jest fakt, że niektóre z metod i rozwiązań wykorzystywanych przez te narzędzia sprawiają, iż nie można ich zaliczyć do żadnej innej klasy.

Przedstawione przykładowe systemy i narzędzia oferują pełny zakres możliwości wsparcia analizy bezpieczeństwa ruchu lotniczego. Ich skuteczne wykorzystanie wymaga jednak odpowiednich umiejętności i znajomości procedur zarządzania ruchem lotniczym, a także dostępu do potrzebnych danych.

1.4.3. Opis zintegrowanego systemu zarządzania bezpieczeństwem w służbach ruchu lotniczego

Zintegrowany SMS w ATS funkcjonuje w środowisku kompleksu symulatorów „Control” jako zestaw zewnętrznych/niezależnych modułów (ilustracja 1.11).

Kompleks symulatorów „Control” został stworzony, by umożliwić szkolenie studentów w zakresie działania takich jednostek jak wieża kontroli lotów oraz centrum kontroli rejonu podejścia oraz rejonu kontrolowanego lotniska. Kompleks symulatorów „Control” zawiera stanowiska robocze dla administratorów/badaczy oraz inne stanowiska dla użytkowników, centralny serwer, wyposażenie sieciowe oraz system monitorów (obejmujący projektory i ekrany panoramiczne).



Ilustracja 1.11. Zintegrowany SMS w ATS w środowisku kompleksu symulatorów „Control” [48]

Kompleks symulatorów „Control” umożliwia:

- tworzenie modeli przestrzeni powietrznej o określonej wielkości i charakterystyce;
- działanie w trybie procesowym, modułowym oraz operacyjnym;
- prowadzenie łączności radiowej i przez telefon głośnomówiący;
- generowanie przepływów ruchu o wymaganej gęstości/intensywności, sytuacji konfliktowych oraz innych parametrów;
- symulację dowolnych warunków meteorologicznych w analizowanej strefie kontroli lotów.

Innym ważnym elementem kompleksu symulatorów „Control” jest trójwymiarowy ekran wyświetlający obraz obszaru manewrowego płyty lotniska (ilustracja 1.12), który wykorzystywany jest w różnych modułach SMS w ATS do wstępnej, wzrokowej oceny ryzyka i zagrożeń na płycie lotniska i w jej okolicy.



Ilustracja 1.12. Ekran 3D wyświetlający obraz obszaru manewrowego na płycie lotniska [48]

Obraz 3D obszaru manewrowego płyty lotniska generowany w kompleksie symulatorów „Control” przedstawia układ płyty, infrastrukturę, budynki, urządzenia, obiekty statyczne i ruchome, statki powietrzne, pojazdy i personel oraz warunki meteorologiczne.

Wszystkie te elementy są niezwykle istotne dla ekspertów oceniających poziom bezpieczeństwa lotu na płycie lotniska i w jej okolicy.

Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem w służbach ruchu lotniczego, wykorzystywany w kompleksie symulatorów „Control”, obejmuje następujące moduły:

Moduł 1 – moduł oceny poziomu bezpieczeństwa lotu, ryzyka i zagrożeń w rejonie kontrolowanym lotniska;

Moduł 2 – moduł oceny i prezentacji przepływów ruchu lotniczego w rejonie kontrolowanym lotniska;

Moduł 3 – moduł optymalizacji przepływów ruchu powietrznego oraz struktury przestrzeni powietrznej w rejonie kontrolowanym lotniska.

Przyjrzyjmy się krótkiemu opisowi zasad działania wszystkich modułów zintegrowanego SMS w ATS.

Funkcjonalne zadania modułu oceny poziomu bezpieczeństwa lotu, ryzyka i zagrożeń w rejonie kontrolowanym lotniska obejmują:

- proaktywne poszukiwanie ukrytych warunków, obszarów problemowych oraz innych źródeł potencjalnych incydentów i wypadków;

- ocenę wykrytych zagrożeń i ryzyka na podstawie przyjętej ustandaryzowanej metodologii;

- szczegółową ocenę jakościową oraz analizę wskaźników określających rzeczywisty poziom bezpieczeństwa lotu w wyznaczonym rejonie kontrolowanym lotniska;

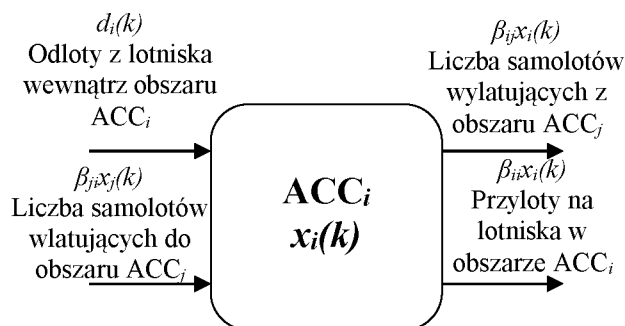
- ocenę wzajemnych relacji pomiędzy głównymi czynnikami bezpieczeństwa oraz analizę bezpośredniego wpływu poszczególnych kategorii czynników na ogólny poziom bezpieczeństwa lotu.

Funkcjonalne zadania modułu oceny i prezentacji przepływów ruchu lotniczego w rejonie kontrolowanym lotniska obejmują:

- gromadzenie i wstępne przetwarzania danych statystycznych na temat przepływów ruchu lotniczego zgodnie z ustandaryzowaną metodologią;

- tworzenie podsumowań (raportów) na temat przepływów ruchu lotniczego na podstawie parametrów i filtrów zastosowanych przez użytkownika;
- wstępną analizę parametrów przepływu ruchu lotniczego w rejonie kontrolowanym lotniska, stanowiącą podstawę dalszych udoskonaleń;
- zadania na poziomie taktycznym, obejmujące optymalizację trajektorii lotu statków powietrznych w trybie czasu rzeczywistego (a także projektowanie krótszych tras, tras obejścia itd.).

W module tym wykorzystywany jest liniowy model dynamiczny ruchu lotniczego (ilustracja 1.13). Model ten ułatwia przewidywanie wielkości ruchu, czyli liczby statków powietrznych przelatujących przez dany obszar kontrolowany.



Ilustracja 1.1. Składniki przepływu ruchu lotniczego w obszarze kontrolowanym przez dany ACC – (ośrodek kontroli obszaru) [48]

Prognozowaną na podstawie modelu wielkość ruchu, będącą miernikiem przyszłego popytu, można zrównoważyć za pomocą umiejętnego zarządzania przepływem ruchu lotniczego.

Funkcjonalne zadania modułu optymalizacji przepływów ruchu lotniczego oraz struktury przestrzeni powietrznej w rejonie kontrolowanym lotniska obejmują:

- optymalizację struktur przestrzeni powietrznej, sieci tras przelotów oraz standardowych tras startu/ładowania, zgodnie ze statystyką przepływów ruchu lotniczego oraz ilościową oceną poziomu bezpieczeństwa lotu;
- doskonalenie struktury przestrzeni powietrznej skierowane na zwiększanie przepustowości i podnoszenie poziomu bezpieczeństwa lotu;
- zarządzanie bezpieczeństwem poprzez wdrażanie strategii kontroli/łagodzenia ryzyka;
- zadania na poziomie strategicznym, obejmujące planowanie długookresowe skierowane na doskonalenie sieci połączeń, zwiększanie przepustowości struktur przestrzeni powietrznej oraz optymalizację głównych przepływów ruchu lotniczego w regionie (w tym również koordynacja cywilno-wojskowa, elastyczne wykorzystanie przestrzeni powietrznej, scenariusze wykorzystania przestrzeni powietrznej itd.).

Zintegrowany system zarządzania bezpieczeństwem przez służby żeglugi powietrznej ma pomóc dostawcom usług lotniczych w rozwiązywaniu złożonych problemów związanych z bezpieczeństwem lotu oraz przepływami ruchu lotniczego w rejonach wokół lotnisk i innych obszarach kontrolowanych. Dalsze prace w tym zakresie będą związane z doskonaleniem poszczególnych modułów i gromadzeniem informacji zwrotnych od użytkowników systemu. Niezbędne będą również dodatkowe badania, umożliwiające stałe uzupełnianie bazy danych scenariuszy poprzez dodawanie kolejnych typów sytuacji nadzwyczajnych, jakie mogą wystąpić na obszarze manewrowym płyty lotniska oraz w przestrzeni powietrznej w rejonie lotniska i w innych

obszarach kontrolowanych [48].

2. Zarządzanie żeglugą powietrzną, jej możliwości i efektywność

Jednym z najważniejszych elementów zarządzania transportem lotniczym jest zarządzanie ruchem lotniczym (Air Traffic Management, ATM). ATM, będące połączeniem działań systemów kontroli lotów (Air Traffic Control, ATC), zarządzania portami lotniczymi i współpracy różnych systemów pokładowych, jest niezbędnym czynnikiem efektywnych i bezpiecznych operacji transportowych.

Drugi spośród celów strategicznych ICAO na lata 2014–2016 dotyczy możliwości, przepustowości i efektywności żeglugi powietrznej. Cel ten obejmuje następujące zadania:

- zwiększenie możliwości i przepustowości,
- poprawę efektywności światowego systemu lotnictwa cywilnego.

Choć funkcjonalnie i organizacyjnie cel ten połączony jest z zapewnieniem bezpieczeństwa, to jednak przede wszystkim skupia się on na modernizacji infrastruktury nawigacyjnej i lotniskowej, a także na tworzeniu nowych procedur umożliwiających optymalizację działań i wyników sektora lotniczego. Kluczowe działania w tym zakresie zawarte zostały w światowym planie poprawy możliwości (przepustowości) i efektywności żeglugi powietrznej (planie światowym) na następne 3-lecie [3].

Główne polityki Unii Europejskiej w tej kwestii to inicjatywa jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej (Single European Sky) i jej uzupełnienie – pakiet Single European Sky II. Jest to grupa regulacji ustanawiających wspólne wymogi dotyczące eksploatacji i interoperacyjności systemów, skierowanych na przewyższanie problemów, takich jak niewystarczająca przepustowość, zagrożenia bezpieczeństwa, wpływ na środowisko i rosnące koszty operacyjne. Ich skuteczne wdrożenie, w połączeniu z wykorzystaniem nowoczesnych technologii komunikacyjnych, takich jak globalne systemy nawigacji satelitarnej, umożliwi poprawę organizacji ruchu lotniczego i lepsze wykorzystanie statków powietrznych, stworzy możliwości znaczącej poprawy efektywności i poziomu bezpieczeństwa podróży lotniczych [57].

Uwzględniając znaczenie tego kierunku badań naukowych dla przewyższania wyzwań związanych z efektywnością, bezpieczeństwem i regularnością światowego lotnictwa cywilnego, w niniejszym rozdziale przedstawimy materiały analityczne, podejścia teoretyczne oraz oryginalne modele matematyczne dotyczące rozmaitych aspektów zarządzania żeglugą powietrzną. Omówimy w nim następujące tematy:

- *Zarządzanie żeglugą powietrzną w Europie;*
- *Satelitarne systemy zapobiegania zderzeniom;*
- *Modele i technologie zarządzania żeglugą powietrzną;*
- *Czynnik ludzki w zarządzaniu żeglugą powietrzną.*

2.1. Zarządzanie żeglugą powietrzną w Europie

2.1.1 Zasady wdrożenia programu jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej

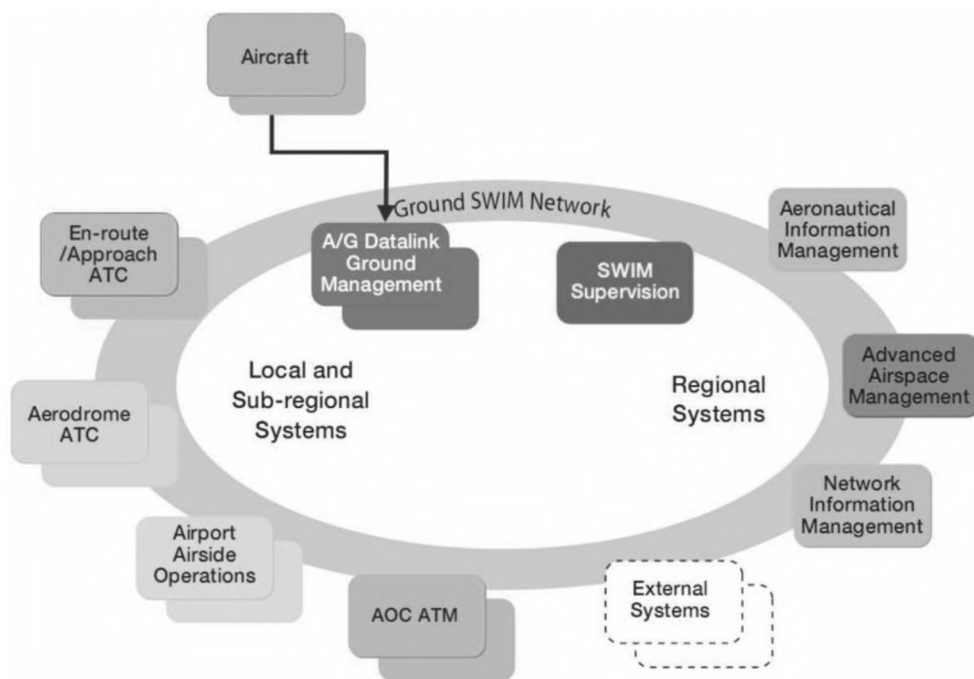
SESAR to program modernizacji europejskiego systemu zarządzania ruchem lotniczym (EATM) [1]. Łączy aspekty technologiczne, regulacyjne oraz ekonomiczne i wykorzystuje legislację jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej (SES), by synchronizować plany oraz działania różnych

interesariuszy, umożliwiając wspólne wykorzystanie zasobów do przygotowania i wdrożenia programu działań na okres pierwszych 6 lat fazy opracowywania programu.

Trwająca 2 lata faza planowania SESAR podzielona była na 6 głównych etapów (*milestone deliverables*), obejmujących wszystkie aspekty przyszłego europejskiego systemu ATM, a także zasady jego wsparcia instytucjonalnego:

- D1: Ramy transportu lotniczego – obecna sytuacja [49];
- D2: Ramy transportu lotniczego – wynik docelowy [50];
- D3: Określenie docelowej koncepcji ATM [51];
- D4: Wybór najlepszego scenariusza wdrożenia [52];
- D5: Opracowanie planu głównego ATM (ATM Master Plan) [53];
- D6: Plan pracy na lata 2008–2013 [54]. Modernizacja zarówno systemów powietrznych, jak i naziemnych (ilustracja 2.1).

Pierwsza faza programu SESAR, faza planowania, była współfinansowana przez EUROCONTROL i Komisję Europejską z budżetu Transeuropejskich Sieci Transportowych. Doprowadziła do opracowania planu głównego ATM, który powstał we współpracy z wieloma podmiotami branży lotniczej, przy wsparciu ekspertów EUROCONTROL.



Aircraft	Statki powietrzne
A/G Datalink ground management	Naziemne zarządzanie transmisją danych powietrze–ziemia
Ground SWIM network	Naziemna sieć SWIM
SWIM Supervision	Nadzór SWIM
Aeronautical Information Management	Zarządzanie informacjami lotniczymi
Regional systems	Systemy regionalne
Advanced Airspace Management	Zaawansowane zarządzanie przestrzenią powietrzną
Network Information Management	Zarządzanie informacjami sieciowymi
External systems	Systemy zewnętrzne
AOC ATM	AOC ATM
Airport Airside Operations	Działania w strefie operacyjnej lotniska
Aerodrome ATC	Kontrola lotów w rejonie lotniska
En-route/ approach ATC	Kontrola lotów podczas podejścia/przelotu
Local and sub-regional systems	Systemy lokalne i regionalne

Ilustracja 2.1. Architektura techniczna programu SESAR [58]

Konsorcjum SESAR, powołane do przeprowadzenia analiz w ramach fazy planowania, połączyło po raz pierwszy w historii europejskiego zarządzania ruchem lotniczym wszystkich głównych interesariuszy sektora lotniczego w celu opracowania wspólnego planu głównego ATM. Dzięki temu konsorcjum może skorzystać z wiedzy wielu ekspertów działających w branży.

Są wśród nich:

- użytkownicy przestrzeni powietrznej;
- instytucje zapewniające służby żeglugi powietrznej (Air Navigation Service Providers, ANSPs);
- operatorzy portów lotniczych;
- dostawcy sprzętu i wyposażenia (europejscy i pozaeuropejscy);

oraz wielu partnerów stowarzyszonych, takich jak regulatory bezpieczeństwa, organizacje wojskowe, stowarzyszenia zawodowe (w tym związki zawodowe pilotów, kontrolerów lotniczych i pracowników technicznych), oraz ośrodki badawcze, wspierające EUROCONTROL swoją wiedzą i doświadczeniem.

Plan główny europejskiego systemu ATM

Faza planowania programu SESAR doprowadziła do opracowania planu głównego europejskiego systemu ATM (European ATM Master Plan; ilustracja 2.2), który będzie kształtował przyszłość zarządzania ruchem lotniczym w Europie przez najbliższe dziesięciolecie.

Plan główny europejskiego systemu ATM [53, 55–57] określa przyszłość zarządzania ruchem lotniczym w Europie w ciągu najbliższych kilkunastu lat i stanowi podstawę dalszych prac w programie SESAR. Jest to plan „kroczący”, który będzie regularnie aktualizowany, na podstawie wyników działań badawczo-rozwojowych podejmowanych w ramach programu.

Wdrożenie planu głównego europejskiego ATM oraz pakietu SES II doprowadzi do poprawy wydajności systemu ATM w Europie.

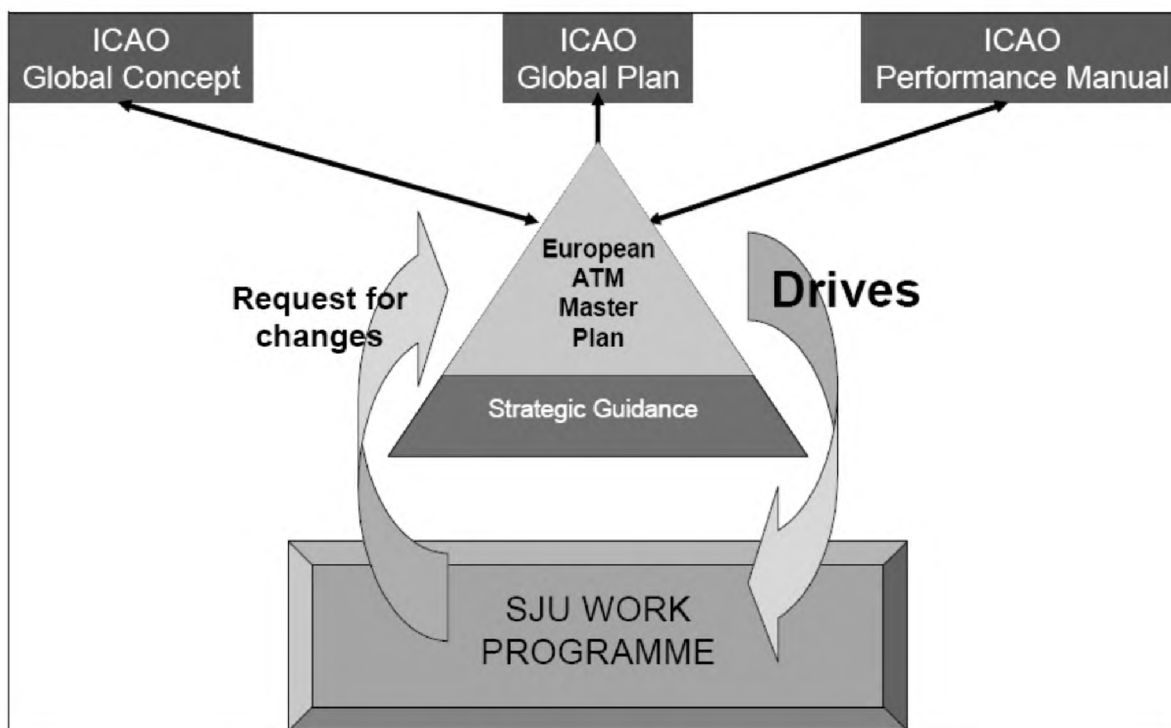
Plan główny europejskiego systemu ATM zawiera mapy drogowe działań badawczo-rozwojowych w zakresie ewolucji operacyjnej oraz tworzenia i wdrażania czynników rozwojowych (np. w zakresie bezpieczeństwa lub ochrony środowiska), służących realizacji wspólnego celu wprowadzenia docelowej koncepcji funkcjonowania systemu ATM w Europie.

Niezwykle istotną kwestią jest terminowe i pełne wdrożenie kluczowych składników tej koncepcji na poziomie ogólnoeuropejskim, bo to ono zapewnia pełne korzyści całego systemu.

Program wykorzystuje koncepcję poziomów przepustowości i usług ATM jako ogólnosystemową podstawę wyznaczania parametrów i wskaźników wydajności wspólnych dla wszystkich składników przyszłego europejskiego systemu ATM.

Dla poszczególnych poziomów usług ATM ustalono określone wartości tych wskaźników i parametrów, wyższe na każdym kolejnym poziomie.

ICAO Global Concept	Globalna koncepcja ICAO
ICAO Global Plan	Globalny plan ICAO
ICAO Performance Manual	Podręcznik działań ICAO
Request for changes	Konieczność zmian
European ATM Master Plan	Plan główny europejskiego systemu ATM
Strategic Guidance	Wytoczne strategiczne
Drives	Czynniki rozwojowe
SJU Work Programme	Program roboczy SESAR



Ilustracja 2.2. Plan główny europejskiego systemu ATM [58]

Wdrożenie koncepcji docelowej SESAR

Konsorcjum SESAR dąży do wdrożenia kolejnych kroków określonych w perspektywie krótkookresowej i rekomenduje rozpoczęcie działań rozwojowych i weryfikacyjnych zgodnie z proponowanym planem transformacji.

Pozwoli to na modernizację systemu ATM, a także umożliwi bezpieczny rozwój europejskiej branży transportu lotniczego, a tym samym przyczyni się do wzrostu całej europejskiej gospodarki. Dodatkowo wiele z proponowanych usprawnień operacyjnych systemu ATM pozwoli ograniczyć negatywny wpływ działań lotniczych na środowisko naturalne. Bez programu SESAR rosnące zatłoczenie całego systemu mogłoby doprowadzić do istotnego spadku efektywności operacji lotniczych i utrzymania ich niekorzystnego oddziaływania na środowisko.

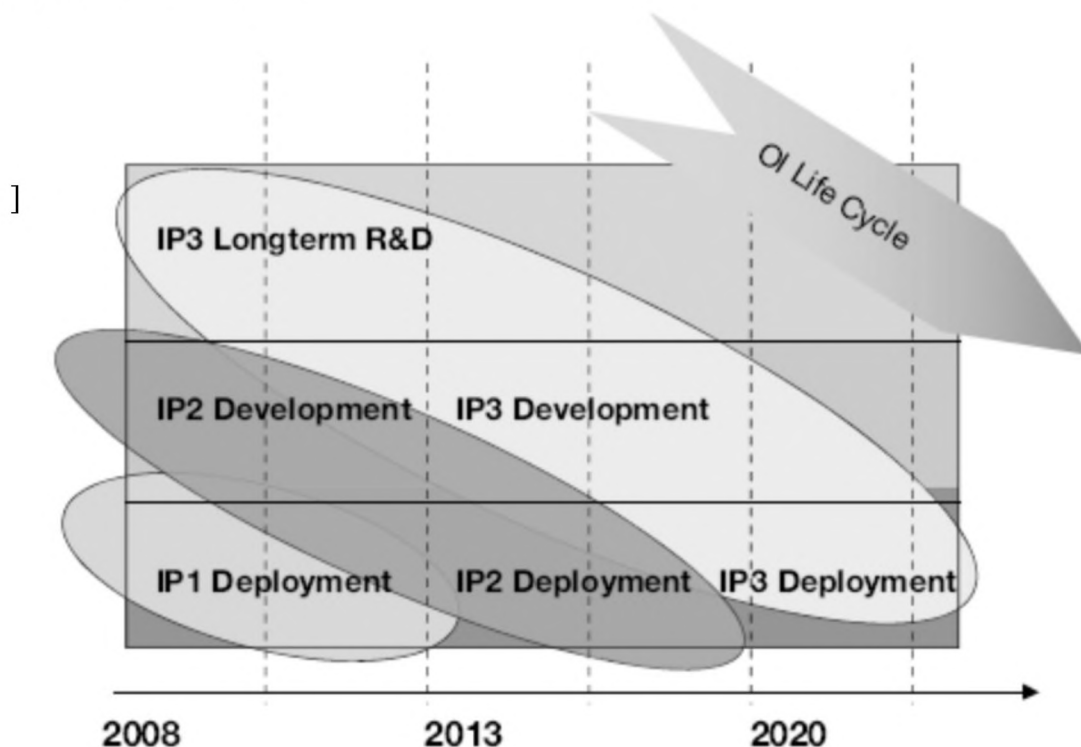
Określenie kolejności wdrożenia umożliwia dopracowanie szczegółów pakietów implementacyjnych, koniecznych dla przeprowadzenia transformacji i realizacji ogólnego celu długoterminowego, których użyteczność przeanalizowano pod kątem ulepszenia systemu – w zakresie operacji, architektury oraz technologii łączności i dozoru żeglugi powietrznej. Program wdrożenia uwzględnia i obejmuje również systemowe zarządzanie wszystkimi istotnymi aspektami sieci ATM: prawnym, instytucjonalnym, bezpieczeństwa, działań ludzkich, ochrony czy środowiska, a także zawiera mapy drogowe rozwoju wszystkich tych elementów.

Programem wdrożenia obejmowane są również wszystkie bieżące inicjatywy, które pasują do zakresu całego przedsięwzięcia i wspierają realizację docelowej koncepcji ATM, planowaną na 2020 r., lub mogą być jej uzupełnieniem.

Konkretne szczegółowe zmiany konieczne do skutecznej transformacji od obecnego systemu do stanu docelowego zostały ułożone w serię udoskonaleń operacyjnych (*operational improvements*, OI), wprowadzanych w całym okresie trwania programu.

Udoskonalenia operacyjne wprowadzane są w ramach kolejnych pakietów wdrożeniowych (IPs), w kolejności zgodnej z ustalonym programem wdrożenia (ilustracja 2.3):

- IP1 – od 2008 do 2013 r. – „Budowa fundamentów” z wykorzystaniem bieżących inicjatyw podejmowanych w europejskim systemie ATM, które przyczyniają się do poprawy możliwości i przepustowości oraz wspierają realizację koncepcji docelowej ATM;
- IP2 – od 2013 do 2020 r. – „Przyspieszenie transformacji w celu wdrożenia docelowej koncepcji ATM na rok 2020”, poprzez terminowe wprowadzanie wszystkich działań niezbędnych do osiągnięcia celów na 2020 r.;



Ol Life cycle	Cykl życia udoskonaleń operacyjnych
IP3 Longterm R&D	Długookresowe prace badawczo-rozwojowe IP3
IP2 Development	Przygotowanie IP2
IP3 Development	Przygotowanie IP3
IP1 Deployment	Wdrożenie IP1
IP2 Deployment	Wdrożenie IP2
IP3 Deployment	Wdrożenie IP3

Ilustracja 2.3. Oś czasu wprowadzania pakietów wdrożeniowych [58]

- IP3 – po 2020 r. – „Realizacja długookresowych celów SESAR” obejmująca działania niezbędne do dalszego doskonalenia i poprawy wydajności całego systemu zarządzania ruchem lotniczym po 2020 r., służące pełnej realizacji koncepcji docelowej ATM.

Realizacja celów programu SESAR związanych z efektywnością

Wprowadzenie pakietu wdrożeniowego nr 2 pozwoli stworzyć szersze środowisko wymiany informacji, które z kolei będzie czynnikiem wspierającym zwiększanie efektywności całej sieci ATM. Najważniejsze korzyści bezpośrednie takiego środowiska to:

- poprawa efektywności kosztowej i wydajności sieci, dzięki udoskonaleniu procesu zarządzania trajektoriami lotów;

- dostępność dokładniejszych danych meteorologicznych (dostarczanych automatycznie przez poszczególne statki powietrzne), które ułatwią planowanie trajektorii lotów i zarządzanie nimi;
- elastyczność operacyjna zarówno cywilnych, jak i wojskowych użytkowników przestrzeni powietrznej, możliwa dzięki systemowi dynamicznej wymiany informacji, pozwalającemu na znacznie lepsze reagowanie na wojskowe wymagania dotyczące przestrzeni powietrznej (czasowe i przestrzenne).

Tabela 2.1 przedstawia w sposób syntetyczny ocenę i szacunki różnych parametrów efektywności dla poszczególnych pakietów wdrożeniowych. Eksperti prowadzący ten proces pamiętali o konieczności zachowania równowagi między ilością obsługiwanych połączeń a dopuszczalnym opóźnieniem. W rezultacie w 2020 r., po wprowadzeniu IP1 i IP2, system ATM będzie mógł obsłużyć 15,8 mln operacji, przy średnim opóźnieniu 1,2 min na lot i zwiększonej efektywności paliwowej (odpowiadającej zmniejszeniu zużycia paliwa o 2,9% w porównaniu z bazowym 2007 r.).

Tabela 2.1. Synteza oceny parametrów SESAR [58]

Benefit Component		2007	2012	2020
			IP1	IP1 + IP2
Flight / Traffic	M Fl. per y.			
Demand Accommodated	M Fl. per y.	10	12.6	15.8
QoS - Delays				
Total delays	Min. per fl.	2	1.3	1.2
En Route delays	Min. per fl.	1.1	0.9	0.7
Airport delays	Min. per fl.	0.9	0.4	0.5
QoS - Fuel				
Fuel In-efficiency	% total fuel	11.7 %	10.6 %	8.8 %

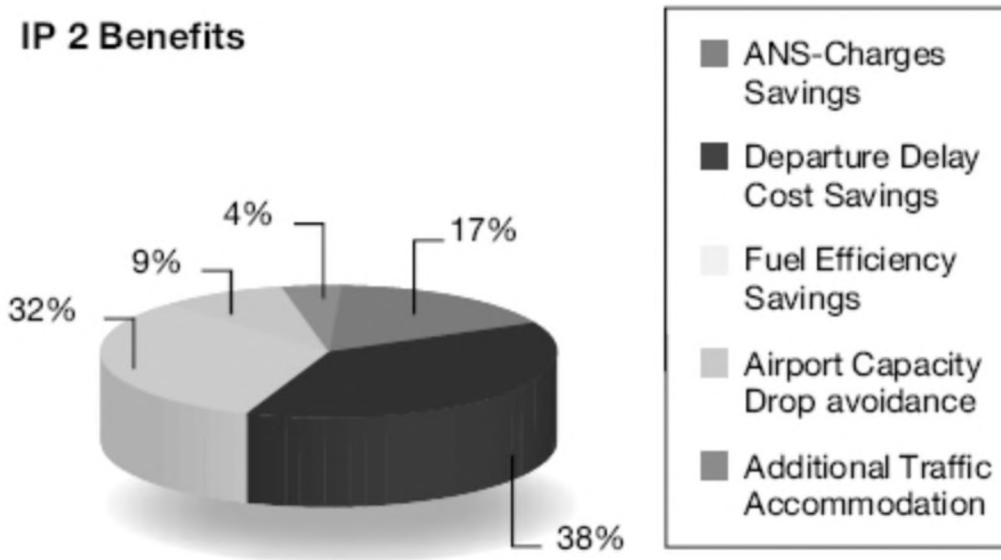
Składnik korzyści		2007	2012	2020
			IP1	IP1 + IP2
Loty/ruch	mln lotów rocznie			
Obsłużone operacje	mln lotów rocznie	10	12,6	15,8
Jakość usług – opóźnienia				
Opóźnienia łącznie	min na lot	2	1,3	1,2
Opóźnienia w locie	min na lot	1,1	0,9	0,7
Opóźnienia na lotnisku	min na lot	0,9	0,4	0,5
Jakość usług – paliwo				
Nieefektywność paliwowa	% całego paliwa	11,7%	10,6%	8,8%

Terminowe i zsynchronizowane wdrożenie pełnego zakresu efektywnych naziemnych usług zarządzania ruchem lotniczym oraz narzędzi umożliwiających wykorzystanie inwestycji powietrznych to główne czynniki wpływające na analizę kosztów i korzyści (Cost Benefit Analysis, CBA). Najważniejsze korzyści uwzględnione w tej analizie to:

- większa liczba obsługiwanych operacji;
- zmniejszenie opóźnień;

- zwiększenie efektywności paliwowej;
- utrzymanie przepustowości lotnisk w warunkach ograniczonej widoczności;
- redukcja kosztów jednostkowych operacji służb zarządzania ruchem lotniczym.

Ocena parametrów efektywności została wyrażona w formie pieniężnej, jako procentowa zmiana kosztów w przeliczeniu na każdy lot. Bilans korzyści wprowadzenia IP2 przedstawia ilustracja 2.4.



Korzyści pakietu IP2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oszczędności na opłatach dla służb żeglugi powietrznej ▪ Redukcja kosztów wynikających z opóźnień odlotów ▪ Oszczędności wynikające ze zwiększenia efektywności paliwowej ▪ Utrzymanie przepustowości lotnisk ▪ Obsługa większej liczby połączeń
-----------------------------	--

Ilustracja 2.4. Korzyści z wprowadzenia pakietu IP2 [58]

Aspekty wdrożenia programu SESAR na Ukrainie

Ukraina powinna podjąć odpowiednie kroki, by dołączyć do działań w ramach programu SESAR:

- badania naukowe związane z programem SESAR (procedury operacyjne, przepustowość systemu lotniczego, niezawodność działania systemu, czynnik ludzki w nowych warunkach, efektywność i regularność transportu lotniczego oraz ergonomia w miejscu pracy);
- analiza rozwiązań ukraińskich odnoszących się do etapowego wdrożenia programu SESAR w kraju (obszar transformacji, cechy separacji itd.);
- budowa i instalacja wyposażenia zgodnego ze specyfikacją programu SESAR;
- opracowanie procedur operacyjnych dla personelu lotniczego do pracy w nowym środowisku zawodowym;
- opracowanie długookresowego planu wdrożenia programu SESAR na Ukrainie;
- przygotowanie programów szkoleniowych dla personelu lotniczego, zgodnie z wymaganiami programu SESAR;

- uczestnictwo we wspólnym przedsięwzięciu SESAR oraz innych grupach regionalnych w celu reprezentowania stanowiska Ukrainy i aktualizacja przepisów krajowych oraz innych regulacji zgodnie z wymaganiami programu SESAR.

Służby żeglugi powietrznej oraz ich systemy wsparcia nie są w pełni zintegrowane i wykorzystują technologie, które już dziś działają na granicy swoich możliwości. Dlatego by móc realizować przyszłe potrzeby ruchu lotniczego, w kraju konieczna jest całkowita „zmiana paradygmatu” i wprowadzenie nowoczesnych innowacyjnych rozwiązań technologicznych.

Celem SESAR jest odejście od rozdrobnionego podejścia do zarządzania ruchem lotniczym w krajach europejskich, transformacja systemu, synchronizacja działań wszystkich interesariuszy i wspólne wykorzystanie dostępnych zasobów.

Dzięki odpowiedniemu wsparciu i środkom regulacyjnym program SESAR pozwoli zrekonstruować europejską sieć ATM, zapewniając jej zrównowagony rozwój, efektywność, pełną integrację oraz efektywność kosztową, umożliwiające osiągnięcie maksymalnego bezpieczeństwa.

Kolejne 8 lat rozwoju programu to faza, której celem jest stworzenie odpowiednich technologii, standardów oraz procedur służących realizacji długookresowych celów SESAR, którymi są:

- potrojenie obecnej przepustowości sieci, przy jednoczesnej redukcji kosztów ATM o połowę;

- 10-krotna poprawa poziomu bezpieczeństwa;

- zmniejszenie wpływu środowiskowego każdego lotu o 10%.

Podczas spotkania regionalnego na wysokim szczeblu, które odbyło się w Kijowie 25 i 26 czerwca 2009 r., przedstawiciele władz lotniczych, instytucji zapewniających służby żeglugi powietrznej oraz branży lotniczej z krajów członkowskich EUROCONTROL wskazali potrzebę wspólnego przygotowania wszechstronnego programu, umożliwiającego zbudowanie mocy i możliwości potrzebnych do zintegrowania lokalnych systemów w jednolitą europejską przestrzeń powietrzną.

W kontekście SESAR, jako składnika technologicznego jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej, uczestnicy spotkania uzgodnili listę konkretnych działań, które umożliwiłyby udział w tym przedsięwzięciu wszystkim krajom regionu.

Takie podejście pozwoli wyodrębnić obszar objęty transformacją, obejmujący również kraje spoza UE, dając im możliwość stopniowego dołączania do procesu budowy wspólnego europejskiego obszaru lotniczego, uwzględniającego specyfikę całego regionu. Uczestnicy spotkania zdecydowali o podjęciu następujących działań:

- ustanowienia w ramach programu SESAR interfejsu ułatwiającego udział w nim krajów spoza Unii Europejskiej;

- rozpoczęcia procesu konsultacji z krajami spoza UE będącymi członkami EUROCONTROL, by zapewnić paneuropejski wymiar programu jednolitej przestrzeni powietrznej;

- stworzenia równych szans uczestnictwa w procesie zamówień w ramach programu SESAR dla podmiotów spoza UE [58].

2.1.2. Koncepcja zarządzania przepływem i przepustowością ruchu lotniczego w regionie europejskim

Ogólna analiza wyników systemu lotnictwa w Europie, w szerszym kontekście ruchu lotniczego realizowanego zgodnie z przepisami regulującymi loty wykonywane według wskazań przyrządów (Instrument Flight Rules, IFR), wskazuje następujące trendy najważniejszych

parametrów efektywności programu jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej:

– *Przepustowość/ opóźnienia*: punktualność przylotów poprawiła się znacząco w 2011 r. (–6,2%), osiągając poziom podobny jak w 2009 r., wraz z późniejszym pozytywnym wpływem na całą sieć europejską. Służby żeglugi powietrznej przyczyniły się do tej sytuacji poprzez znaczącą redukcję opóźnień związanych z zarządzaniem ruchem lotniczym (–35%), a przede wszystkim zmniejszenie opóźnień w fazie przelotu (–42%) w 2011 r.

– *Efektywność kosztowa*: wszystkie opłaty za korzystanie ze służb żeglugi powietrznej (ANS) stanowiły w sumie ok. 6,2% łącznych kosztów operacyjnych europejskich przewoźników lotniczych. Pomimo prognozowanego wzrostu całkowitych kosztów działania służb żeglugi powietrznej o +1,8% koszty jednostkowe w Europie zmniejszyły się zauważalnie, dzięki zwiększeniu natężenia ruchu (+3,1%). Koszty korzystania ze służb żeglugi powietrznej w fazie przelotu, stanowiące ok. 80% wszystkich kosztów związanych z korzystaniem z ANS, mają według prognoz zwiększyć się w 2011 r. o +2,3%, podczas gdy koszty korzystania z ANS w rejonie lotnisk mają się obniżyć o –0,7%.

Statystyki i prognozy przepływu ruchu lotniczego w regionie europejskim

Średniookresowa prognoza EUROCONTROL – wynik niekorzystnych obecnie perspektyw gospodarczych, zakładających stagnację lub niski wzrost, oraz bieżącego natężenia ruchu. W ciągu pozostałych lat objętych prognozą przewidywane natężenie ruchu ma wzrosnąć od 1,1 do 3,6% rocznie [59].

Odzwierciedla to jednak długookresowy trend wzrostu, który według prognoz ma być niższy niż w przeszłości. Po 2016 r. wzrost natężenia ruchu w Europie ustabilizuje się na poziomie 2,6% rocznie. Wynik ten może być nieco lepszy w latach 2016 i 2020 ze względu na zwiększenie ruchu typowe w latach przestępnych. Zgodnie z prognozą natężenie ruchu wzrośnie ponownie do swojego szczytowego poziomu z 2008 r. (10,1 mln lotów) dopiero w 2017 r., czyli o rok później niż przewidywały prognozy z września 2014 r. W pierwszej części okresu objętego prognozą (lata 2016–2018) roczny wskaźnik wzrostu wyniesie 2,8%, przede wszystkim dzięki dodatkowym możliwościom, jakie pojawią się wraz z uruchomieniem trzeciego portu lotniczego w Turcji pod koniec 2017 r., zmniejszającego nieco ograniczenia europejskiej sieci. Jednakże ograniczenia przepustowości zwiększą się znowu w 2019 r., powodując wyrównanie wskaźnika wzrostu na poziomie 2,5% rocznie [59].

Według różnych scenariuszy całkowite natężenie ruchu może w 2021 r. wynieść 12,332 mln lotów – wzrost o 3,6% (prognoza optymistyczna, H), 11,397 mln lotów – wzrost o 2,7% (prognoza pośrednia, B), 10,343 mln lotów – wzrost o 1,1% (prognoza pesymistyczna, L) (tabela 2.2) [59].

Europa jest dziś regionem, w którym notujemy stosunkowo najniższe wzrosty natężenia ruchu, co wynika z bardzo wysokiego poziomu rozwoju branży lotniczej. W skali globalnej zaś (patrz rozdział 1.1) spadek natężenia ruchu lotniczego nie powoduje zmniejszenia zatłoczenia europejskiej przestrzeni powietrznej.

Tabela 2.2. Podsumowanie prognoz dla Europy (ESRA08) [59]

ESRA 08	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	AAG R 2021/2014	RP1 2014/2011 AAG R	RP2 2019/2014 AAG R
Operacje lotnicze IFR (tys.) H					9 834	10 228	10 675	11 089	11 487	11 957	12 332	3,6%		3,6%
B	9 784	9 548	9 477	9 604	9 750	10 039	10 310	10 588	10 852	11 166	11 397	2,5%	–0,6%	2,5%

L	.	.	.	.	9 638	9 8039	9 876	10 001	10 124	10 263	10 343	1,1%	.	1,1%
Wzrost roczny (w porównaniu z rokiem poprzednim) H	.	.	.	.	2,4%	4,0%	4,4%	3,9%	3,6%	4,1%	3,1%	3,6%	.	3,6%
B	3,1%	-2,4%	-1,1%	1,7%	1,5%	3,0%	2,7%	2,7%	2,5%	2,9%	2,1%	2,5%	-0,6%	2,5%
L	.	.	.	.	0,4%	1,7%	0,8%	1,3%	1,2%	1,4%	0,8%	1,1%	.	1,1%

Tabela 2.3 przedstawia szczegółowe prognozy EUROCONTROL dla poszczególnych krajów.

Tabela 2.3. Prognozy EUROCONTROL dotyczące operacji lotniczych IFR (w tysiącach) w poszczególnych krajach europejskich [59]

Kraj, Region, FAB	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	AAGR 2021/2014	RP1 2014/2011 AAGR	RP2 2019/2014 AAGR
Albania H	.	.	.	.	213	233	244	255	266	278	288	5,5%	.	.
B	197	195	201	198	211	229	236	243	251	259	265	4,2%	.	.
L	.	.	.	.	208	221	223	227	230	234	236	2,5%	.	.
Armenia H	.	.	.	.	48	51	55	60	65	70	75	5,9%	.	.
B	197	195	201	198	211	229	236	243	251	259	265	4,2%	.	.
L	.	.	.	.	208	221	223	227	230	234	236	2,5%	.	.
Austria H	.	.	.	.	1 189	1 244	1 300	1 354	1 405	1 460	1 505	3,9%	.	4,0%
B	1 154	1 133	1 114	1 152	1 178	1 219	1 252	1 289	1 322	1 358	1 385	2,7%	-0,1%	2,8%
L	.	.	.	.	1 163	1 187	1 195	1 212	1 226	1 241	1 249	1,2%	.	1,3%
Azerbejdżan H	.	.	.	.	127	134	146	157	169	183	196	6,4%	.	.
B	124	130	129	127	126	130	138	147	156	165	174	4,6%	.	.
L	.	.	.	.	124	126	131	137	142	149	154	2,8%	.	.
Białoruś H	.	.	.	.	266	266	284	300	318	335	351	3,9%	.	.
B	225	240	255	269	258	250	260	270	281	291	300	1,6%	.	.
L	.	.	.	.	249	234	239	243	249	254	258	-0,6%	.	.
Belgia/Luksemburg H	.	.	.	.	1 167	1 208	1 252	1 292	1 329	1 369	1 395	3,0%	.	3,2%
B	1 091	1 089	1 101	1 133	1 160	1 190	1 216	1 243	1 270	1 301	1 322	2,2%	1,2%	2,3%
L	.	.	.	.	1 148	1 167	1 171	1 182	1 193	1 206	1 213	1,0%	.	1,0%
Bośnia-Hercegowina H	.	.	.	.	316	332	350	367	383	401	417	4,9%	.	.
B	276	268	262	298	313	324	335	347	358	370	379	3,5%	.	.
L	.	.	.	.	308	315	318	324	330	335	339	1,8%	.	.
Bulgaria H	.	.	.	.	741	774	827	874	922	975	1 023	5,9%	.	6,2%
B	539	540	551	683	733	756	789	824	856	890	920	4,3%	8,2%	4,6%
L	.	.	.	.	723	733	748	767	786	803	817	2,6%	.	2,8%
Wyspy Kanaryjskie H	.	.	.	.	295	311	326	340	354	369	381	4,3%	.	4,5%
B	298	275	265	284	292	304	311	318	326	333	339	2,6%	-1,6%	2,8%
L	.	.	.	.	289	296	296	299	301	303	303	0,9%	.	1,2%
Chorwacja H	H	.	.	.	.	555	587	618	648	676	708	734	5,1%	5,4%
B	497	495	492	520	550	574	593	612	631	652	668	3,6%	1,5%	4,0%
L	.	.	.	.	542	557	562	572	580	590	595	2,0%	.	2,2%

Cypr H	.	.	.	.	324	354	383	413	443	477	510	7,6%	.	7,8%
B	281	270	277	304	319	342	360	379	399	420	440	5,4%	2,6%	5,6%
L	.	.	.	.	311	324	331	342	352	362	370	2,8%	.	2,9%
Czechy H	.	.	.	.	720	750	790	829	865	906	941	4,3%	.	4,3%
B	695	679	680	700	712	732	756	779	801	826	845	2,7%	0,2%	2,7%
L	.	.	.	.	703	713	720	729	738	748	754	1,1%	.	1,1%
Dania H	.	.	.	.	621	639	661	681	700	727	745	2,7%	.	2,5%
B	625	605	618	619	617	629	642	656	669	685	695	1,7%	-0,3%	1,6%
L	.	.	.	.	611	616	618	623	628	633	635	0,4%	.	0,3%
Estonia H	.	.	.	.	196	200	211	221	232	244	255	4,2%	.	3,9%
B	178	189	183	191	193	193	199	205	211	218	223	2,2%	2,4%	2,0%
L	.	.	.	.	190	187	188	190	193	196	198	0,5%	.	0,2%
Macedonia Pn. H	.	.	.	.	160	170	179	188	197	206	215	5,6%	.	.
B	124	113	113	146	159	166	172	178	184	191	196	4,3%	.	.
L	.	.	.	.	156	161	163	166	169	173	175	2,6%	.	.
Finlandia H	.	.	.	.	248	254	263	272	280	291	299	2,7%	.	2,5%
B	267	252	243	248	245	248	252	256	261	266	269	1,2%	-2,5%	1,0%
L	.	.	.	.	243	242	241	242	243	244	244	-0,2%	.	-0,4%
Francja H	.	.	.	.	3 008	3 125	3 236	3 342	3 438	3 544	3 618	3,0%	.	3,1%
B	2 968	2 923	2 902	2 947	2 986	3 073	3 134	3 199	3 265	3 347	3 401	2,1%	-0,2%	2,1%
L	.	.	.	.	2 948	3 000	3 002	3 021	3 043	3 076	3 090	0,7%	.	0,6%
Gruzja H	.	.	.	.	116	122	134	145	157	169	182	6,6%	.	.
B	.	.	.	116	122	134	145	157	169	182	182	6,6%	.	.
L	.	.	.	116	122	134	145	157	169	182	182	6,6%	.	.
Niemcy H	.	.	.	.	3 083	3 195	3 309	3 416	3 514	3 627	3 709	2,9%	.	3,0%
B	3 078	3 018	2 990	3 030	3 059	3 142	3 208	3 274	3 338	3 412	3 459	1,9%	-0,5%	2,0%
L	.	.	.	.	3 027	3 076	3 087	3 109	3 134	3 162	3 173	0,7%	.	0,7%
Grecja H	.	.	.	.	756	808	850	893	936	984	1 028	6,1%	.	6,7%
B	656	633	623	678	749	792	818	848	878	910	938	4,8%	1,1%	2,0%
L	.	.	.	.	738	766	775	790	805	821	834	3,0%	.	0,7
Węgry H	.	.	.	.	719	760	805	846	887	935	975	5,5%	.	5,8%
B	617	589	600	670	713	744	771	799	826	855	879	4,0%	2,8%	4,3%
L	.	.	.	.	704	725	734	748	762	775	785	2,3%	.	2,6%
Islandia H	.	.	.	.	150	157	164	171	179	189	198	4,5%	.	.
B	111	123	131	145	148	154	158	163	169	175	180	3,1%	.	.
L	.	.	.	.	147	151	153	156	158	162	164	1,8%	.	.
Irlandia H	.	.	.	.	546	568	592	616	641	672	686	3,6%	.	3,6%
B	523	521	522	537	543	560	575	592	609	629	644	2,6%	0,9%	2,6%
L	.	.	.	.	539	552	559	568	578	589	597	1,5%	.	1,5%
Włochy H	.	.	.	.	1 730	1 807	1 890	1 969	2 048	2 132	2 202	3,9%	.	4,0%
B	1 726	1 685	1 648	1 680	1 714	1 769	1 813	1 863	1 911	1 963	2 001	2,5%	-0,9%	2,6%
L	.	.	.	.	1 689	1 717	1 721	1 739	1 756	1 774	1 782	0,9%	.	0,9%
Łotwa H	.	.	.	.	247	253	266	279	292	307	319	4,0%	.	3,8%
B	235	233	236	243	242	242	248	254	261	268	273	1,7%	1,0%	1,5%
L	.	.	.	.	237	233	233	235	237	239	241	-0,1%	.	-0,5%
FIR Lizbona H	.	.	.	.	507	530	554	577	600	624	643	4,3%	.	4,6%
B	450	438	449	480	503	519	531	544	557	571	580	2,7%	2,2%	3,0%
L	.	.	.	.	497	506	507	511	515	519	520	1,2%	.	1,4%
Litwa H	.	.	.	.	263	268	284	298	313	329	342	4,2%	.	4,0%
B	233	236	242	257	257	257	265	273	281	290	296	2,1%	3,3%	1,8%
L	.	.	.	.	251	245	248	250	254	258	260	0,2%	.	-0,2%
Malta H	.	.	.	.	98	110	119	129	139	151	162	6,9%	.	6,4%
B	81	97	109	102	97	107	112	118	124	131	137	4,4%	8,0%	4,1%
L	.	.	.	.	95	103	105	108	111	114	117	2,0%	.	1,7%
Moldawia H	.	.	.	.	29	27	29	31	33	35	35	-6,4%	.	.
B	60	64	74	56	29	27	29	30	32	33	34	-6,8%	.	.
L	.	.	.	.	29	26	27	28	29	29	30	-8,5%	.	.
Maroko	.	.	.	.	381	409	443	480	519	563	607	7,8%	.	.
B	352	324	334	359	377	397	417	438	461	485	507	5,0%	.	.

L	.	.	.	.	372	385	391	401	411	422	430	2,6%	.	.
Niderlandy	.	.	.	.	1 158	1 195	1 236	1 276	1 311	1 360	1 385	2,8%	.	2,9%
B	1 085	1 083	1 109	1 138	1 153	1 183	1 211	1 242	1 268	1 300	1 314	2,1%	1,6%	2,2%
L	.	.	.	.	1 146	1 169	1 179	1 192	1 204	1 219	1 226	1,1%	.	1,1%
Norwegia H	.	.	.	.	603	614	627	636	644	679	692	1,6%	.	0,8%
B	563	587	610	619	599	607	615	624	629	647	654	0,8%	3,2%	0,3%
L	.	.	.	.	595	597	595	597	599	602	600	-0,4%	.	-0,7%
Polska H	.	.	.	.	718	747	791	835	880	928	969	4,7%	.	4,6%
B	655	684	692	702	706	722	750	780	810	840	865	3,0%	2,3%	2,9%
L	.	.	.	.	692	695	704	717	730	743	751	1,0%	.	0,8%
Rumunia H	.	.	.	.	645	674	718	758	799	846	886	5,8%	.	6,0%
B	487	487	513	598	638	658	685	714	741	770	795	4,1%	7,1%	4,4%
L	.	.	.	.	629	638	650	665	681	695	707	2,4%	.	2,6%
FIR Santa Maria H	.	.	.	.	130	135	140	146	151	157	161	3,8%	.	3,9%
B	123	118	121	125	129	134	137	140	144	148	151	2,8%	0,5%	2,9%
L	.	.	.	.	128	131	132	134	135	137	138	1,5%	.	1,7%
Serbia i Czarnogóra H	.	.	.	.	602	642	679	713	747	784	817	5,7%	.	.
B	558	535	518	554	596	629	651	675	698	722	742	4,3%	.	.
L	.	.	.	.	588	609	617	629	641	653	662	2,6%	.	.
Słowacja	.	.	.	.	460	483	513	540	568	599	627	5,3%	.	5,4%
B	382	381	397	436	454	470	488	507	525	544	559	3,6%	4,5%	3,8%
L	.	.	.	.	448	456	462	472	481	489	496	1,8%	.	2,0%
Słowenia	.	.	.	.	366	386	405	423	441	460	476	4,6%	.	4,8%
B	353	346	329	348	362	378	389	401	413	426	436	3,3%	-0,5%	3,5%
L	.	.	.	.	357	367	371	376	382	388	391	1,7%	.	1,9%
Hiszpania H	.	.	.	.	1 666	1 745	1 831	1 913	1 992	2 075	2 142	4,4%	.	4,7%
B	1 665	1 557	1 528	1 587	1 652	1 710	1 760	1 813	1 865	1 921	1 960	3,1%	-1,6%	3,3%
L	.	.	.	.	1 624	1 659	1 670	1 692	1 714	1 737	1 746	1,4%	.	1,5%
Szwecja H	.	.	.	.	739	761	789	816	840	875	899	2,8%	.	2,6%
B	724	724	730	739	733	747	764	782	797	817	830	1,7%	0,7%	1,5%
L	.	.	.	.	726	731	733	741	746	753	755	0,3%	.	0,2%
Szwajcaria H	.	.	.	.	1 056	1 094	1 133	1 170	1 207	1 243	1 272	3,0%	.	3,2%
B	1 063	1 045	1 019	1 033	1 047	1 075	1 098	1 123	1 148	1 175	1 193	2,1%	-0,9%	2,1%
L	.	.	.	.	1 035	1 049	1 052	1 061	1 071	1 080	1 084	0,7%	.	0,7%
Turcja H	.	.	.	.	1 348	1 457	1 606	1 729	1 853	1 987	2 120	7,6%	.	.
B	1 039	1 066	1 142	1 269	1 333	1 420	1 525	1 628	1 719	1 817	1 910	6,0%	.	.
L	.	.	.	.	1 314	1 374	1 434	1 506	1 573	1 632	1 685	4,1%	.	.
Ukraina H	.	.	.	.	135	133	147	163	178	194	211	-5,5%	.	.
B	453	466	494	312	132	128	138	149	160	171	183	-7,4%	.	.
L	.	.	.	.	130	122	128	136	144	151	158	-9,2%	.	.
Wielka Brytania H	.	.	.	.	2 324	2 402	2 484	2 563	2 631	2 740	2 800	3,1%	.	3,0%
B	2 241	2 211	2 225	2 269	2 311	2 370	2 418	2 470	2 521	2 585	2 621	2,1%	0,4%	2,1%
L	.	.	.	.	2 292	2 334	2 348	2 373	2 397	2 429	2 446	1,1%	.	1,1%
ESRA02 H	.	.	.	.	9 742	10 134	10 574	10 980	11 369	11 829	12 196	3,6%	.	.
B	9 641	9 388	9 297	9 495	9 662	9 949	10 214	10 487	10 744	11 052	11 277	2,5%	.	.
L	.	.	.	.	9 552	9 717	9 788	9 909	10 029	10 164	10 241	1,1%	.	.
EU27 H	.	.	.	.	9 011	9 352	9 716	10 067	10 403	10 794	11 098	3,4%	.	3,4%
B	9 036	8 766	8 622	8 783	8 934	9 178	9 386	9 606	9 821	10 075	10 252	2,2%	-0,9%	2,3%
L	.	.	.	.	8 829	8 963	8 999	9 079	9 162	9 264	9 312	0,8%	.	0,8%
ESRA08 H	.	.	.	.	9 834	10 228	10 675	11 089	11 487	11 957	12 332	3,6%	.	3,6%
B	9 784	9 548	9 447	9 604	9 750	10 039	10 310	10 588	10 852	11 166	11 397	2,5%	-0,6%	2,5%
L	.	.	.	.	9 638	9 803	9 876	10 001	10 124	10 263	10 343	1,1%	.	1,1%
FAB Bałtyk H	.	.	.	.	799	830	879	930	980	1 033	1 079	4,6%	.	4,5%
B	741	768	776	788	785	801	832	866	899	932	960	2,9%	2,0%	2,7%
L	.	.	.	.	770	770	781	796	811	825	834	0,8%	.	0,6%
FAB BLUE	.	.	.	.	2 399	2 533	2 664	2 792	2 921	3 060	3 183	4,9%	.	5,1%

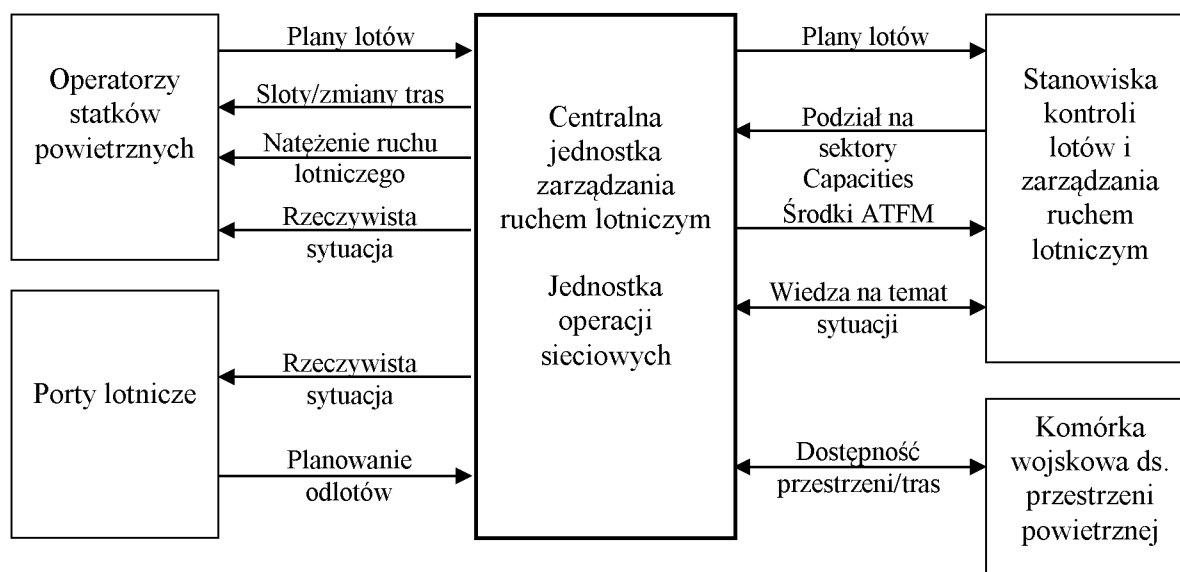
MED H														
B	2 267	2 212	2 194	2 282	2 374	2 475	2 550	2 634	2 717	2 806	2 877	3,4%	0,2%	3,5%
L	.	.	.	.	2 336	2 394	2 411	2 448	2 483	2 520	2 544	1,6%	.	1,7%
FAB Dunaj H	.	.	.	.	877	931	993	1 049	1 106	1 169	1 225	5,7%	.	5,9%
B	758	746	758	829	868	909	948	988	1 026	1 066	1 101	4,1%	3,0%	4,3%
L	.	.	.	.	856	882	898	921	943	963	978	2,4%	.	2,6%
FAB CE H	.	.	.	.	1 994	2 091	2 200	2 303	2 401	2 509	2 602	4,4%	.	4,5%
B	1 914	1 865	1 854	1 928	1 974	2 045	2 109	2 176	2 238	2 307	2 360	2,9%	0,2%	3,0%
L	.	.	.	.	1 947	1 988	2 006	2 036	2 064	2 093	2 110	1,3%	.	1,4%
FAB EC H	.	.	.	.	5 709	5 905	6 108	6 300	6 473	6 673	6 813	2,9%	.	3,0%
B	5 671	5 564	5 499	5 571	5 668	5 811	5 927	6 047	6 164	6 307	6 396	2,0%	-0,6%	2,0%
L	.	.	.	.	5 608	5 690	5 703	5 740	5 781	5 838	5 860	0,7%	.	0,7%
FAB NE H	.	.	.	.	1 015	1 036	1 068	1 096	1 124	1 179	1 209	2,3%	.	1,8%
B	988	1 001	1 012	1 030	1 004	1 014	1 031	1 049	1 064	1 091	1 105	1,0%	1,4%	0,6%
L	.	.	.	.	993	991	989	993	997	1 003	1 003	-0,4%	.	-0,6%
FAB Pd-Zach H	.	.	.	.	1 734	1 815	1 904	1 989	2 071	2 157	2 228	4,4%	.	4,7%
B	1 823	1 644	1 591	1 650	1 719	1 778	1 829	1 884	1 938	1 995	2 035	3,0%	-3,3%	3,3%
L	.	.	.	.	1 691	1 726	1 736	1 759	1 781	1 805	1 815	1,4%	.	1,5%
FAB Wielka Brytania-Irlandia H	.	.	.	.	2 362	2 441	2 525	2 608	2 679	2 790	2 851	3,1%	.	3,1%
B	2 272	2 238	2 254	2 299	2 349	2 408	2 457	2 512	2 564	2 630	2 668	2,1%	0,4%	2,2%
L	.	.	.	.	2 330	2 372	2 387	2 413	2 438	2 471	2 489	1,1%	.	1,2%
FAB Szwecja-Dania H	.	.	.	.	1 003	1 033	1 069	1 103	1 133	1 179	1 209	2,7%	.	2,4%
B	1 008	978	999	1 005	995	1 015	1 037	1 060	1 080	1 107	1 123	1,6%	-0,1%	1,4%
L	.	.	.	.	986	995	997	1 006	1 013	1 021	1 023	0,3%	.	0,2%
EU28 H	.	.	.	.	9 026	9 367	9 732	10 084	10 421	10 813	11 117	3,4%	.	3,4%
B	9 050	8 779	8 634	8 797	8 949	9 193	9 401	9 622	9 838	10 092	10 269	2,2%	-0,9%	2,3%
L	.	.	.	.	8 844	8 978	9 014	9 094	9 177	9 279	9 327	0,8%	.	0,8%
SES-RP2 H	.	.	.	.	9 334	9 678	10 042	10 390	10 725	11 128	11 434	3,3%	.	3,3%
B	9 344	9 087	8 946	9 114	9 256	9 501	9 709	9 927	10 141	10 400	10 576	2,1%	-0,8%	2,2%
L	.	.	.	.	9 149	9 282	9 314	9 390	9 470	9 571	9 615	0,8%	.	0,8%

Struktura i funkcje Centralnej Jednostki Zarządzania Ruchem Powietrznym

Centralna Jednostka Zarządzania Ruchem Powietrznym (Central Flow Management Unit, CFMU) została powołana przez ministrów transportu państw uczestniczących w Europejskiej Konferencji Lotnictwa Cywilnego (ECAC) w październiku 1998 r. Państwa członkowskie ECAC poprosiły EURCONTROL o stworzenie i nadzorowanie takiej jednostki, która mogłaby działać w ich imieniu w zakresie zarządzania przepływem i przepustowością ruchu powietrznego w europejskiej przestrzeni powietrznej. Następnie, w styczniu 2011 r., dyrekcja CFMU została włączona do większej jednostki EUROCONTROL – dyrekcji ds. zarządzania siecią (DNM), której celem jest sprawowanie funkcji menedżera sieci. Operacyjna część byłej dyrekcji CFMU jest obecnie częścią nowej dyrekcji DNM o nazwie CFMU Network Operations (operacje sieciowe CFMU). Jednostka ds. operacji sieciowych odpowiada za planowanie, koordynację oraz realizację strategicznego, przedtaktycznego i taktycznego zarządzania przepływem ruchu lotniczego w zakresie odpowiedzialności CFMU.

Jednostka operacji sieciowych zajmuje się również gromadzeniem, utrzymaniem i dostarczaniem danych na temat operacji lotniczych oraz infrastruktury nawigacyjnej, zgodnie z wymaganiami krajowych systemów kontroli lotów (ATC) i systemów CFMU w różnych fazach procesu zarządzania ruchem lotniczym.

Rolę jednostki operacji sieci CFMU można zilustrować za pomocą głównych procesów wymiany informacji operacyjnych w sieci, pokazanej na ilustracji 2.5.



Ilustracja 2.5. Struktura operacyjna obejmująca jednostkę operacji sieciowych CFMU [67]

Jednostka operacji sieciowych uczestniczy w działaniach związanych z rozwojem i zarządzaniem przepływem i przepustowością ruchu lotniczego w ramach Europejskiej Organizacji ds. Zarządzania Ruchem Lotniczym (EATM), a także w pracach grupy konsultacyjnej ds. operacji (OCG).

Najważniejsze systemy CFMU to [63]:

- system środowiska służb ruchu lotniczego;
- system powtarzalnych planów lotu (RPL);
- zintegrowany system wstępnego opracowywania planów lotu (IFPS);
- system TACTICAL (ETFMS);
- system archiwizacji (DWH – magazyn danych, nazywany wcześniej ARC);
- system weryfikacji planów lotu (IFPUV);
- system przedtaktu (PREDICT).

Większość danych wymienianych pomiędzy systemem CFMU i systemami użytkowników dotyczy planów lotu (FPL) oraz indywidualnych kwestii związanych z zarządzaniem przepływem (informacje na temat slotów czasowych oraz zmian trasy). Ogólny schemat architektury systemów CFMU przedstawiamy na ilustracji 2.6.

Krótki opis zarządzania przepływem i przepustowością ruchu lotniczego

Zarządzanie przepływem i przepustowością ruchu lotniczego (Air Traffic Flow and Capacity Management, ATFCM) to podstawowy element zarządzania ruchem lotniczym (ATM). Najważniejsze zadania ATFCM to:

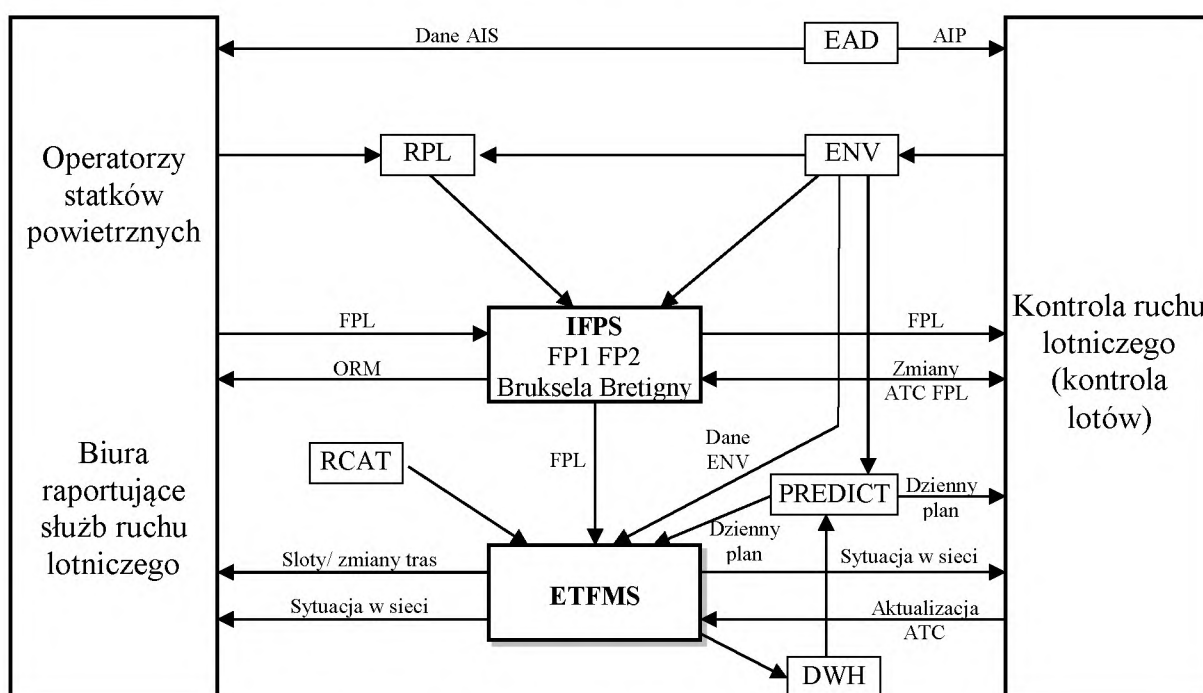
1. zarządzanie ogólną siecią ATFCM w Europie i wsparcie dla instytucji zapewniających służby żeglugi powietrznej w lokalnym zarządzaniu przepustowością;
2. utrzymywanie równowagi między zapotrzebowaniem i możliwościami sieci.

Ogólnym celem ATFCM jest optymalizacja przepływu ruchu lotniczego zgodnie z przepustowością sieci i możliwościami służb kontroli lotów (ATC), przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa i efektywności operacji przewoźników lotniczych.

Działania ATFCM dzielą się na trzy fazy:

– *Faza strategiczna* obejmuje okres od roku do tygodnia przed planowaną datą operacji lotniczej. W fazie strategicznej Centrum Operacyjne Menedżera Sieci (NMOC) pomaga instytucjom zapewniającym służby żeglugi powietrznej (ANSPs) przewidzieć, jakie możliwości będą musiały zapewnić w ośrodkach kontroli lotów. Pozwala to zaplanować rozwiązania umożliwiające zrównoważenie możliwości oraz przepustowości z zapotrzebowaniem w nadchodzącym i kolejnych tygodniach w przyszłości.

– *Faza przedtaktyczna* rozpoczyna się 6 dni przed planowaną operacją. Zadaniem personelu NMOC w tej fazie jest koordynacja opracowania dziennych planów operacji, w celu optymalizacji działań całej sieci ATM i minimalizacji opóźnień oraz kosztów. Wymaga to włączenia wszystkich partnerów uczestniczących w działaniach w proces podejmowania decyzji oraz informowania partnerów o środkach ATFCM, które będą obowiązywać w europejskiej przestrzeni powietrznej w okresie najbliższych dni, poprzez publikację planu operacji na dany dzień.



Ilustracja 2.6. Schemat architektury systemów CFMU [67]

– *Faza taktyczna* następuje w dniu operacji. Personel monitoruje bieżące warunki i na tej podstawie aktualizuje plan na dany dzień. Pracownicy na bieżąco optymalizują przepustowość i możliwości na podstawie zapotrzebowania w czasie rzeczywistym. W przypadku utrudnień spowodowanych regulacjami załoga NMOC opracowuje alternatywne rozwiązania, minimalizujące opóźnienia. Codzienne działania służb zarządzania przepływem obejmują m.in. wyznaczenie indywidualnych czasów odlotu poszczególnych operacji, zmiany trasy pozwalające ominąć utrudnienia i zatłoczone strefy oraz opracowanie alternatywnych profili lotu w celu maksymalizacji efektywności i optymalnego wykorzystania dostępnych możliwości.

Jednostki odpowiedzialne za ATFCM dysponują różnymi środkami, od możliwości regulowania zapotrzebowania, po przewidywanie i optymalizację dostępnej przepustowości.

Usługi ATFCM obejmują:

– zarządzanie sytuacjami kryzysowymi i awaryjnymi (eliminacja zakłóceń i utrzymanie ciągłości operacji w sieci);

- opracowanie planów dziennych (przygotowanie środków ATFCM do wykorzystania następnego dnia);
- zarządzanie natężeniem ruchu i przepustowością sieci (stałe monitorowanie sytuacji ATFCM i przewidywanie działań korygujących);
- codzienne operacje (bieżące dostosowanie przepływu ruchu do dostępnych możliwości);
- zarządzanie zdarzeniami i scenariuszami (wykorzystanie rozwiązań ATFCM do zapobiegania potencjalnym sytuacjom nierównowagi pomiędzy możliwościami i zapotrzebowaniem, wynikającym z sezonowości lub istotnych zdarzeń);
- koordynacja planów operacji sieciowych (NOP) (optymalizacja ogólnych działań ATM poprzez wspólne planowanie).

Rola i główne zasady działania rozszerzonego systemu zarządzania przepływem ruchu

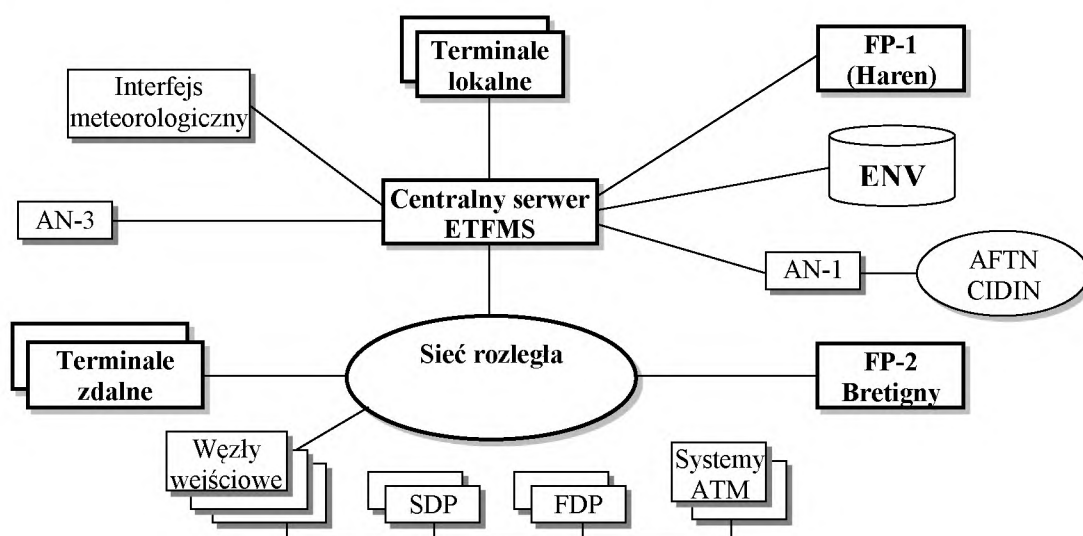
Najważniejsze systemy wykorzystywane w operacjach sieciowych (Network Operations, NOP) to (ilustracja 2.7):

- Rozszerzony system taktycznego zarządzania przepływem (ETFMS), który stanowi podstawę usług ATFCM;
- Zintegrowany system wstępnego opracowywania planów lotu (IFPS) wykorzystywany w usługach planowania lotów [64];
- Centralna baza danych przestrzeni powietrznej i przepustowości (CACD), wcześniej nazywana bazą danych ENV – wspólny magazyn danych zasilający systemy operacyjne i wspierający służby informacji lotniczej.

Uzupełnieniem dla tych głównych systemów są specjalistyczne podsystemy, takie jak:

- system powtarzalnych planów lotu (RPL);
- system archiwizacji (DWH or Datawarehouse);
- system weryfikacji planów lotu (IFPUV);
- system przedtaktyczny (PREDICT).

System taktycznego zarządzania przepływem (Enhancement Tactical Flow Management System, ETFMS) przechowuje dane na temat lotu przez 48 godzin. Pobiera on dane początkowe z systemu RPL i gromadzi komunikaty planu lotu, by sporządzić dokładny obraz zapotrzebowania w ruchu lotniczym. Dane te są aktualizowane na podstawie informacji ATC na temat bieżącego przebiegu lotu lub zmian dokonywanych we wstępnych planach lotu (np. zmiany trasy).



Ilustracja 2.7. Schemat rozszerzonego systemu zarządzania przepływem lotu [67]

Narzędzia obsługi tych danych umożliwiają ocenę zapotrzebowania w ruchu powietrznym przewidywanego na kolejny dzień. Operatorzy statków powietrznych (AO) oraz podmioty zajmujące się zarządzaniem przepływem ruchu mają stały dostęp do bazy danych poprzez terminal.

Głównym zadaniem ETFMS jest porównywanie zapotrzebowania w ruchu powietrznym z dostępną przepustowością i możliwościami ATC.

W przypadkach, w których zapotrzebowanie przekracza możliwości ATC, system wysyła odpowiednie informacje do kontrolerów zarządzania przepływem w NMOC oraz ich kolegów na stanowiskach zarządzania przepływem (FMP) w różnych ośrodkach kontroli obszaru (ACC).

Następnie wspólnie decydują oni o wprowadzeniu „regulacji” opóźniającej niektóre loty, polegającej na zmianie czasów odlotu (slotów) w taki sposób, by rozładować nadmierne natężenie ruchu. Informują również operatorów statków powietrznych o wszelkich zmianach tras lotów.

ETFMS pełni dwie podstawowe funkcje:

1. Obliczanie zapotrzebowania w ruchu lotniczym w każdym sektorze obszaru działania menedżera sieci, na podstawie informacji o planach lotów otrzymanych od operatorów statków powietrznych (AO), przez system wstępnego opracowywania planów lotu.

2. Obliczanie i przydzielanie slotów, a także dystrybucja list slotów do wszystkich zainteresowanych podmiotów (ACC, AO itd.). Ta część systemu nazywa się CASA (Computer Assisted Slot Allocation – komputerowe przydzielanie slotów).

System ETFMS wyposażony jest w następujące funkcje dodatkowe [60, 64]:

- gromadzenie i przetwarzanie danych o środowisku,
- gromadzenie danych o lotach,
- obliczanie profili,
- obliczanie natężenia,
- zmiana tras,
- interfejs człowiek–maszyna,
- wymiana komunikatów,
- komputerowe przydzielanie slotów (CASA) (algorytm jest wynikiem bliskiej współpracy pomiędzy ETFMS i ATC. Kontrolę natężenia ruchu przez CASA aktywuje menedżer przepływu).

Wdrożenie zarządzania przepływem i przepustowością ruchu lotniczego na Ukrainie

Za proces ATFCM na Ukrainie odpowiada centralna jednostka zarządzania ruchem powietrznym (CFMU), przy wsparciu stanowisk zarządzania przepływem (FMP) zlokalizowanych we wszystkich ośrodkach kontroli obszaru (ACC). Celem ATFCM jest:

- maksymalne wykorzystanie możliwości ACC;
- zapobieganie przeciążeniom ACC i utrzymanie równowagi pomiędzy zapotrzebowaniem w ruchu lotniczym oraz możliwościami i przepustowością systemu;
- optymalizacja przepływów ruchu lotniczego;
- dostarczanie użytkownikom aktualnych informacji na temat natężenia i przepływu ruchu lotniczego, umożliwiających efektywne planowanie lotów.

Współpraca pomiędzy FMP i CFMU oparta jest na odpowiednich umowach, podpisanych przez szefa ACC i dyrektora CFMU.

Działania FMP prowadzone są zgodnie ze „Standardowym podręcznikiem FMP”,

zatwierdzonym przez dyrektora generalnego UkSTATSe. Podręcznik zawiera również wzory najważniejszych dokumentów stosowanych przez FMP.

Stanowiska pracy FMP zorganizowane są zgodnie z ogólnymi wymogami dotyczącymi stanowisk zarządzania przepływem ruchu lotniczego i zatwierdzone przez dyrektora generalnego UkSTATE.

ETFMS to ważny krok w doskonaleniu procesu ATFCM, ułatwiający krótkookresowe prognozowanie zapotrzebowania, redukcję niepotrzebnych nadwyżek i wyznaczanie precyzyjniejszych slotów, a tym samym efektywniejsze wykorzystanie dostępnych możliwości całego systemu [67].

2.1.3. Metoda zintegrowanego obrazu ryzyka w zarządzaniu ruchem lotniczym w Europie

Strategia bezpieczeństwa w zarządzaniu ruchem lotniczym (ATM) sformułowana przez EUROCONTROL wymaga dokładnego zrozumienia, w jaki sposób ATM może się przyczynić do występowania wypadków w lotnictwie, by móc skuteczniej optymalizować działania służące poprawie bezpieczeństwa. Obecnie bezpieczeństwo nowych narzędzi i koncepcji ATM zapewnia szczegółowy proces oceny, jednak ciągle nie stworzono ogólnego systemu umożliwiającego ocenę ich łącznego wpływu na bezpieczeństwo [68].

Możliwe jest, że niedostrzegalne współzależności pomiędzy poszczególnymi systemami ATM uniemożliwiają pełne wykorzystanie potencjalnych korzyści wynikających z tych systemów dla bezpieczeństwa. Dlatego właśnie EURCONTROL zdecydowała o stworzeniu *zintegrowanego obrazu ryzyka* (Integrated Risk Picture, IRP) [68, 70], pokazującego, w jaki sposób ATM może przyczynić się do wzrostu ryzyka wypadków i umożliwiającego wykrycie możliwych współzależności, tak aby można było wyznaczyć najważniejsze priorytety w zakresie poprawy bezpieczeństwa w całym systemie.

Strategia ATM 2000+ [70] określa cel, jakim jest niedopuszczenie do zwiększenia liczby wypadków wynikających z działań ATM i, w miarę możliwości, obniżenie liczby takich wypadków. Ponieważ według prognoz popyt na usługi ruchu lotniczego ma się podwoić do 2015 r., oznacza to konieczność zmniejszenia częstotliwości wypadków o połowę.

Po serii poważnych wypadków lotniczych [69] Europejska grupa działań ds. bezpieczeństwa ATM, powołana przez EUROCONTROL, określiła działania priorytetowe skierowane na poprawę bezpieczeństwa europejskiej przestrzeni powietrznej, obejmujące badania w celu stworzenia zintegrowanego obrazu ryzyka dla ATM w Europie.

Ogólnym celem niniejszego rozdziału jest omówienie zintegrowanego obrazu ryzyka dla ATM w Europie, pokazującego priorytety w zakresie bezpieczeństwa w cyklu ATM „od lotniska do lotniska”, a także wpływ przyszłego rozwoju ATM na bezpieczeństwo.

W rozdziale tym prezentujemy metodologię, która tkwi u podstaw obrazu bezpieczeństwa (IRP 2005 i 2012). Omawiamy w nim szczegóły tego podejścia, strukturę modelu, kwantyfikację, weryfikację oraz przewidywania dotyczące przyszłych działań i wyników ATM [73].

Wyzwania związane z modelowaniem ryzyka

Najważniejszym wyzwaniem związanym z tworzeniem modelu ryzyka jest znalezienie połączenia ilościowego między ryzykiem wypadków i jego pierwotnymi przyczynami, a następnie oddzielenie ATM od innych czynników tak, aby określić obszary, w których można ograniczać ryzyko. Utrudniają to przede wszystkim następujące kwestie [68, 73]:

– *Złożoność systemu.* Złożony system zabezpieczeń, które mają zapobiegać wypadkom lotniczym, oznacza, że większość tych wypadków jest także złożona i obejmuje kilka różnych błędów lub awarii. Czasami są one od siebie niezależne i mogą występować w nieprzewidzianych, nadzwyczajnych okolicznościach. W innych sytuacjach błędy są ze sobą połączone i mogą wynikać z zaniechań w kulturze bezpieczeństwa.

– *Ograniczona ilość danych.* Bezpośrednie, operacyjne i techniczne przyczyny wypadków wynikają często z powszechnych problemów związanych z zarządzaniem bezpieczeństwem i przestrzeganiem regulacji. Problemy te jednak nie zawsze wychodzą na jaw podczas badania wypadków i dlatego trudno je wyeliminować. Podobnie bardzo rzadko wykrywane są związki pomiędzy działaniami w ramach zarządzania przestrzenią powietrzną i błędami kontroli lotów.

– *Wpływ rozproszenia.* O ile systemy techniczne możemy, w pewnym uproszczeniu, modelować jako działające prawidłowo lub wadliwe, a o ludziach wiemy, że czasami popełniają oczywiste błędy, to w przypadku ukrytych problemów związanych z zarządzaniem bezpieczeństwem i przestrzeganiem regulacji trudno wprost wskazać sukcesy i błędy. Nie są one bezpośrednią przyczyną wypadków i, choć mogą mieć znaczący wpływ na ryzyko ich wystąpienia, wpływ ten jest rozproszony i trudny do zdefiniowania.

– *Współzależności.* „Zintegrowany” obraz ryzyka to coś więcej niż zwykły zbiór wszystkich szacunkowych składników ryzyka, ponieważ powinien wskazywać również współzależności między nimi. Współzależności te rzadko są wyraźnie widoczne w przypadku pojedynczych wypadków, ale stają się dostrzegalne i znaczące, kiedy pozornie niezależne czynniki połączymy w jednym modelu, pokazującym, że być może, nie dostrzegamy wszystkich płynących z nich zagrożeń.

– *Niepewność związana z rozwojem ATM.* W 2012 r. system ATM jest nadal w fazie rozwoju i wiele jego elementów ciągle pozostaje nie do końca zdefiniowanych. Niektóre aspekty mogą ulec jeszcze radykalnym zmianom, dlatego trudno dziś ocenić, jaki może być ich wpływ na bezpieczeństwo [74].

Opis metodologii zintegrowanego obrazu ryzyka

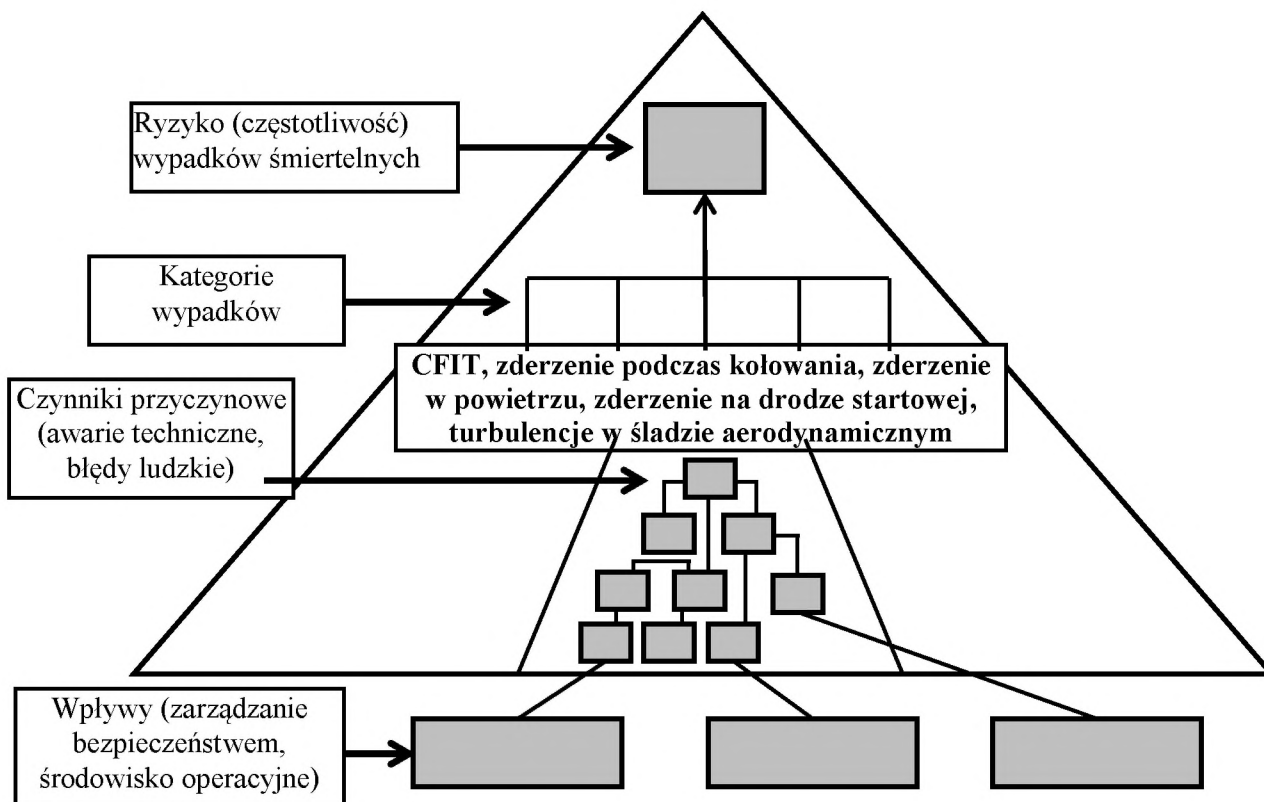
EUROCONTROL tworzy zintegrowany obraz ryzyka (IRP) w zarządzaniu ruchem lotniczym w Europie, pokazujący priorytety w zakresie bezpieczeństwa w cyklu ATM „od lotniska do lotniska” [71, 74, 75]. IRP jest pochodną „modelu ryzyka”, prezentującego rodzaje ryzyka będące przyczyną wypadków lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem roli ATM w tym zakresie. By zapewnić, że model ryzyka odzwierciedla przyszły rozwój ATM, jest on oparty na „modelu ATM”, opisującym system ATM, którego ryzyko modelujemy.

Ogólny schemat modelu ryzyka przedstawiony został na ilustracji 2.8. Wskazuje on pięć kategorii wypadków, w których rola ATM może być istotna, jako czynnika przyczynowego lub zapobiegającego zdarzeniom. Osobne drzewo błędów przedstawia konkretne czynniki przyczynowe dla każdej kategorii wypadków, obejmujące niedoskonałości rozmaitych barier zapobiegających wypadkom oraz elementy zwiastujące wystąpienie wypadku, które można mierzyć i monitorować na podstawie wcześniejszych doświadczeń.

Osobny model wpływu [72] pokazuje czynniki bardziej rozproszone, takie jak rodzaj środowiska operacyjnego, jakość zarządzania bezpieczeństwem, działalność ludzka oraz wyposażenie bezpieczeństwa.

Model wpływów [72] jest jednakowy dla wszystkich kategorii wypadków, dlatego umożliwia wykrywanie wspólnych przyczyn, decydujących o nieskuteczności wykorzystanych barier, a także czynników zbyt rozproszonych, by umieścić je na drzewie błędów.

Model pozwala zmierzyć ryzyko z wykorzystaniem danych na temat incydentów i wypadków, skorygowanych o bieżące trendy, dając obraz ryzyka w pełni zgodny z rzeczywistym doświadczeniem.



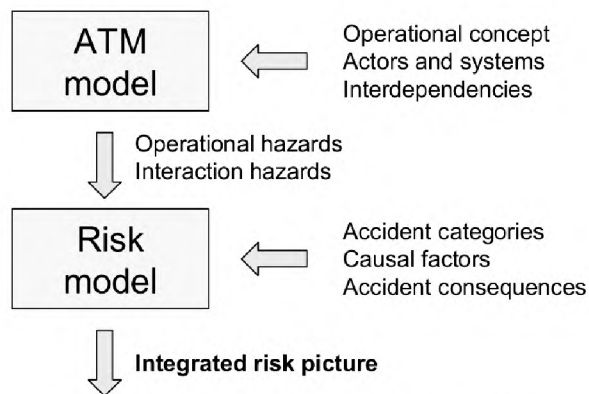
Ilustracja 2.8. Ogólna struktura modelu ryzyka ATM [46]

By otrzymać obraz ryzyka na 2012 r., należy najpierw określić, jakie zmiany zostaną wprowadzone w systemie ATM do tego roku. Każda z tych zmian powoduje korektę osądu zdarzeń podstawowych i czynników wpływu zawartych w modelu ryzyka.

Ich potencjalne skutki, podobnie jak skutki zmian natężenia ruchu lotniczego, są modelowane, by oszacować całkowite ryzyko i rozkład przyczyn wypadków na 2012 r. Model uwzględnia również, na ile to możliwe, skutki pozytywnych i negatywnych zależności pomiędzy wprowadzanymi zmianami.

Zintegrowany obraz ryzyka jest pochodną „modelu ryzyka”, prezentującego rodzaje ryzyka będące przyczyną wypadków lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem roli ATM w tym zakresie. By zapewnić, że model ryzyka odzwierciedla przyszły rozwój ATM, jest on oparty na „modelu ATM”, opisującym system ATM, którego ryzyko modelujemy. (Ilustracja 2.9.).

Model ATM	Koncepcja operacyjna Aktorzy i systemy Współzależności
Zagrożenia operacyjne Zagrożenia wynikające z interakcji	
Model ryzyka	Kategorie wypadków Czynniki przyczynowe Skutki wypadków
Zintegrowany obraz ryzyka	



Ilustracja 2.9. Podejście modelowe [46]

Najważniejsze cechy obu modeli to:

– *Model ATM* przedstawia koncepcję operacyjną lotnictwa komercyjnego, czyli sposób, w jaki współpracują różni aktorzy i systemy (szczególnie działający w ramach ATM). Jest to bardzo uproszczony opis, prezentujący współzależny charakter współczesnego lotnictwa w formie zoptymalizowanej do przygotowania modelu ryzyka. Obejmuje on standardowe rodzaje operacji wykonywanych w głównych krajach europejskich, nie uwzględniając specyfiki poszczególnych rynków;

– *Model ryzyka* pokazuje, w jaki sposób różne czynniki przyczynowe (czynnik ludzki, błędy proceduralne i awarie sprzętu, w tym awarie sieci zabezpieczeń) wspólnie prowadzą do wypadków lotniczych. Jego wynikiem jest oczekiwany obraz ryzyka.

Elementem łączącym oba modele są „zagrożenia”, czyli potencjalne błędy lub defekty, które mogą prowadzić lub przyczyniać się do występowania wypadków.

Model ATM

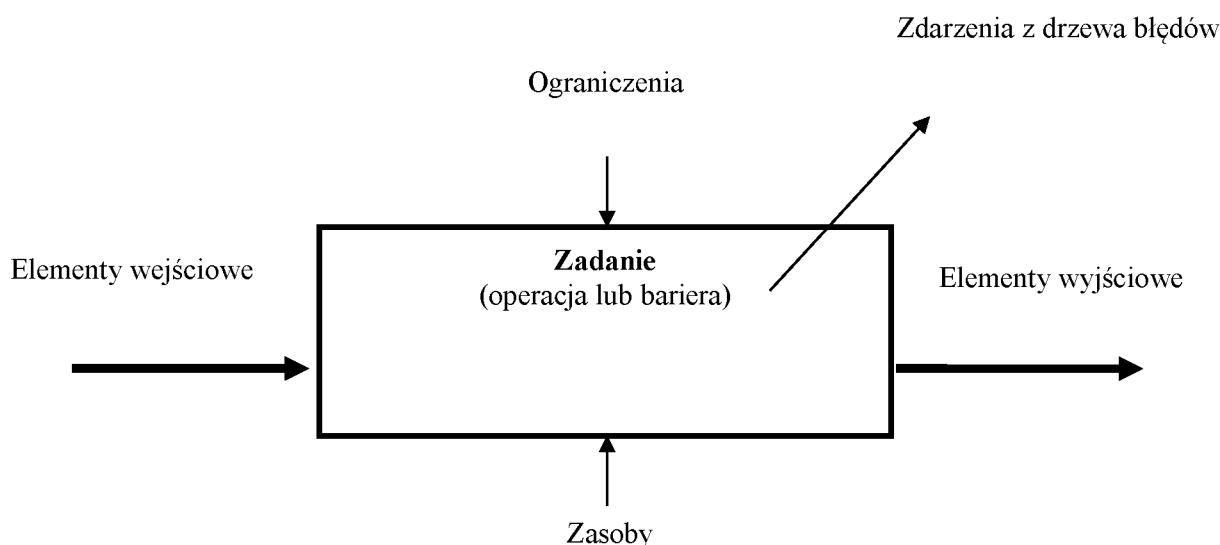
Model ATM przedstawia system ATM w formie schematycznej i służy jako wsparcie dla modelu ryzyka. Jego celem jest [73]:

– zdefiniowanie głównych elementów ATM (zadań, aktorów i systemów), przedstawionych w modelu ryzyka;

– prezentacja koncepcji działania, tzn. sposobów współdziałania poszczególnych aktorów i systemów w ramach ATM;

– identyfikacja potencjalnych współzależności wynikających z wykorzystania wspólnych źródeł informacji, które powinny zostać uwzględnione w modelu ryzyka.

Model wykorzystuje zapis zgodny z techniką analizy i projektowania strukturalnego (Structured Analysis and Design Technique, SADT). Dla każdego zadania (lub elementu funkcyjnego) systemu ATM model pokazuje niezbędne elementy wejściowe i wyjściowe, podkreślając jednocześnie konieczność wykorzystania określonych zasobów (aktorów i podsystemów), a także wskazując istniejące ograniczenia (ilustracja 2.10). Wystarczy to, by zdefiniować najważniejszych aktorów oraz systemy działające w ATM, a także określić przepływ informacji pomiędzy nimi, tak by można było zidentyfikować współzależności i zweryfikować, czy zostały one uwzględnione w modelu ryzyka.



Ilustracja 2.10. Ogólny model ATM [46]

Główne składniki ATM to:

- *organizacja i zarządzanie przestrzenią powietrzną (AO&M)* – obejmuje organizację przestrzeni powietrznej w taki sposób, by zapewnić miejsce dla różnych rodzajów działań i różnego natężenia ruchu;
- *zarządzanie przepływem i przepustowością ruchu powietrznego (ATFCM)* – obejmuje optymalne wykorzystanie możliwości ATC i ograniczanie bieżącego przepływu ruchu, w celu dostosowania do aktualnej przepustowości;
- *kontrola ruchu lotniczego (kontrola lotów, ATC)* – oznacza utrzymanie bezpiecznego, uporządkowanego i efektywnego przepływu ruchu powietrznego; obejmuje infrastrukturę komunikacyjną, nawigacyjną i dozoru;
- *operacje lotniskowe* – obejmują zarządzanie ruchem lotniczym oraz procesami bezpieczeństwa na lotniskach i wokół nich;
- *operacje statków powietrznych* – obejmują działania wykonywane na pokładach statków powietrznych, w reakcji na polecenia służb ATC lub na podstawie decyzji załogi;
- *zarządzanie informacjami* – obejmuje plany lotów oraz dostarczanie informacji meteorologicznych i lotniczych.

Model drzewa błędów

Model drzewa błędów prezentuje czynniki przyczynowe, czyli zdarzenia lub okoliczności, które wspólnie mogą przyczynić się do wystąpienia zdarzenia przedstawionego w górnej części modelu. Drzewa błędów są narzędziem właściwym w przypadku czynników, które są [73]:

- wyrażne, tzn. można je łatwo odróżnić od innych czynników przyczynowych;
- binarne, tzn. mogą wyrażać tylko dwie skrajne właściwości – np. sprawny/zepsuty, prawidłowy/błędny, właściwy/niewłaściwy itd.;
- niezależne, tzn. mogą się zmieniać, nie powodując zmian innych czynników przyczynowych (z wyjątkiem tych, które znajdują się bezpośrednio nad lub pod nimi na drzewie lub też są z nimi połączone przez zdarzenie wywołane wspólną przyczyną);
- niezbędne (dla czynników połączonych przez bramkę AND) lub wystarczające (dla

czynników połączonych przez bramkę OR), by wywołać zdarzenia znajdujące się nad nimi na modelu drzewa.

Z zasady model drzewa błędów powinien przedstawić tylko czynniki spełniające wszystkie powyższe kryteria.

W praktyce możemy definiować czynniki przyczynowe prezentowane w modelu drzewa błędów w taki sposób, by spełniały te kryteria w największym możliwym stopniu. Zachowania ludzkie, a także operacje techniczne i procesy zarządzania, które są przyczyną pojawienia się takich czynników, prezentowane są na odrębnym modelu wpływów.

Wydarzeniem umieszczonym w górnym polu drzewa błędów jest wypadek śmiertelny. Na pierwszym poziomie analizy wydarzenie to zostaje rozdzielone na pięć kategorii wypadków (ilustracja 2.8).

Dla każdej z tych kategorii tworzymy osobne drzewo błędów. Pozostała jego struktura zależy od sekwencji zdarzeń poprzedzających wypadek (tzw. zwiastunów wypadku) oraz od tego, która z barier służących zapobieganiu niepożądanym zdarzeniom okaże się nieskuteczna. Pokazuje to ilustracja 2.11. Wypadki mogą być efektem różnych scenariuszy, czyli sekwencji zdarzeń i błędów.

U podstawy modelu znajdują się najdrobniejsze czynniki przyczynowe, jakie można modelować z wykorzystaniem metody drzewa błędów, zgodnie z wymienionymi powyżej kryteriami. W większości przypadków to właśnie te podstawowe czynniki są przyczyną błędów i nieskuteczności zapobiegających im barier.

Model drzewa błędów wykorzystuje dwa podstawowe rodzaje bramek logicznych:

- bramki OR („lub”) reprezentują alternatywne przyczyny błędów i nieskuteczności barier;
- bramki AND („i”) reprezentują połączenie błędów i nieskuteczności różnych barier, niezbędne do spowodowania wypadku.

Ogólnie mówiąc, końcowy wypadek jest efektem nieskutecznego działania wszystkich kolejnych barier, które miały mu zapobiec. Na ile to możliwe, drzewo błędów powinno być ułożone w taki sposób, by sekwencja kolejnych błędów i nieskuteczności przedstawiona została od lewej do prawej strony, poczynawszy od pierwszych drobnych zwiastunów wypadku najbardziej po lewej, aż po ostatnią nieskuteczną barierę najbardziej po prawej stronie modelu.

Przedstawienie wyników

Model pozwala nam uzyskać następujące wyniki [73]:

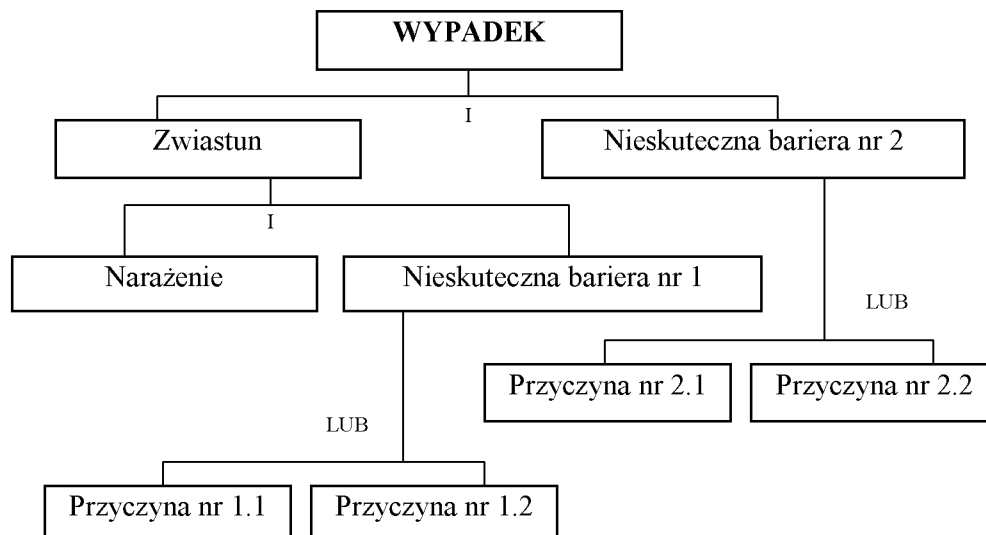
– *Częstotliwość wypadków śmiertelnych.* Częstotliwość wypadków śmiertelnych przedstawiona jest w najwyższym polu drzewa błędów i powszechnie uważa się, że jest to najlepszy wskaźnik ryzyka oferowany przez IRP. W niektórych przypadkach właściwszym parametrem mogłaby być częstotliwość wypadków śmiertelnych w poszczególnych kategoriach przedstawionych na modelu.

– *Częstotliwości wypadków zgodnych z definicją ICAO.* Definicja wypadków ICAO obejmuje nie tylko wypadki śmiertelne, ale również wypadki powodujące poważne obrażenia lub uszkodzenia samolotu wymagające poważnej naprawy. W każdej z kategorii przedstawionych na modelu znajdują się zdarzenia poprzedzające wypadek śmiertelny, które odpowiadają wypadkom zdefiniowanym przez ICAO, zatem model pozwala również na określenie częstotliwości tego typu sytuacji.

– *Częstotliwość zwiastunów wypadków.* W każdej kategorii wypadków model pokazuje również sekwencję zdarzeń poprzedzających („zwiastunów”), których częstotliwość można wykorzystać jako punkt odniesienia podczas monitorowania poziomu bezpieczeństwa w określonych sytuacjach (na lotnisku, w poszczególnych sektorach, w działaniach przewoźników

itd.).

– *Prawdopodobieństwo nieskuteczności barier*. W każdej z kategorii wypadków model pozwala również ocenić niezawodność barier zapobiegających wypadkom, która (po określeniu docelowych poziomów bezpieczeństwa, na podstawie sporządzonego IRP) może służyć jako jeden z parametrów bezpieczeństwa w podobnych systemach.



Ilustracja 2.11. Schemat struktury drzewa błędów [46]

– *Rola poszczególnych czynników*, czyli udział poszczególnych czynników przyczynowych (zdarzeń podstawowych i czynników wpływu) w ogólnym ryzyku. Jest to jeden z głównych typów wyników, jakie uzyskujemy, wykorzystując model drzewa błędów, pokazujący, jak może zmienić się częstotliwość wypadków śmiertelnych, jeśli zmieniają się czynniki przyczynowe.

Wyniki IRP pozwalają oszacować całkowite ryzyko i rozkład przyczyn wypadków. Głównym wskaźnikiem ryzyka jest częstotliwość wypadków śmiertelnych w każdej z modelowanych kategorii, jednak model umożliwia również określenie częstotliwości zdarzeń poprzedzających oraz niezawodność barier wprowadzanych, by zapobiegać niepożądanym zdarzeniom. Wskaźnikiem oceny poszczególnych czynników jest ich „wkład” (udział) w stwarzaniu warunków wpływających na występowanie poważnych zdarzeń niepożądanych i wypadków.

Model jest zawarty na arkuszu, który umożliwia ocenę ilościową drzew błędów i modeli wpływów, a także prezentuje ryzyko wynikające z poszczególnych czynników przyczynowych, na podstawie danych wejściowych wprowadzonych przez użytkownika.

Model może być również wykorzystywany do przewidywania zagrożeń wynikających z poszczególnych czynników przyczynowych w różnych sytuacjach (na lotnisku, podczas lotu, w wybranym sektorze ATC), na podstawie danych wprowadzonych przez użytkownika, choć w praktyce prognozy te nie zostały jeszcze zweryfikowane.

Rekomendujemy wprowadzenie w przyszłości w omawianej metodologii udoskonaleń w następujących obszarach:

– modelowanie innych kategorii wypadków (np. utraty kontroli, wypadków podczas lądowania) i scenariuszy (np. wtargnięcia pojazdów na drogę startową), które mogą być spowodowane działaniami ATM. Obecnie model ich nie uwzględnia;

– wazenie ryzyka dla poszczególnych kategorii wypadków. Obecnie wszystkie kategorie

wypadków śmiertelnych uznaje się za równoważne, choć niektóre typy wypadków (np. zderzenia w powietrzu) mogą powodować większą liczbę ofiar niż inne (np. zderzenia podczas kołowania);

- modelowanie dojrzałości systemu zarządzania bezpieczeństwem. Obecnie średni wskaźnik efektywności czynników wpływu ma wartość 70, ale może zostać zmieniony na 50, by dopasować go do średniego wskaźnika dojrzałości systemów zarządzania bezpieczeństwem;

- modelowanie wyników zarządzania bezpieczeństwem. Obecnie wprowadzane przez użytkownika dane dotyczące jakości zarządzania bezpieczeństwem wykorzystywane są do kontrolowania i oceny działań pilotów oraz kontrolerów lotniczych, jednak nie tworzy się modeli wpływu systemów zarządzania bezpieczeństwem na działania innych aktorów i efektywność wyposażenia;

- analiza danych na temat zdarzeń poprzedzających. Obecnie model ryzyka wykorzystuje tylko dane „AIRPROX” i dane na temat wtargnięć na drogę startową. W przyszłości wskazane byłoby szersze wykorzystanie danych na temat incydentów związanych z kontrolą lotów, operacjami lotniskowymi lub działaniami przewoźników;

- analiza danych o narażeniu na kolizję i sytuacjach konfliktowych, umożliwiająca modelowanie pozytywnych aspektów bezpieczeństwa ATM przed wystąpieniem incydentów lub wypadków. Obecnie aspekty te prezentowane są tylko w sposób przybliżony;

- modelowanie ryzyka w konkretnych sytuacjach. Z zasady model pozwala na analizę konkretnych sytuacji, np. podczas lotu, na lotnisku czy w wybranym sektorze przestrzeni powietrznej. W przyszłości należałoby jednak zweryfikować założenia, na których opierają się te modele za pomocą odpowiednich opisów przypadków;

- analiza częstotliwości wypadków oddzielnie dla samolotów turbośmigłowych, małych zachodnich odrzutowców oraz odrzutowców budowanych na wschodzie. Obecnie modelowanie częstotliwości wypadków dotyczy przede wszystkim jednej grupy samolotów – dużych, budowanych na Zachodzie samolotów odrzutowych;

- modelowanie wpływu środowiska operacyjnego. Obecnie model drzewa błędów uwzględnia tylko główne czynniki środowiskowe, takie jak widoczność i rzeźba terenu, a pomija bardziej rozproszone elementy [46].

2.2. Satelitarne systemy zapobiegania kolizjom statków powietrznych

Proces ciągłego rozwoju sektora lotniczego prowadzi do konieczności zapewnienia łączności pomiędzy naziemnymi systemami łączności, nawigacji i dozoru a systemami satelitarnymi, umożliwiającą poszerzenie obszarów operacyjnych, głównie o strefy podbiegunowe oraz regiony o ograniczonym zasięgu radarów [77]. Dlatego właśnie w ramach projektów SESAR w Europie (patrz także rozdział 2.1) oraz NEXTGEN w USA, wprowadzone zostały nowe programy, obejmujące wdrożenie i rozwój systemów ADS-B, wykorzystujących możliwości łączności satelitarnej [84, 85]. W styczniu 2005 r. wejdą w życie rozszerzenia wymogów ICAO dotyczących służb kontroli lotów, zgodnie z obowiązującą koncepcją CNS/ATM (łączności nawigacji i dozoru/zarządzania ruchem lotniczym), zakładające wykorzystanie funkcji systemów ADS-B (Automatyczne zależne dozoru-rozglaszanie). W Europie koordynacja wdrożenia technologii ADS-B odbywa się w ramach programu EUROCONTROL CASCADE [76].

Biorąc pod uwagę znaczenie technologii ADS-B dla światowych systemów żeglugi powietrznej, technologia ta wydaje się stosunkowo nowym rozwiązaniem, stworzonym w wyniku kompleksowych działań badawczych. W związku z tym w części 2.2 zawarliśmy opisy metod, modeli matematycznych oraz praktyczne rekomendacje dotyczące włączenia technologii ADS-B do systemu zarządzania ruchem lotniczym, a także omówienie wszystkich aspektów związanych z badaniem tej technologii w procesie kształcenia na uczelniach lotniczych. Część ta obejmuje następujące tematy:

- *Badanie przesyłania komunikatów ADS-B kanałami łączności satelitarnej;*
- *Modelowanie transmisji komunikatów ADS-B przez satelitę, z wykorzystaniem systemu MIMO;*
- *Kodowanie korekcyjne komunikatów ADS-B dla satelitów Iridium;*
- *Badanie wpływu schematów modulacyjnych i nieliniowości nadajników na transmisję komunikatów ADS-B przez łącze satelitarne OFDM;*
- *Modelowanie komputerowe transpondera satelitarnego o częstotliwości radiowej do przesyłania komunikatów ADS-B kanałami łączności satelitarnej;*
- *Analiza efektywności łącza „samolot–satelita–ziemia” przy użyciu kodowania korekcyjnego;*
- *Badanie parametrów anteny współliniowej w systemach odbioru komunikatów ADS-B z wykorzystaniem metod numerycznych.*

2.2.1. Badanie przesyłania komunikatów ADS-B kanałami łączności satelitarnej

Proces ciągłego rozwoju sektora lotniczego prowadzi do konieczności zapewnienia łączności pomiędzy naziemnymi systemami łączności, nawigacji i dozoru a systemami satelitarnymi, umożliwiającą poszerzenie obszarów operacyjnych, głównie o strefy podbiegunowe oraz regiony o ograniczonym zasięgu radarów [77].

Dlatego właśnie w ramach projektów SESAR w Europie (patrz także rozdział 2.1) oraz NEXTGEN w USA wprowadzone zostały nowe programy, obejmujące wprowadzenie i rozwój systemów ADS-B, wykorzystujących możliwości łączności satelitarnej [84, 85].

Kanały łączności składające się z pokładowych urządzeń ADS-B oraz satelitów Iridium mogłyby pomóc w rozładowaniu zatorów w powietrzu, umożliwiając przeniesienie części ruchu lotniczego z rejonów o dużym natężeniu do obszarów, które dziś nie mogą być wykorzystywane, z powodu braku odpowiedniej naziemnej infrastruktury dozoru [83].

Dlatego właśnie pilnie potrzebna jest analiza parametrów przesyłania komunikatów w kanale „statek powietrzny – satelita – stacja naziemna”.

Obecnie jednym z najważniejszych wyzwań w lotnictwie jest zapewnienie szybkiej wymiany informacji przy zachowaniu wysokiej jakości przesyłu. Trudności pojawiają się, kiedy z powodu

niewystarczającej liczby radarów lub braku odpowiedniej widoczności radaru występują „luki” w śledzeniu ruchu statku powietrznego.

Rozwiązanie tego problem wymaga stworzenia nowoczesnych systemów transmisji danych.

Jednym z najlepszych kierunków dalszego rozwoju w tym zakresie jest wykorzystanie technologii satelitarnych. Pozwoli to na uproszczenie sprzętu i redukcję kosztów jego instalacji oraz utrzymania. Umożliwi również zapewnienie pełnej łączności w rejonach pozostających poza zasięgiem systemów naziemnych.

W ciągu ostatnich 20 lat technologie te znacząco się rozwinęły i dziś mamy do dyspozycji kilka systemów łączności satelitarnej, które umożliwiają wymianę informacji w lotnictwie: INMARSAT, COSPAS/SARSAT, Iridium, Globalstar oraz Thuraya.

Każdy z nich ma swoje zalety, jednak w zakresie transferu danych największe możliwości oferuje system Iridium, złożony z 66 satelitów pokrywających swoim zasięgiem całą powierzchnię kuli ziemskiej [79, 80].

Wykorzystując technologie satelitarne oraz pokładowe urządzenia ADS-B, agencje zarządzania ruchem lotniczym na całym świecie będą mogły śledzić samoloty w dowolnym punkcie globu. System ADS-B pozwala wykryć pozycję samolotu, generuje raporty na temat jego bieżącej prędkości, prędkości pionowej i wysokości, a także inne istotne dane, a następnie rozsyła te informacje na częstotliwości 1090 MHz.

Sygnaly są odbierane i wykorzystywane przez stacje naziemne oraz inne statki powietrzne wyposażone w urządzenia ADS-B.

Transmisja komunikatów ADS-B przez system satelitarny Iridium została szczegółowo omówiona w rozdziałach [82].

Celem niniejszego rozdziału jest:

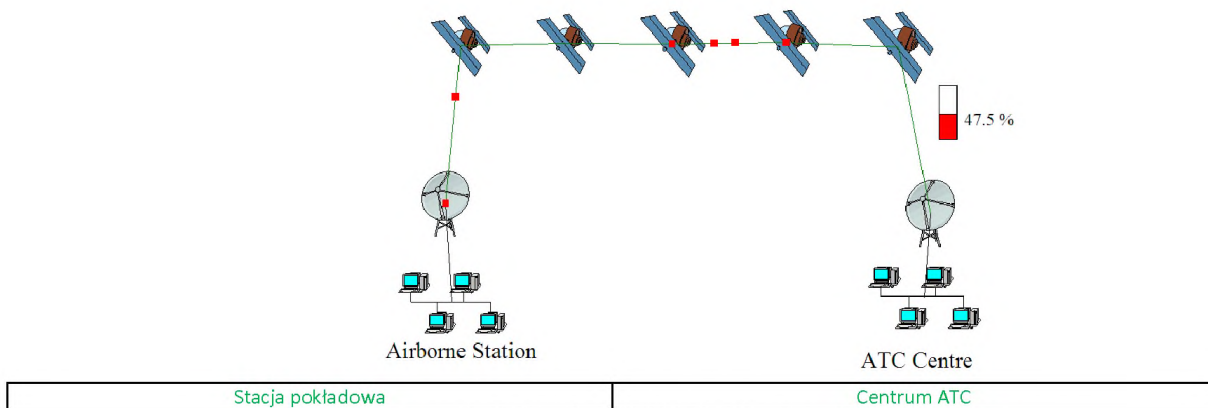
- 1) stworzenie modelu kanału łączności „statek powietrzny – satelita – stacja naziemna” przy użyciu oprogramowania NetCracker Professional 4.1;
- 2) wykrycie i analiza zależności między średnim wykorzystaniem łącza i czasem przesyłu komunikatu oraz liczbą statków powietrznych i satelitów;
- 3) analiza łączy satelitarnych o różnej architekturze;
- 4) zbadanie efektu „nasylenia” kanału łączności podczas równoczesnej transmisji danych z wielu statków powietrznych przez różną liczbę satelitów.

Struktura modeli

Do stworzenia modelu transmisji komunikatów ADS-B kanałem łączności satelitarnej wykorzystano oprogramowanie komputerowe Professional NetCracker 4.1.

Model kanału wykorzystany w badaniu został oznaczony jako $kAmSnG$, gdzie k to liczba statków powietrznych A , m to liczba satelitów S , a n to liczba stacji naziemnych G .

Ilustracja 2.12 pokazuje model 1A5S1G z łączem międzysatelitarnym – składa się z jednej stacji pokładowej, czyli systemu ADS-B na pokładzie statku powietrznego, pięciu satelitów Iridium oraz naziemnego centrum kontroli lotów.



Ilustracja 2.12. Model IA5SIG z łączem międzysatelitarnym

Dla satelitów Iridium i systemu ADS-B określono następujące parametry modelu.

Strumienie danych mają charakter stochastyczny i są opisane z wykorzystaniem praw rozkładu dla wartości losowych.

Parametry przesyłu zostały określone w programie NetCracker Professional 4.1 podobnie jak w teorii kolejek [76, 77, 81, 86]: wielkość transakcji – 8 kb zgodnie z prawem rozkładu jednostajnego ciągłego; czas pomiędzy transakcjami – 0,1 s zgodnie z prawem rozkładu wykładniczego; opóźnienie pakietu – 0,02 s zgodnie z prawem rozkładu jednostajnego ciągłego; ryzyko niedostarczenia pakietu – 0,01; szybkość transmisji statku powietrznego/stanowisk naziemnych i anten – 100 kB/s (średnia), przepływność łącza – T1 (1544 Mb/s).

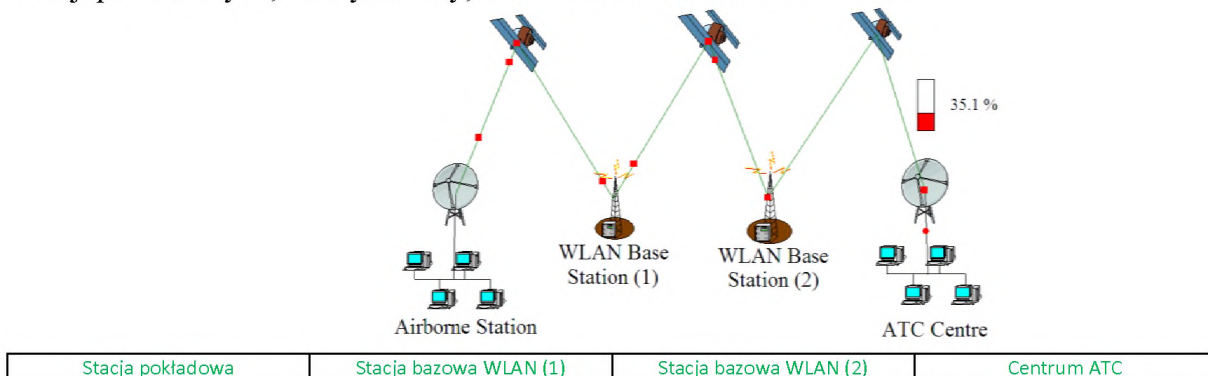
Te same parametry wykorzystano w większości modeli, z wyjątkiem tych, dla których zmiany parametrów przesyłu zostały zdefiniowane oddzielnie.

Ilustracja Fig. 2.13 przedstawia model 1ASGSGS1G o architekturze typu „bent pipe”: jedna stacja pokładowa, trzy satelity Iridium, dwie stacje WLAN (bezprzewodowej sieci lokalnej); naziemne centrum kontroli lotów.

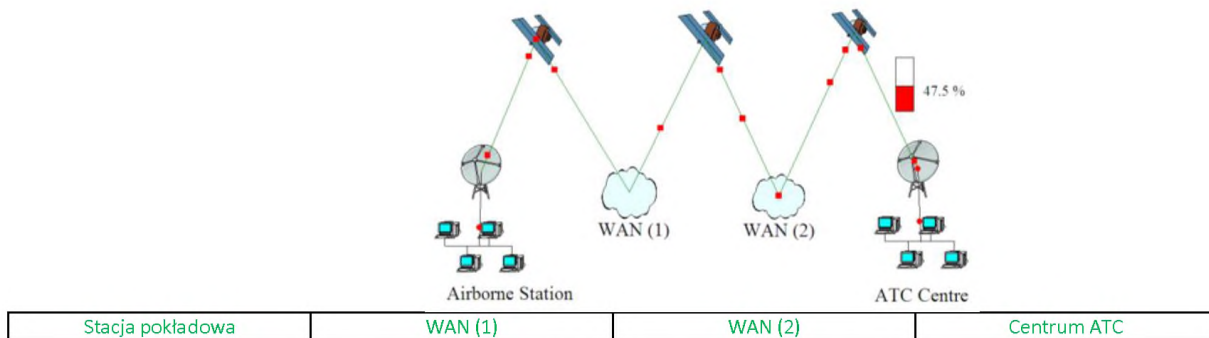
Ilustracja Fig. 2.14 przedstawia model 1ASCSCS1G o architekturze typu „bent pipe”: jedna stacja pokładowa, dwie chmury rozległej sieci komputerowej (WAN); naziemne centrum kontroli lotów.

Ilustracja Fig. 2.15 przedstawia model 3A10S1G z łączem międzysatelitarnym: trzy stacje pokładowe, dziesięć satelitów; naziemne centrum kontroli lotów.

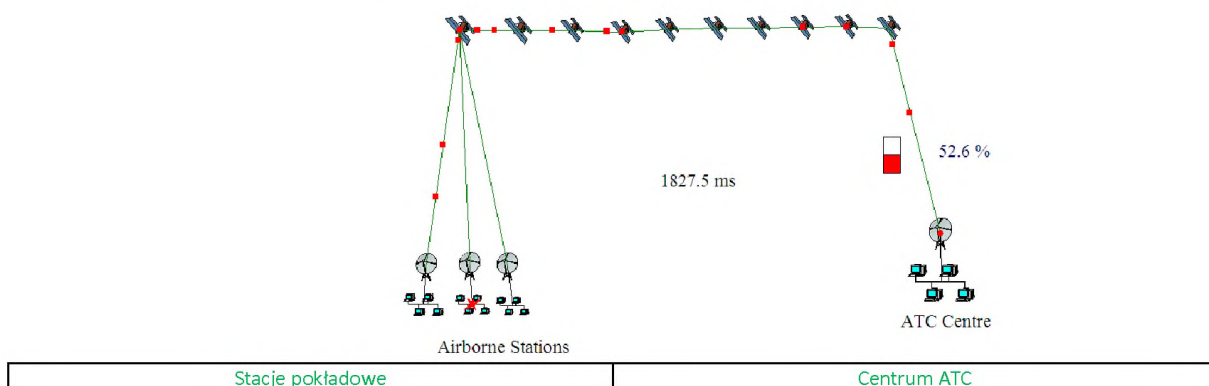
Ilustracja Fig. 2.16 przedstawia model 13A4S1G z łączem międzysatelitarnym: trzynaście stacji pokładowych; cztery satelity; naziemne centrum kontroli lotów.



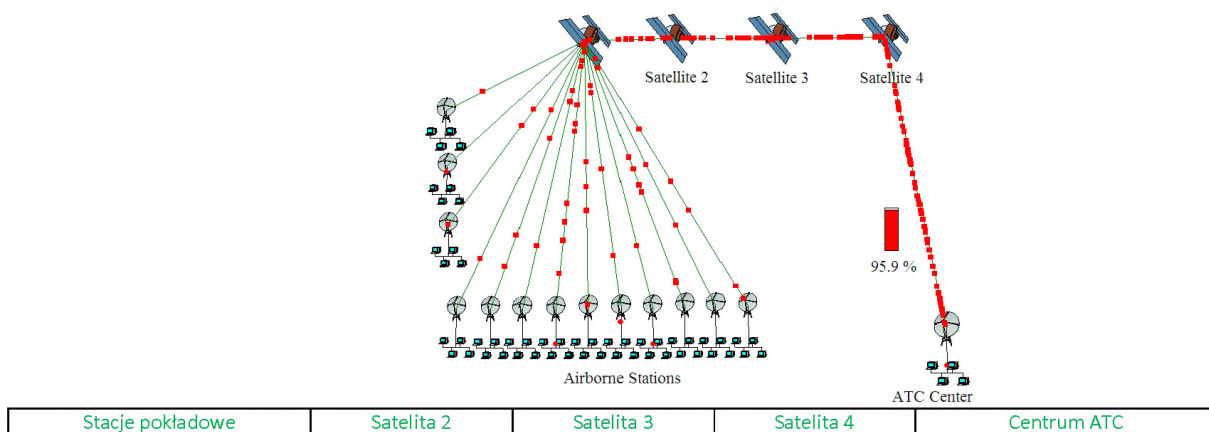
Ilustracja 2.13. Model 1ASGSGS1G z łączem satelitarnym typu „bent pipe” [87]



Ilustracja 2.14. Model IASCSCS1G z łączem satelitarnym typu „bent pipe” [87]



Ilustracja 2.15. Model 3A10S1G z łączem międzysatelitarnym [87]



Ilustracja 2.16. Model 13A4S1G z łączem międzysatelitarnym [87]

Satelity znajdują się na wysokości 780 km, a odległość między nimi wynosi 1000 km, pasmo częstotliwości to 1616 MHz, przepływność łączy międzysatelitarnych to T1 (1544 Mb/s), początkowa stopa błędów i opóźnienie wynoszą 0, komutacja kanałów i pakietów jest dostępna dla łączy system ADS-B–transponder satelitarny Iridium oraz transponder satelitarny Iridium–nadajniko-odbiornik naziemny.

Symulacja transmisji danych

Kwestią szczególnie istotną jest zbadanie zależności pomiędzy czasem przesyłu danych i średnim wykorzystaniem łącza satelita–ziemia w architekturze kanału łączności.

Jak pokazuje tabela, długości czasu przesyłu oraz średnie wykorzystanie łącza są wartościami tego samego rzędu. Zwiększenie długości kanału (porównaj modele 1A3S1G z 1A5S1G, 1ASGS1G z 1ASGSGS1G oraz 1ASCS1G z 1ASCSCS1G) powoduje niewielkie wydłużenie czasu przesyłu, ale nie zmienia średniego wykorzystania łącza.

Kanałem najszybszym jest łącze WLAN typu „bent pipe”, a najwolniejszym – łącze WAN typu „bent pipe”.

Przepływność wszystkich łączy wynosi T1. Do zbadania zależności pomiędzy czasem przesyłu komunikatów a liczbą satelitów w łączu dla kilku statków powietrznych (ilustracja 2.15) wykorzystano modele (1-3)A(1-10) S1G (jeden z nich przedstawia ilustracja 2.15).

W tym przypadku przepływność wszystkich łączy wyniosła T1.

Zakres długości czasu przesyłu jest raczej niewielki (1300–1940 ms) i wskazuje możliwość satelitarnej transmisji danych dla celów zarządzania ruchem lotniczym w czasie rzeczywistym.

Ponieważ w tym przypadku mamy do czynienia z szacunkami na podstawie modelu, bardziej prawidłowo byłoby mówić o względnych zmianach czasu przesyłu podczas transmisji danych, wynikających ze zwiększenia liczby satelitów i statków powietrznych, a nie o wartościach bezwzględnych czasu przesyłu danych.

Kiedy liczba statków powietrznych przesyłających dane równocześnie jednym kanałem łączności satelitarnej do centrów naziemnych wzrasta nadmiernie, mówimy o „nasyconiu” kanału komunikacyjnego, który traci swoją wydolność.

Modelowanie wykazało (ilustracja 2.16), że kanał staje się „nasycony”, kiedy korzysta z niego 13 statków powietrznych.

Oznacza to, że kanał komunikacyjny o danych parametrach (wielkość transakcji – 8 kb zgodnie z prawem rozkładu jednostajnego ciągłego; czas pomiędzy transakcjami – 0,1 s zgodnie z prawem rozkładu wykładniczego; opóźnienie pakietu – 0,02 s zgodnie z prawem rozkładu jednostajnego ciągłego; ryzyko niedostarczenia pakietu – 0,01; szybkość transmisji statku powietrznego/stanowisk naziemnych i anten – 100 kB/s (średnia), przepływność łącza – 1544 Mb/s) może obsłużyć maksymalnie 13 statków powietrznych równocześnie.

Z pewnością jest to liczba niewystarczająca dla celów kontroli lotów.

Należy jednak pamiętać, że jest to jedynie wynik szacunkowy, ważny dla wybranego oprogramowania, modelu oraz parametrów transmisji.

Co więcej, właściwości „silnika obsługującego” oprogramowania NetCracker nie zostały szczegółowo określone i podane są tylko w formie stałego opóźnienia obsługi oraz limitu prędkości bezwzględnej odbierania zgłoszeń. Jednakże osiągnięte wyniki mogą być przydatne w dalszych badaniach.

Zwiększenie liczby satelitów i przepływności łącza wywołuje interesujące skutki (ilustracja 2.18). Można dostrzec znaczącą różnicę pomiędzy sytuacją, w której dane transmitowane są przez pojedynczego satelitę (model 13A1S1G) do naziemnego centrum ATC, a taką, w której przesyłane są przez kilka satelitów. Zwiększenie liczby modeli satelitarnych (13A2S, 13A3S1G, 13A4S1G) pokazuje praktycznie te same zależności między średnim wykorzystaniem łącza i jego przepływnością.

Jednakże w przypadku wykorzystania konstelacji satelitów średnie wykorzystanie łącza satelita–ziemia jest znacznie niższe dla takich samych przepływności łącza.

W doświadczeniu polegającym na modelowaniu transmisji danych za pomocą konstelacji satelitów Iridium rozmieszczonych na niskiej orbicie okołoziemskiej wykorzystano oryginalne modele łączy „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”, stworzone z użyciem oprogramowania NetCracker Professional 4.1.

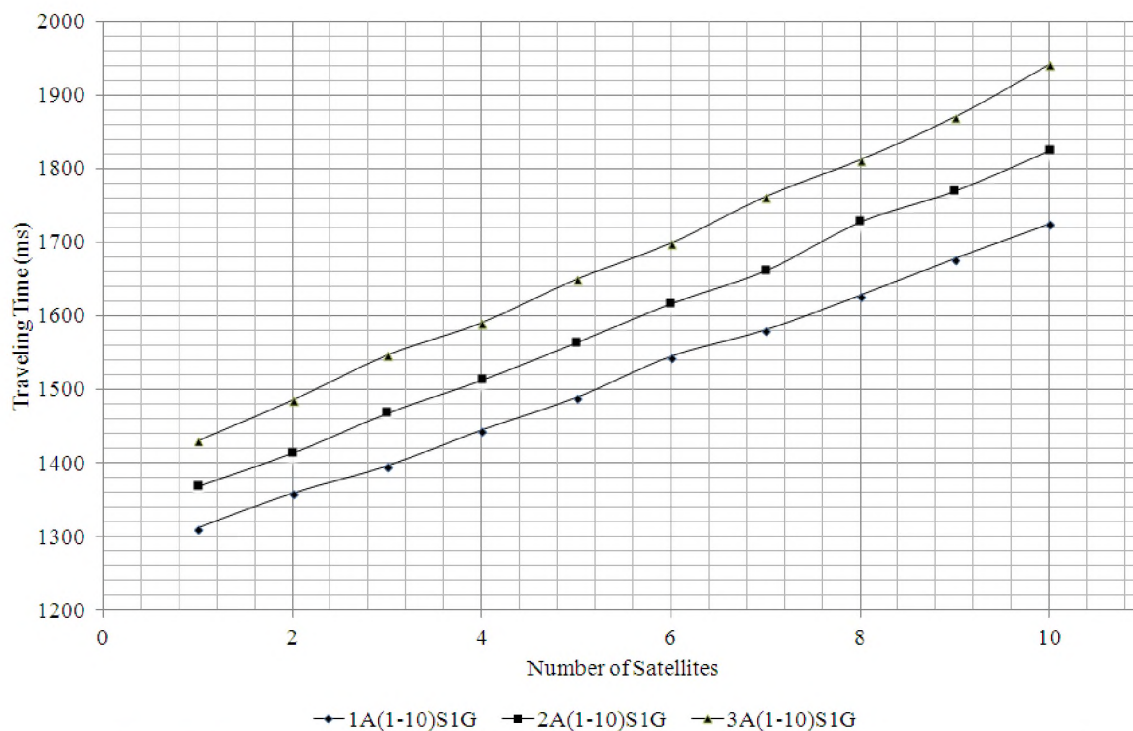
Celem modelowania była ocena wpływu liczby statków powietrznych i satelitów na średnie wykorzystanie łącza satelita–ziemia oraz czas przesyłu komunikatów.

Przeanalizowano kanały łączności z łączem międzysatelitarnym i łączem typu „bent-pipe”.

Badano również efekt „nasylenia” kanału komunikacyjnego podczas równoczesnej transmisji danych przez łącze telekomunikacyjne z większej liczby statków powietrznych [87].

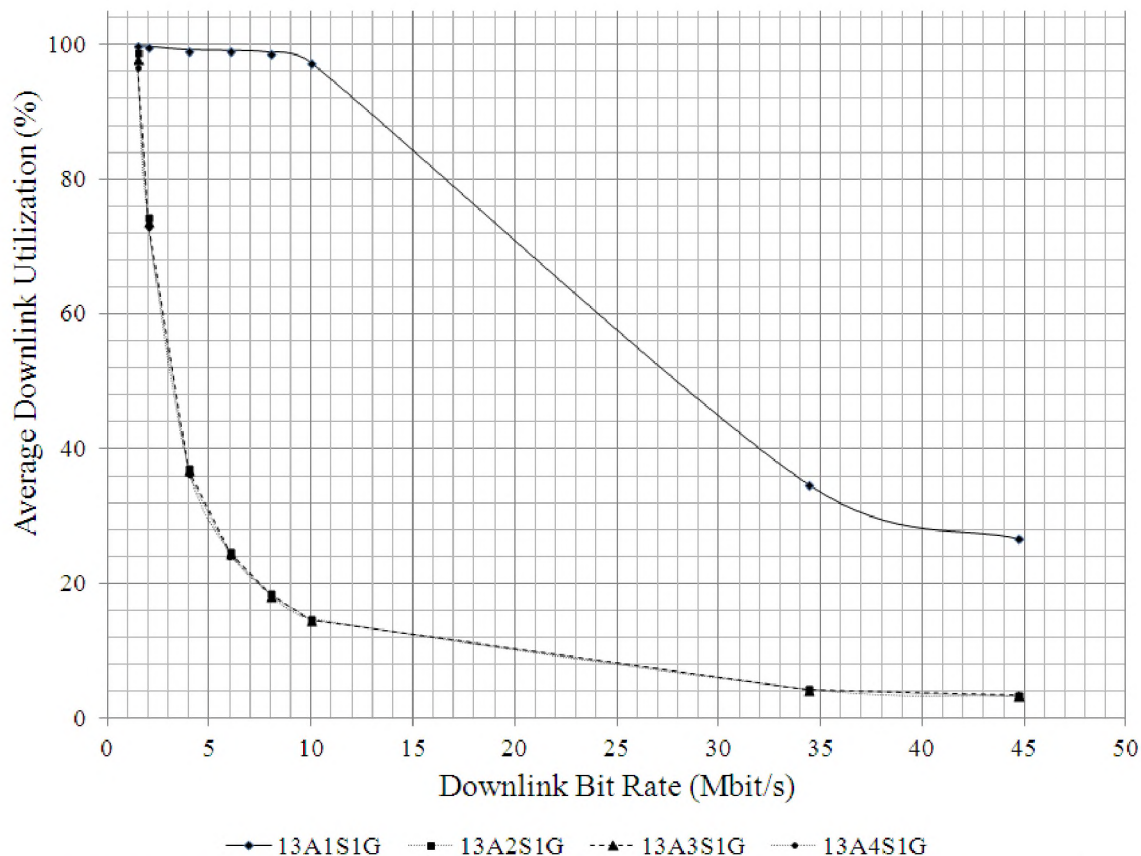
Tabela 2.4. Czasy przesyłu i średnie wykorzystanie łącza dla różnych typów architektury łącza telekomunikacyjnego [87]

Model	Czas przesyłu komunikatu (ms)	Średnie wykorzystanie [%]
1A3S1G (łącze międzysatelitarne)	1 400	48
1ASGS1G (łącze WLAN typu „bent pipe”)	1 355	35
1ASCS1G (łącze WAN typu „bent pipe”)	1 397	47
1A5S1G (łącze międzysatelitarne)	1 489	48
1ASGSGS1G (łącze WLAN typu „bent pipe”)	1 402	35
1ASCSCS1G (łącze WAN typu „bent pipe”)	1 494	47



Travelling time	Czas przesyłu
Number of satellites	Liczba satelitów

Ilustracja 2.17. Zależność czasu przesyłu komunikatów od liczby satelitów [87]



Average downlink utilization	Średnie wykorzystanie łącza
Downlink bit rate	Przepływność łącza

Ilustracja 2.18. Zależność średniego wykorzystania łącza od jego przepływności [87]

2.2.2. Modelowanie transmisji satelitarnej komunikatów ADS-B z wykorzystaniem systemu MIMO

ADS-B to technologia dozoru służąca do śledzenia lotu statków powietrznych, będąca elementem systemu transportu lotniczego nowej generacji [77].

Korzystający z technologii ADS-B piloci i kontrolerzy widzą na ekranie radaru ten sam obraz. Szczególnie obiecujące wydają się rozwiązania ADS-B oparte na systemach satelitarnych umieszczonych na niskiej orbicie okołoziemskiej (Low Earth Orbit, LEO) [94].

Telekomunikacyjne systemy satelitarne są obecnie jednym z powszechnie stosowanych narzędzi łączności w lotnictwie. Ich największymi zaletami są możliwość jednoczesnej obsługi większej liczby statków powietrznych na dłuższych dystansach oraz stały koszt łączności, niezależny od odległości od obsługiwanego statku powietrznego [90, 92].

Podczas komunikacji bezprzewodowej transmitowane sygnały często ulegają osłabieniu i wyciszeniu, ze względu na wielodrogowość kanału, co utrudnia odbiorcy pełne zrozumienie komunikatu.

Wykorzystanie systemu transmisji wieloantennej (wielokrotnego nadawania i odbioru, Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) w komunikacji bezprzewodowej pozwala na zwiększenie wydajności szerokości pasma (widmowej) dla danej całkowitej mocy nadawania w satelitarnej sieci łączności lotniczej.

Zwiększenie możliwości osiągnięte jest dzięki wprowadzeniu dodatkowych kanałów przestrzennych eksploatowanych przy użyciu kodowania czasowo-przestrzennego. MIMO to technologia stosowana w komunikacji bezprzewodowej, która umożliwia znaczącą poprawę

wydajności widmowej systemu, a także zwiększenie maksymalnej prędkości przesyłu danych oraz ogólnej przepustowości sieci.

Głównym sposobem osiągania tych korzyści jest transmisja danych ze źródła do odbiorcy za pośrednictwem kilku połączeń radiowych.

MIMO to technologia przesyłania informacji, która opiera się na zasadzie zwielokrotniania strumieni danych w przestrzeni w jednym kanale łączności. W ten sposób, dzięki wykorzystaniu wielu ścieżek transmisji danych i zwiększeniu różnorodności przestrzennej, osłabienie przesyłanego sygnału jest niewielkie [97, 98].

Główne zalety kanałów MIMO w porównaniu z kanałami pojedynczego nadawania i odbioru (Single-Input-Single-Output, SISO) to wzmocnienie siły sygnałów, zwiększenie różnorodności oraz poprawa funkcjonalności systemu.

Wzmocnienie siły sygnałów to poprawa stosunku sygnału do zakłóceń i szumu w kanale łączności (SINR), osiągnięta dzięki łączeniu wielu ścieżek przesyłu pomiędzy licznymi nadajnikami i odbiornikami, którą wyraźnie pokazują zmiany przebiegu krzywej stopy błędów (Bit Error Rate, BER), spowodowane wzrostem SINR [88, 96].

Zwiększenie różnorodności oznacza poprawę niezawodności łącza uzyskiwaną dzięki przesyłaniu kopii informacji przez niezależnie funkcjonujące łącza, odgałężenia lub ścieżki.

Pokazuje je ostry spadek widoczny w dolnej części krzywej BER.

Atrakcyjną techniką łączności bezprzewodowej w systemie MIMO jest ortogonalne kodowanie bloków czasoprzestrzennych (Orthogonal Space-Time Block Codes, OSTBCs).

Wykorzystuje ona pełny zakres różnorodności przestrzennej oraz metodę dekodowania maksymalnego prawdopodobieństwa z wykorzystaniem symboli.

Sumator OSTBC po stronie odbiorcy dostarcza informacji na temat przesyłanych symboli, które mogą następnie służyć do odkodowywania lub demodulacji zewnętrznego kodu [88, 91].

Jednostka antenowa MIMO to specjalnie dostosowana antena adaptacyjna (AAA).

Technologia AAA wskazuje na zastosowanie inteligentnych algorytmów do przetwarzania sygnałów cyfrowych. Algorytmy te dzielą sygnały zgodnie z ich wektorami rozchodzenia.

Następnie dostosowują do nich charakterystykę promieniowania anten nadawczych.

Powszechne zastosowanie urządzeń MIMO zmieniło zasadniczo sposób bezprzewodowej transmisji danych na całym świecie, ponieważ umożliwiło znaczące zwiększenie prędkości i zasięgu kanałów komunikacyjnych, bez potrzeby zwiększania mocy samych nadajników.

Wydajność tej technologii jest tym wyższa, im niższa jest korelacja sygnałów na antenie.

Celem niniejszego rozdziału jest:

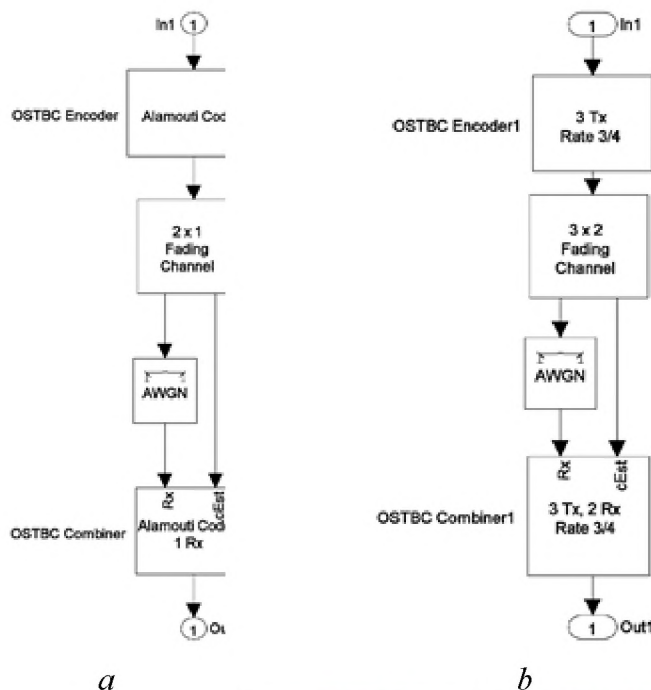
- 1) stworzenie modeli kanału lotniczej łączności satelitarnej w systemie MIMO „statek powietrzny – satelita – stacja naziemna”, za pomocą oprogramowania MATLAB Simulink;
- 2) analiza słabnięcia sygnału w łączach „w górę” i „w dół” kanału MIMO, wykorzystującego zróżnicowane anteny;
- 3) porównanie wyników z łączami „w górę” i „w dół” kanałów AGWN;
- 4) zbadanie, na podstawie stworzonych modeli, integralności kanałów oraz zależności pomiędzy stopą błędów (BER) a współczynnikiem E_b/N_0 .

Model łącza „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

Nasz model składa się z następujących elementów: nadajnika pokładowego (źródło danych – generator binarny Bernoullego, modulator M-PSK, wzmacniacz mocy), łącza „w górę/w dół” (MIMO 2×1 (ilustracja 2.19a), 3×2 (ilustracja 2.19b) kanały „w górę/w dół” wykorzystujące zróżnicowane anteny, a także kanały „w górę/w dół” z addytywnym białym szumem gaussowskim

bez zróżnicowanych anten), transpondera satelitarnego (blok temperatury szumowej, wzmacniacz złożonego pasma podstawowego z szumem, blok szumu fazowego) oraz odbiornika w stacji naziemnej (blok temperatury szumowej, demodulator M=PSK), bloku i ekranu obliczania stopy błędu (ilustracja 2.20).

Symulacja przeprowadzona na potrzeby niniejszego rozdziału objęła jedynie schematy modulacji BPSK i QPSK.



Wejście 1		Wejście 1	
Koder	1 Alamoutiego	Koder	3 Tx
O		OSTBC	Współczynnik
S		1	3/4
T			
B			
C			
Kanał zanikający 2 x 1		Kanał zanikający 3 x 2	
AWGN		AWGN	
umator	K od	umator	3 Tx, 2 Rx
OSTBC	Alamoutiego	OSTBC	Współczynnik
	1 Rx	1	3/4
Wyjście 1		Wyjście 1	

Ilustracja 2.19. Kanał MIMO 2x1 (a), kanał MIMO 3x2 (b)

BER (stopa błędów) została obliczona jako funkcja współczynnika E_b/N_0 (oznaczającego stosunek energii na jeden bit do gęstości widmowej mocy szumu).

Wartość współczynnika E_b/N_0 była zmieniana symetrycznie we wszystkich kanałach z łączami „w górę” i „w dół”. Temperatura szumowa w transponderze satelitarnym oraz odbiorniku w stacji naziemnej została ustalona na poziomie 290 K (typowym dla szumu).

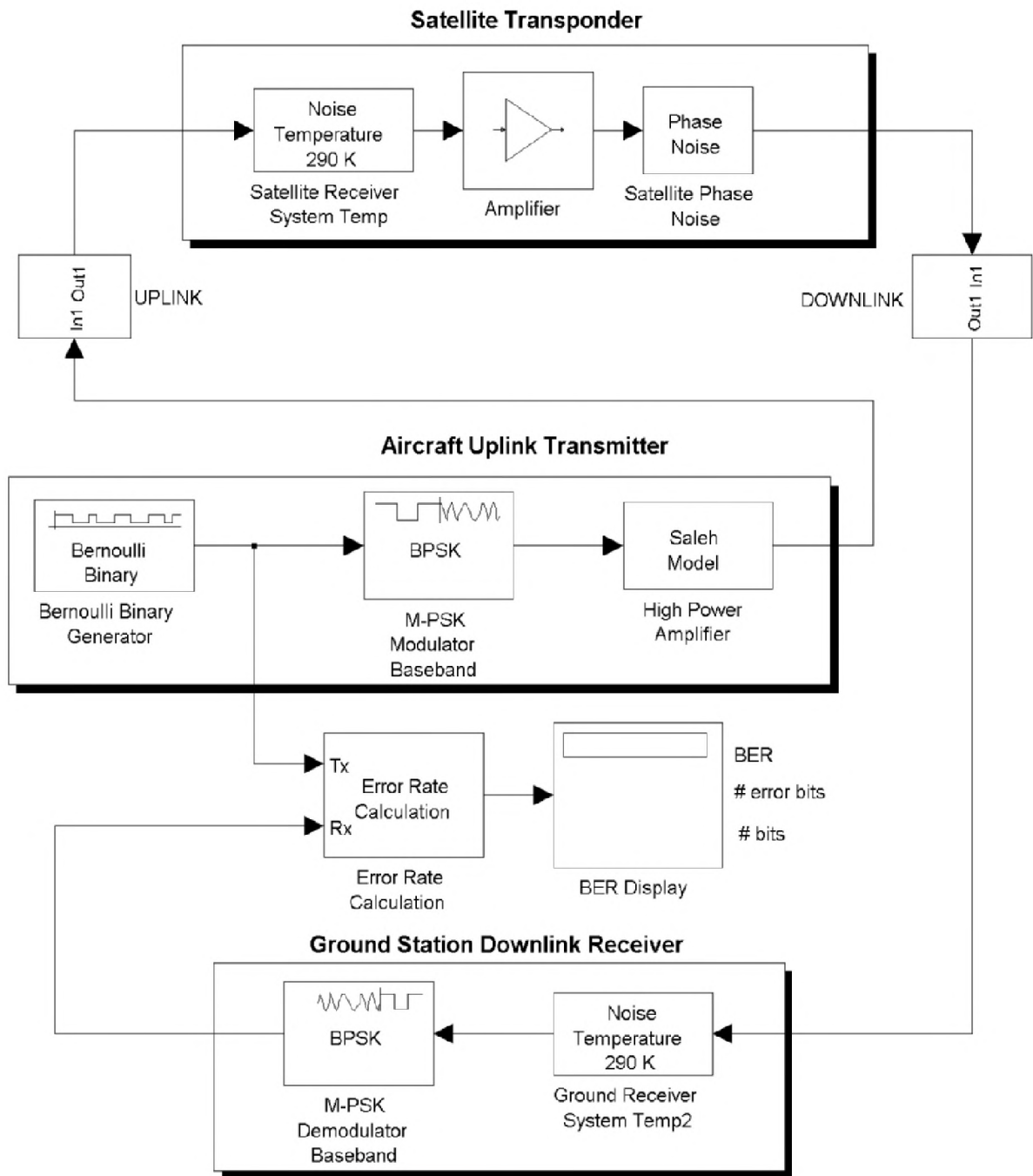
Blok wzmacniacza mocy wykorzystuje nieliniowość bezpamięciową do wzmacniania złożonych sygnałów w paśmie podstawowym i oferuje pięć różnych metod modelowania nieliniowości.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostały jedynie wyniki dla modelu Saleha o standardowych parametrach AM/AM i AM/PM [95].

Wartość back-off (dopuszczalna nieliniowość) wzmacniacza satelitarnego pokazuje poziom jego nasycenia i określa jego punkt pracy.

W celu określenia wielkości wzmocnienia sygnału wejściowego i wyjściowego bloku nieliniowości bezpamięciowej wartość back-off określono na poziomie 30 dB, co oznacza, że średnia moc sygnału wejściowego jest o 30 decybeli niższa od mocy wejściowej powodującej nasycenie wzmacniacza (w takim przypadku konwersja AM/AM i AM/PM jest dopuszczalna).

Blok wzmacniacza złożonego pasma podstawowego w transponderze satelitarnym generuje złożony model pasma podstawowego wzmacniacza z szumem termalnym. Symuluje również model Saleha o określonej nieliniowości dopuszczalnej.



Transponder satelitarny				
	Temperatura szumowa 290 K		Szum fazowy	
	Temperatura układu odbiornika satelitarnego	Wzmacniacz	Satelitarny шум fazowy	
Wejście 1 Wyjście 1	ŁĄCZE „W GÓRĘ”		ŁĄCZE „W DÓŁ”	Wyjście 1 Wejście 1
Nadajnik pokładowy				
Binarny kod Bernoulliego	BPSK	Model Saleha		
Generator binarnego kodu Bernoulliego	Modulator pasma podstawowego M-PSK	Wzmacniacz wysokiej mocy		

	Tx Obliczanie stopy błędu		BER błędne bity
	Rx Obliczanie stopy błędu	Ekran BER	bity
Odbiornik w stacji naziemnej			
	BPSK	Temperatura szumowa 290 K	
	Demodulator pasma podstawowego M-PSK	Temperatura układu odbiornika naziemnego 2	

Ilustracja 2.20. Łącze „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

Blok szumu fazowego dodaje szumu fazowego do sygnału w złożonym paśmie podstawowym. Odbywa się to w następujący sposób: blok szumu fazowego generuje addytywny szum gaussowski i filtruje go z wykorzystaniem filtra cyfrowego, a następnie dodaje uzyskany szum do składnika kąтового sygnału wejściowego.

Poziom widma określony jest przez moc szumu zawartą w paśmie jednego Hertza z pewnym przesunięciem częstotliwości fali nośnej.

Modelowanie przeprowadzono dla dopuszczalnego poziomu szumu fazowego (poziom szumu fazowego: -100 dBc/Hz, przesunięcie częstotliwości: 0 Hz).

Blok kodera OSTBC koduje sekwencję symboli przychodzących z wykorzystaniem ortogonalnych kodów bloków czasoprzestrzennych (OSTBC).

Blok mapuje symbole blokowo i tworzy wychodzące macierze kodowe w określonym czasie.

Kanał MIMO 2×1 w górę/w dół wykorzystuje dwie anteny nadawcze i jedną antenę odbiorczą.

Kanał MIMO 3×2 w górę/w dół wykorzystuje trzy anteny nadawcze i dwie anteny odbiorcze.

Kanały zanikające 2×1 i 3×2 wykorzystują blok wielodrogowego zanikającego kanału Rayleigha do symulacji kanału Rayleigha z zanikiem płaskim z jednej anteny nadawczej do anteny odbiorczej.

Maksymalną wartość parametrów efektu Dopplera dla bloków wielodrogowego zanikającego kanału Rayleigha określono na 1 Hz.

Wyznaczenie tej wartości na takim poziomie powoduje, że kanał MIMO zachowuje się jak quasi-statyczny kanał zanikający, tzn. pozostaje stały podczas transmisji jednej ramki danych, a zmienia się w przypadku przesyłu większej liczby ramek.

Początkowe parametry ziaren bloków wielodrogowego zanikającego kanału Rayleigha otrzymały różne wartości, by zasymulować zachowania niezależnych podkanałów zanikających.

Wszystkie podkanały mają znormalizowane wzmocnienie.

Blok kanału AWGN dodaje biały szum gaussowski po stronie odbiornika.

Parametry trybu ustawiono w trybie współczynnika E_b/N_0 , liczba bitów na symbol wynosi 1, moc sygnału wejściowego, przy oporze na poziomie 1 Ohma, wynosi 1 wat, a okres symbolu to 1 sekunda.

Blok sumatora OSTBC łączy sygnał wejściowy (ze wszystkich anten odbiorczych) z szacowanym sygnałem w kanale, by wydobyć informacje zawarte w symbolach zakodowanych za pomocą OSTBC.

Symulacja lotniczych kanałów satelitarnych MIMO

Modelowanie objęło dwa typy kanałów: kanały zanikające w górę/w dół MIMO 2×1 i MIMO 3×2 . Uzyskane w wyniku badania zależności BER od współczynnika E_b/N_0 dla tych kanałów porównano z zależnościami dla kanałów SISO – kanałów AWGN w górę/w dół (ilustracja 2.21).

Zależności te pozwalają wyjaśnić wpływ każdego z rodzajów kanałów na prawdopodobieństwo wystąpienia błędów podczas transmisji.

Schemat Alamoutiego zapewnia duże zróżnicowanie sygnałów oraz szybką transmisję danych, wprowadzając ortogonalność fazy między równoległe nadawanymi sygnałami oraz parami sygnałów emitowanych kolejno przez każdą antenę. Uogólnienie tego kodu w przypadku większej liczby anten nadawczych doprowadziło do stworzenia kolejnych kodów.

Na ilustracji 2.21a porównano zależności pomiędzy prawdopodobieństwem błędu w schemacie modulacji BPSK a współczynnikiem E_b/N_0 dla kanałów MIMO 2×1 i AWGN.

Dla małych wartości współczynnika E_b/N_0 kanały MIMO 2×1 w górę/w dół dają niższe wartości BER, ale dla $E_b/N_0 > 16$ dB kanały AWGN w górę/w dół dają niższe wartości BER.

Na ilustracji 2.21b porównano zależności pomiędzy prawdopodobieństwem błędu dla schematu modulacji QPSK a współczynnikiem E_b/N_0 dla kanałów MIMO 2×1 i AWGN.

W takim przypadku sytuacja jest podobna – dla $E_b/N_0 > 22$ dB kanały AWGN w górę/w dół dają niższe wartości BER.

Technologia MIMO oznacza transmisję sygnału jednym kanałem, ale z wykorzystaniem większej liczby nadajników i odbiorników.

Im więcej wykorzystujemy anten nadawczych i odbiorczych, tym bardziej zwiększa się produktywność i efektywność kanału.

W kanałach MIMO 3×2 stosujemy 3 anteny nadawcze i 2 anteny odbiorcze.

Dzięki takiej „kompresji” przepustowość kanału może wzrosnąć dwukrotnie lub bardziej.

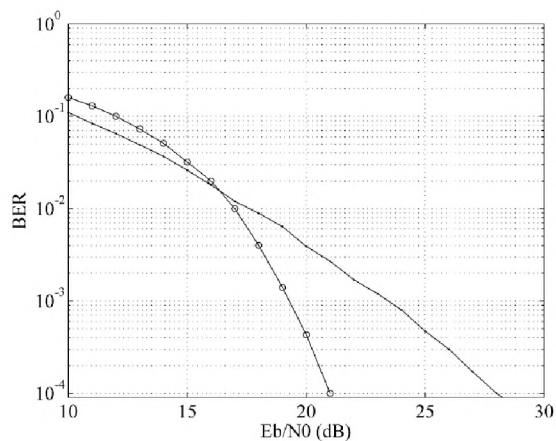
Na ilustracji 2.21c porównano zależności pomiędzy prawdopodobieństwem błędu dla schematu modulacji BPSK a współczynnikiem E_b/N_0 dla kanałów MIMO 3×2 i AWGN.

W tym przypadku sytuacja jest nieco inna. W całym zakresie zmian współczynnika E_b/N_0 kanał MIMO 3×2 pokazuje niższe wartości BER.

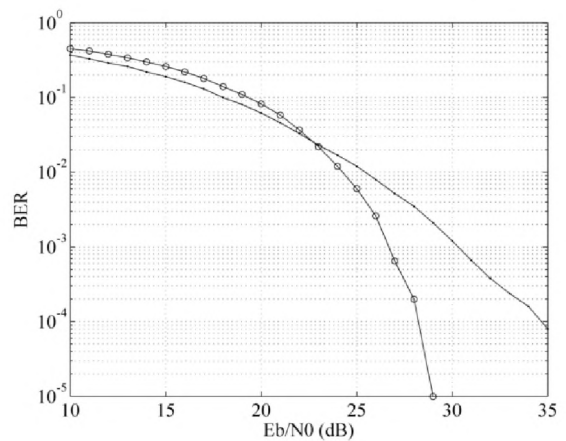
Na ilustracji 2.21d porównano zależności między prawdopodobieństwem błędu dla schematu modulacji QPSK i współczynnikiem E_b/N_0 dla kanałów MIMO 3×2 i AWGN.

Charakter zależności jest w tym przypadku podobny do tej przedstawionej na ilustracji 2.21c.

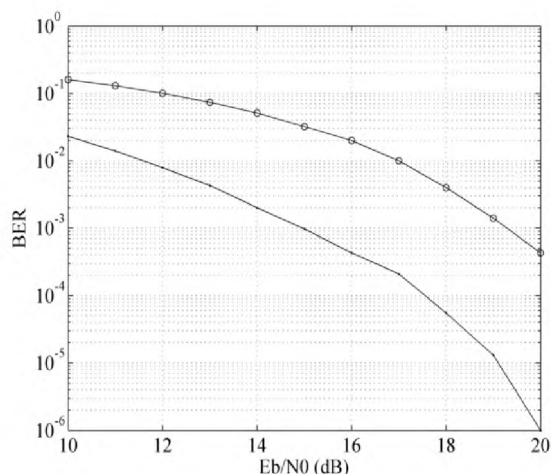
Temperatury szumowe w odbiornikach satelitarnych i naziemnych w sytuacjach przedstawionych na ilustracji 2.21 wynoszą 290 K, poziom backoff to 30 dB, przesunięcie fazy i częstotliwości równa się zero, a szum fazowy transpondera satelitarnego mieści się w dopuszczalnym zakresie.



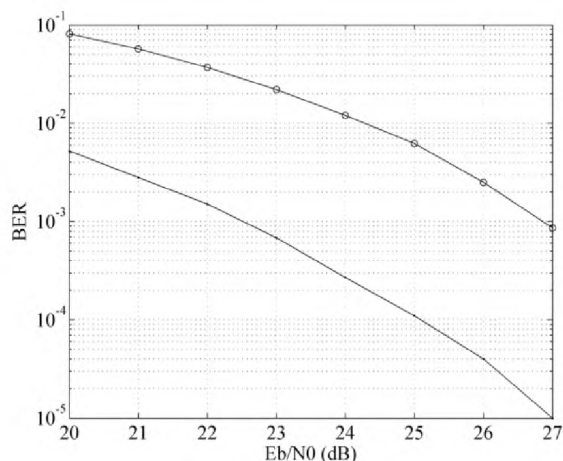
a



b



c



d

Ilustracja 2.21. Zależność pomiędzy prawdopodobieństwem błędów dla schematów modulacji BPSK (a, c) i QPSK (b, d) a współczynnikiem E_b/N_0 w kanałach w górę/ w dół [99]:

a, b: kropki – kanały MIMO 2×1, kółka – kanały AWGN;

c, d: kropki – kanały MIMO 3×2, kółka – kanały AWGN.

Po sporządzeniu i analizie modelu spróbujemy oszacować, na ile zmniejsza się stopa błędów (BER) w kanałach MIMO w porównaniu z kanałami SISO AWGN.

Z ilustracji 2.21 wynika, że:

$$\Delta BER_{BPSK}(AWGN - MIMO 2 \times 1) = 0,050,$$

$$\text{dla } E_b/N_0 = 10 \text{ dB};$$

$$\Delta BER_{QPSK}(AWGN - MIMO 2 \times 1) = 0,080,$$

$$\text{dla } E_b/N_0 = 10 \text{ dB};$$

$$\Delta BER_{BPSK}(AWGN - MIMO 3 \times 2) = 0,0043,$$

$$\text{dla } E_b/N_0 = 20 \text{ dB};$$

$$\Delta BER_{QPSK}(AWGN - MIMO 3 \times 2) = 0,077,$$

$$\text{dla } E_b/N_0 = 20 \text{ dB};$$

Uzyskane wyniki pokazują, że redukcja BER jest znacząca. Warto również zwrócić uwagę na fakt, iż w przypadku modulacji QPSK spadek BER jest większy, niż w przypadku modulacji BPSK.

W doświadczeniu stworzono oryginalny model lotniczego kanału łączności satelitarnej MIMO „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”.

Model został użyty do symulacji transmisji danych ze statku powietrznego do stacji naziemnej za pośrednictwem satelity, przez kanały MIMO 2×1 i 3×2 z wykorzystaniem zróżnicowanych anten.

Na podstawie modelu dokonano oceny integralności kanałów oraz zależności pomiędzy stopą błędów i współczynnikiem E_b/N_0 [99].

2.2.3. Kodowanie korekcyjne komunikatów ADS-B dla satelitów Iridium

W dniu 20 czerwca 2012 r. operator satelitarnej Iridium podjął decyzję o instalacji odbiorników automatycznego zależnego dozoru-rozgłaszania (ADS-B) w swoich satelitach nowej generacji, by umożliwić służbom żeglugi powietrznej dozoru statków powietrznych w czasie rzeczywistym w skali globalnej [100]. Ten nowy system satelitarnej umożliwi stałe monitorowanie i kontrolę statków powietrznych przy użyciu odbiorników ADS-B klasy kosmicznej

działających na częstotliwości 1090 MHz w technologii rozszerzony squitter (extended squitter, ES), zainstalowanych na każdym z 66 satelitów serii Iridium Next, tworzących konstelację nowej generacji. Firma planuje wprowadzenie nowych satelitów na orbitę w okresie 2015–2017, a system ma osiągnąć pełną zdolność operacyjną, obejmującą obsługę łączności lotniczej, właśnie w 2017 r.

ADS-B w ogromnym stopniu poprawia bezpieczeństwo lotnictwa w skali globalnej. Wykorzystujący to rozwiązanie piloci i kontrolerzy widzą ten sam obraz na ekranie radaru. ADS-B składa się z dwóch odrębnych usług – „ADS-B In” oraz „ADS-B Out”. W systemie ADS-B statek powietrzny odbiera informacje za pomocą podsystemu ADS-B In, w którym na ekranie monitora wyświetlane są wszystkie statki powietrzne znajdujące się w danym obszarze, nawet takie, które same nie są wyposażone w tę technologię. Informacje na temat pozycji statków powietrznych aktualizowane są co sekundę. Telekomunikacyjne systemy satelitarne są obecnie jednym z powszechnie stosowanych narzędzi łączności w lotnictwie. [101, 103, 104, 105]. Ich największymi zaletami są możliwość jednoczesnej obsługi większej liczby statków powietrznych na dłuższych dystansach oraz stały koszt łączności, niezależny od odległości od obsługiwanego statku powietrznego.

Efektywność łącza satelitarnego zależy w bardzo dużym stopniu od jego parametrów i nawet drobne zmiany tych parametrów mogą wpływać na szybkość przepływu danych oraz zasięg całego systemu.

Dlatego właśnie ważne jest tworzenie modeli rzeczywistych satelitarnych kanałów łączności i analiza sposobów korygowania błędów oraz sytuacji krytycznych.

Brama sieciowa (*gateway*) może służyć również jako *gateway* lotniczej sieci telekomunikacyjnej (ATN) używany do przesyłania komunikatów ATN ze statku powietrznego do odpowiednich jednostek kontroli lotów (ATC) lub lotniczej kontroli operacyjnej (AOC) i z powrotem.

Kanały w sieci satelitarnej Iridium wykorzystują hybrydową architekturę wielodostępu z podziałem czasowym/wielodostępu z podziałem częstotliwości (Time Division Multiple Access/Frequency Division Multiple Access, TDMA/FDMA), opartą na metodzie Time Division Duplex (TDD) ze szczelinami czasowymi o długości 90 milisekund.

System Iridium wykorzystuje modulację fazy z czterowartościowym kodowaniem danych (Quadrature Phase Shift Key, QPSK) oraz metodę kodowania korekcyjnego (Forward Error Correction Coding, FECC), w formie kodowania splotowego i dekodowania na podstawie algorytmu Viterbiego [108]. System Iridium stosuje kod splotowy o współczynniku 3/4 i ograniczonej długości 7 ($r = 3/4$; $K = 7$), zarówno do nadawania, jak i odbioru. Dopuszczalne prędkości transmisji dla głosu (danych) wynoszą odpowiednio 4,8 kb/s (2,4 kb/s).

Celem niniejszego rozdziału jest:

1) stworzenie modelu kanału łączności „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”, o parametrach systemu Iridium, z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink [102];

2) analiza, na podstawie tego modelu, integralności kanału oraz zależności pomiędzy stopą błędów (BER) i typem kodowania/dekodowania sygnału, współczynnikiem E_b/N_0 , szybkością przesyłu danych oraz wzmocnieniem wzmacniacza satelitarnego.

Model łącza „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

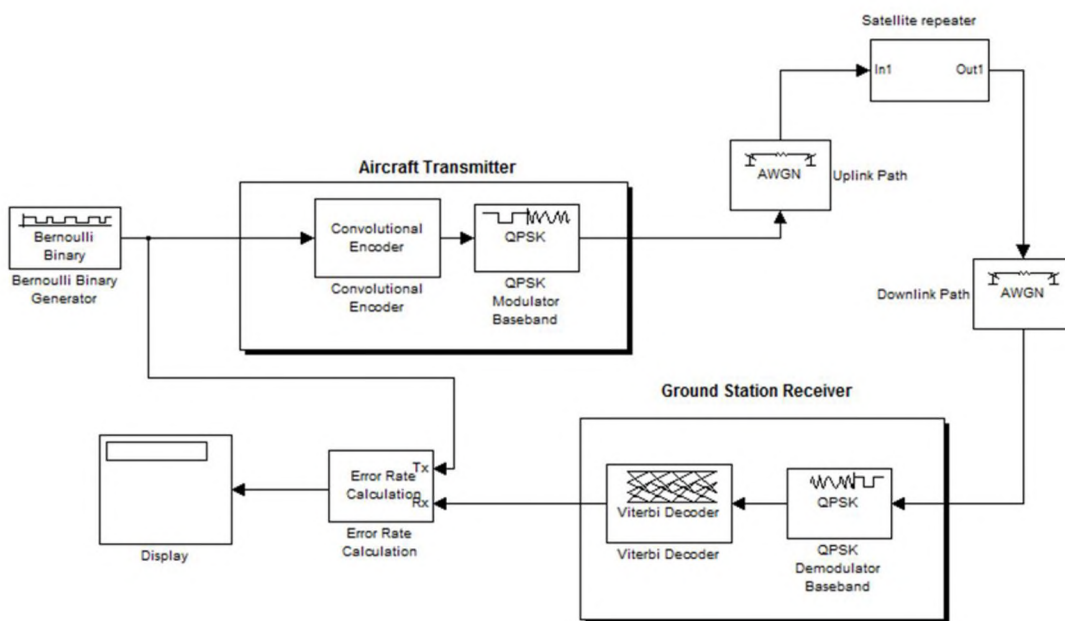
Nasz model składa się z następujących elementów: źródła danych (generatora kodu binarnego Bernoulliego), nadajnika pokładowego w statku powietrznym (modulator z koderem kodu splotowego lub bez niego), ścieżki „w górę” (kanał AWGN), wzmacniacza satelitarnego (wzmacniająca antena odbiorcza, wzmacniacz złożonego pasma podstawowego z szumem, wzmacniająca antena nadawcza), ścieżki „w dół” (kanał AWGN), odbiornika w stacji naziemnej

(demodulator z dekodery Viterbiego lub bez niego) oraz bloku i ekranu obliczania stopy błędów (ilustracja 2.22).

Blok wzmacniacza złożonego pasma podstawowego w transponderze satelitalnym generuje złożony model pasma podstawowego wzmacniacza z szumem termalnym. Symuluje on wzmacniacz liniowy i umożliwia sprecyzowanie parametrów szumu (temperatura szumowa – określa wielkość szumu w Kelvinach; współczynnik szumów – określa wielkość szumu za pomocą następującego równania: współczynnik szumów = $1 + \text{temperatura szumowa}/290$).

Niniejszy rozdział opisuje symulację wyłącznie dla schematu modulacji QPSK. Dla modulacji QPSK obliczono stopę błędów (BER) dla transmisji z wykorzystaniem kodowania splotowego i bez niego, jako funkcję współczynnika E_b/N_0 . Wartość współczynnika E_b/N_0 była zmieniana symetrycznie dla kanałów AWGN „w górę” i „w dół”. Wszystkie obliczenia były wykonywane dla wzmocnienia anteny odbiorczej/nadawczej o wartości całkowitych jednostek.

System Iridium tworzy 66 satelitów LEO rozmieszczonych na sześciu orbitach okołozemskich, na wysokości 785 km [82]. Orbyty mają kształt okręgu i kąt nachylenia $86,4^\circ$ [106]. Każdy z satelitów komunikuje się poprzez AES. Każdy również wykorzystuje trzyfazowe układy antenowe do połączeń z użytkownikami, wyposażone w zestawy modułów nadawczo-odbiorczych. Zestawy te umożliwiają połączenia z użytkownikami w paśmie 1616–1626,5 MHz. Brama sieciowa łączy sieć satelitów Iridium z naziemnymi sieciami komunikacyjnymi, np. publicznymi sieciami telefonicznymi (PSTN), czy publicznymi sieciami transmisji danych (PSDN) i umożliwia komunikację pomiędzy antenami naziemnymi oraz antenami nadawczymi i odbiorczymi zainstalowanymi na satelicie.



			Wzmacniacz satelitalny		
Nadajnik pokładowy			AWGN	Ścieżka „w górę”	Wyjście 1
Binarny kod Bernoulliego	Koder splotowy	QPSK		Ścieżka „w dół”	AWGN
Generator binarnego kodu Bernoulliego	Koder splotowy	Modulator pasma podstawowego			
			Odbiornik w stacji naziemnej		
		Tx	Dekoder Viterbiego	QPSK	

	Obliczanie stopy błędu	Rx	
Monitor	Obliczanie stopy błędu	Dekoder Viterbiego	Demodulator pasma podstawowego QPSK

Ilustracja 2.22. Łącze „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

Przyjęta wartość współczynnika szumów wzmacniacza złożonego pasma podstawowego to 2 (290 K – typowy poziom szumu). Analizując efekty kodowania dla różnych typów modulacji, przyjęliśmy wzmocnienie satelitowego wzmacniacza liniowego o wartości całkowitych jednostek.

Stworzone modele umożliwiają również badanie zależności pomiędzy stopą błędów (BER) a wzmocnieniem transpondera satelitarnego w przypadku kodowania i bez niego i podczas modelowania określono taką zależność dla modulacji QPSK.

Symulacja lotniczego kanału satelitarnego

W modelowaniu wykorzystano następujące parametry systemu Iridium: modulacja QPSK, kodowanie korekcyjne w formie kodowania splotowego i dekodowania Viterbiego, kod splotowy o współczynniku 3/4 i ograniczonej długości 7 stosowany w nadawaniu i odbiorze.

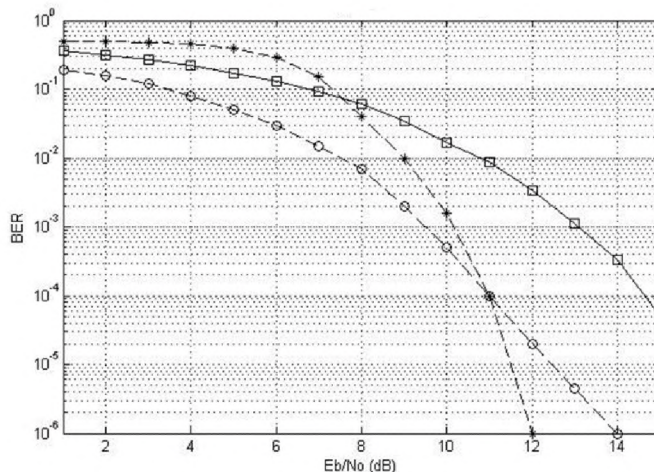
Źródło (generator binarnego kodu Bernoulliego) generuje losowe liczby binarne. Transmituje dane w formie ramek, z prawdopodobieństwem zero 0,5, ziarnem początkowym 61, czasem próbki 1 i 1 próbką na ramkę danych.

Koder splotowy koduje dane binarne. Dekoder wykorzystuje algorytm Viterbiego do odkodowania zakodowanych splotowo danych wejściowych. Koder splotowy i dekodek Viterbiego tworzą strukturę kratową (trellis structure) – poly2trellis (7, [171 133]) i w trybie pracy ciągłej. Funkcja poly2trellis pozwala stworzyć diagram kratowy, wykorzystujący ograniczoną długość, generator kodu (ósemkowy) i połączenie zwrotne (ósemkowe). Funkcja poly2trellis przyjmuje wielomianowy opis kodera splotowego i zwraca odpowiadający mu opis struktury kratowej. Produktem poly2trellis jest parametr maski wykorzystywany przez dekodek Viterbiego.

Funkcja poly2trellis (ograniczona długość, generator kodu) przeprowadza wstępną konwersję współczynnika k/n dla kodera. Ograniczona długość to wektor $1\text{-do-}k$ (7), który określa opóźnienie wejściowych strumieni bitów kodera. Generator kodu to macierz $k \times n$ [171 133] liczb ósemkowych, która wskazuje n połączeń wyjściowych dla każdego z k wejściowych strumieni bitów kodera.

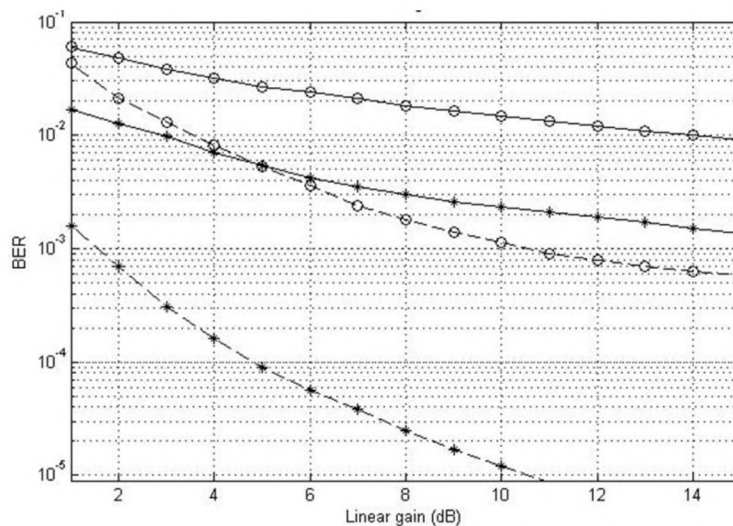
Wyniki symulacji zostały przedstawione na ilustracjach 2.23 i 2.24. Najpierw porównamy wartości stopy błędów (BER) dla różnych typów kodowania.

Ilustracja 3 pokazuje, że dla niskich wartości E_b/N_0 (do 10 dB) kodowanie cykliczne jest bardziej efektywne niż kodowanie splotowe. Jednak dla E_b/N_0 wyższego niż 11 bardziej efektywne jest kodowanie splotowe.



Ilustracja 2.23. Wyniki kodowania [109]:
 linia ciągła (kwadraty) – QPSK bez kodowania;
 linia przerywana (kółka) – QPSK z kodowaniem Hamminga (7, 4), $t = 1$;
 linia przerywana (gwiazdki) – QPSK z kodowaniem splotowym (współczynnik 3/4)

Badanie zależności BER od wzmocnienia transpondera satelitarnego z kodowaniem i bez kodowania przeprowadzono dla dwóch wartości współczynnika E_b/N_0 (8 dB i 10 dB) w łączach „w górę” i „w dół”, przy wzmocnieniu anteny nadawczej/odbiorczej równym całkowitej jednostce i wartości współczynnika szumów we wzmacniaczu złożonego pasma podstawowego wyznaczonej jako 2 (ilustracja 2.24). W przypadku QPSK spadek BER jest większy dla wyższych wartości współczynnika E_b/N_0 (porównaj odpowiednio górny wykres dla $E_b/N_0 = 8$ dB i dolny wykres dla $E_b/N_0 = 10$ dB na ilustracji 2.24).



Linear gain	Wzmocnienie liniowe
-------------	---------------------

Ilustracja 2.24. Wpływ wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na QPSK [109]:
 linia ciągła (kółka) – QPSK bez kodowania dla $E_b/N_0 = 8$ dB;
 linia przerywana (kółka) – QPSK z kodowaniem splotowym (współczynnik 3/4) dla $E_b/N_0 = 8$ dB;
 linia ciągła (gwiazdki) – QPSK bez kodowania dla $E_b/N_0 = 10$ dB;
 linia przerywana (gwiazdki) – QPSK z kodowaniem splotowym (współczynnik 3/4) dla $E_b/N_0 = 10$ dB

Zbadaliśmy wyniki kodowania dla różnych współczynników i otrzymaliśmy te same wykresy

BER dla współczynników kodowania 3/4 i 1/2.

Ważne było dla nas również przeanalizowanie transmisji informacji przy różnych prędkościach przesyłu danych. Modelowanie z użyciem generatora binarnego kodu Bernoulliego przy różnych prędkościach przesyłu i różnych czasach próbkowania pokazało, że tego typu manipulacje nie mają wpływu na wartość stopy błędów.

W doświadczeniu opartym na symulacji transmisji komunikatów ADS-B z wykorzystaniem konstelacji satelitów Iridium umieszczonych na niskiej orbicie okołoziemskiej stworzono model kanału łączności „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna” z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink.

Model umożliwił zbadanie zależności stopy błędów od typu kodowania sygnałów oraz wzmocnienia wzmacniacza satelitarnego.

Stworzony model może zostać wykorzystany do analizy łączności pomiędzy dwoma statkami powietrznymi i stacjami naziemnymi za pośrednictwem większej liczby satelitów.

Model może służyć również jako narzędzie wyznaczania optymalnych metod kodowania korekcyjnego oraz oceny integralności kanałów [109].

2.2.4. Badanie wpływu schematów modulacyjnych i nieliniowości nadajników na transmisję komunikatów ADS-B przez łącze satelitarne OFDM

Najważniejszym składnikiem satelitarnych systemów telekomunikacyjnych są konstelacje sztucznych satelitów przekazujących sygnały analogowe i cyfrowe, transmitujące dźwięki, obrazy oraz dane, zapewniające tym samym łączność pomiędzy różnymi punktami na powierzchni Ziemi i statkami powietrznymi.

Systemy satelitarne zapewniają bezpieczną i niezbędną komunikację oraz żeglugę, dostęp do informacji meteorologicznych, a także możliwość przesyłania obrazów na całym świecie.

Dzisiaj zwiększenie ruchu wokół lotnisk jest utrudnione z uwagi na fakt, iż proces określania współrzędnych obiektu i wyświetlania tej informacji na ekranie radaru zajmuje od 6 do 12 sekund, a w tym czasie śledzony statek powietrzny zmienia już swoją pozycję. Dlatego chcąc zapewnić pełne bezpieczeństwo lotu, kontrolerzy muszą utrzymać określone odstępy czasowe pomiędzy startującymi i lądującymi samolotami, co uniemożliwia pełne wykorzystanie możliwości infrastruktury lotniskowej.

Rozwiązaniem spełniającym rosnące wymagania dotyczące wydajności są coraz częściej wykorzystywane nowoczesne technologie komputerowe i satelitarne, łączy danych oraz urządzenia pokładowe.

Dnia 7 lutego 2012 r. Kongres Stanów Zjednoczonych przyjął ustawę o wyposażeniu cywilnych statków powietrznych oraz naziemnych stacji komórkowych w technologię Global Positioning System (GPS), umożliwiającą utrzymanie łączności w systemie ADS-B, który ma zastąpić radary stosowane obecnie w systemie kontroli ruchu lotniczego.

W dniu 20 czerwca 2012 r. operator satelitarny Iridium zdecydował, że począwszy od 2015 r., będzie instalował odbiorniki ADS-B w swoich satelitach nowej generacji, by umożliwić służbom żeglugi powietrznej dozоровanie statków powietrznych w czasie rzeczywistym w skali globalnej [79].

ADS-B to system komunikacji pomiędzy statkami powietrznymi, a także pomiędzy statkami powietrznymi i urządzeniami naziemnymi. Oba te rodzaje łączności są niezbędne dla zapewnienia bezpieczeństwa transportu i efektywności w zakresie wykorzystania paliwa i czasu, a także ograniczania emisji CO₂.

ADS-B, stworzone, by ułatwić działania związane z kontrolą lotów (Air Traffic Control, ATC), w odpowiedzi na rosnące natężenie ruchu lotniczego zapewnia poprawę bezpieczeństwa lotów oraz lepsze wykorzystanie możliwości portów lotniczych.

W powietrzu informacje dostarczane przez ADS-B zwiększają wiedzę pilota na temat bieżącej sytuacji i natężenia ruchu, umożliwiając optymalizację parametrów lotu i zużycia paliwa.

Główną funkcją systemu ADS-B jest przetwarzanie danych pochodzących z systemu GPS oraz oddzielanie dokładnych informacji na temat szybkości, wysokości oraz kierunku ruchu statku powietrznego.

Uzyskane dane dodawane są do informacji na temat warunków meteorologicznych, otrzymywanych od służb lotniskowych.

Proces ten umożliwia pilotom i kontrolerom lotniczym monitorowanie ruchu wszystkich statków powietrznych w rejonie lotniska.

Jedną z popularniejszych obecnie metod satelitarnej transmisji danych jest zwielokrotnianie z ortogonalnym podziałem częstotliwości (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) [111, 117]. Jednocześnie jednak nadal brakuje nam dokładnej wiedzy na temat wielu kwestii związanych z przesyłaniem komunikatów ADS-B łączami satelitarnymi OFDM.

OFDM, jako technika modulacji wykorzystująca wiele częstotliwości nośnych, została wprowadzona jako element warstwy fizycznej szerokopasmowych bezprzewodowych systemów i standardów cyfrowych, takich jak IEEE 801.11/WiFi, IEEE 802.16/WiMAX.

Równocześnie modulacja OFDM zyskuje coraz większe znaczenie jako metoda dostarczania usług multimedialnych dla różnego rodzaju niewielkich terminali mobilnych i stacjonarnych wyposażonych w kompaktowe anteny, podłączonych do hybrydowych sieci satelitaro-naziemnych.

Z drugiej strony, technika OFDM jest stosowana również w łączności wojskowej [110].

OFDM to metoda kodowania danych cyfrowych na wielu częstotliwościach nośnych. Została ona stworzona przede wszystkim z myślą o wykorzystaniu w szerokopasmowej komunikacji cyfrowej [112].

W metodzie tej wykorzystuje się kilka oddzielonych ortogonalnie częstotliwości nośnych („podnośnych”) do przesyłania danych kilkoma równoległymi strumieniami lub kanałami.

Każda z tych „podnośnych” modulowana jest z wykorzystaniem konwencjonalnych metod o niskiej szybkości transmisji, co pozwala utrzymać ogólną szybkość porównywalną z konwencjonalnymi schematami modulowania pojedynczych częstotliwości nośnych w tym samym paśmie [10].

W poprzednich rozdziałach przeanalizowaliśmy modele kanałów łączności satelitarnej, które nie wykorzystywały metody OFDM [82, 113, 114, 115].

Celem niniejszego rozdziału jest:

1) stworzenie modelu lotniczego kanału łączności satelitarnej „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna” z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink;

2) zbadanie, w jaki sposób typ schematu modulacji, temperatura szumowa transpondera satelitarnego, szerokość pasma kanału, liczba symboli OFDM oraz nieliniowość nadajników pokładowych w statkach powietrznych wpływają na transmisję komunikatów ADS-B łączem satelitarnym.

Model łącza „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

W doświadczeniu przeanalizowano łącze satelitarne wykorzystujące oryginalny model oparty na standardzie IEEE 802.16d oraz modelu demonstracyjnym MATLAB Simulink commwman80216d (ilustracja 2.25).

Na model składają się: źródło informacji (blok generatora binarnego kodu Bernoulliego), nadajnik pokładowy „w górę” (modulator, nadajnik OFDM, reduktor zniekształceń i wzmacniacz nieliniowy,

wzmacniająca antena nadawcza), ścieżki „w górę” i „w dół” (tłumienie ścieżki w przestrzeni, przesunięcie fazy/częstotliwości), transponder satelitalny (wzmacniająca antena nadawcza i odbiorcza, przesunięcie fazy/częstotliwości, wzmacniacz), odbiornik w stacji naziemnej (wzmacniająca antena odbiorcza, odbiornik OFDM, kompensator wzmocnienia i fazy, nośnik pozyskanych danych, demodulator), blok oceny SNR, blok współczynnika ID, blok obliczania stopy błędów.

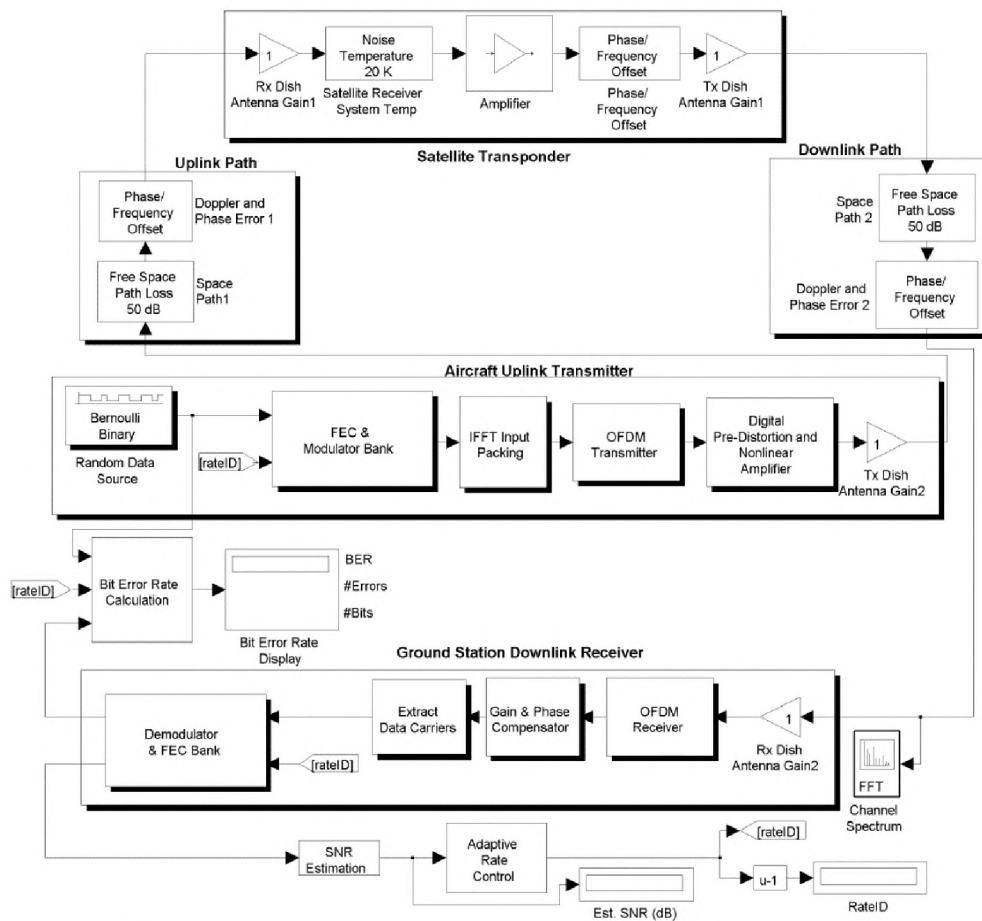
W łączności cyfrowej prawdopodobieństwo błędu zależy od wartości znormalizowanego stosunku sygnału do szumów (Signal to Noise Ratio, SNR), która może zostać obniżona na skutek zmniejszenia mocy sygnału lub zwiększenia mocy szumów, lub też mocy sygnałów zewnętrznych, zakłócających sygnał pożądanym.

Transmisja danych umożliwia zachowanie pełnej dokładności przesyłanych informacji, jednak odbywa się to kosztem zmniejszenia szybkości przesyłu lub szerokości pasma.

Wysoką przepustowość systemu zapewnia jego zdolność do utrzymania dużej szybkości transmisji. Szybkość transmisji określa prędkość przesyłu informacji i tempo transmisji sekwencji symboli, osiągnięte dzięki odpowiedniej modulacji sygnału.

Parametr progowy niskiego SNR wyrażony jest w formie 7-elementowego wektora [10 11 14 18 22 26 28]:

- 10 – dla BPSK 1/2,
- 11 – dla BPSK 3/4,
- 14 – dla QPSK 1/2,
- 18 – dla QPSK 3/4,
- 22 – dla 16-QAM 1/2,
- 26 – dla 16-QAM 3/4,
- 28 – dla 64-QAM 2/3.



	1	Temperatura szumu 20 K		Przesunięcie fazy/ częstotliwości	1	
	Antena wzmacniająca Rx 1	Temperatura układu odbiornika satelitarne	Wzmacniacz	Przesunięcie fazy/ częstotliwości	Antena wzmacniająca Tx 1	
Ścieżka "w górę"			Transponder satelitarny		Ścieżka "w dół"	
Przesunięcie fazy/ częstotliwości	Efekt Dopplera i błąd fazy 1			Ścieżka w przestrzeni 2	Tłumienie ścieżki w przestrzeni 50 dB	
Tłumienie ścieżki w przestrzeni 50 dB	Ścieżka w przestrzeni 1			Efekt Dopplera i błąd fazy 2	Przesunięcie fazy/ częstotliwości	
Nadajnik pokładowy w statku powietrznym						
Generator binarnego kodu Bernoulliego		FEC i modulator	Paczka danych wejściowych IFFT	Nadajnik OFDM	Reduktor zakłóceń i wzmacniacz nieliniowy	1
Źródło danych losowych	ID szybkości					Antena wzmacniająca Tx 2
ID współczynnika	Obliczanie stopy błędów		BER (stopy błędów)			
		Ekran pokazujący stopę błędów	liczba błędów liczba bitów			
Odbiornik w stacji naziemnej						
Demodulator i FEC	ID współczynnika	Nośnik pozyskanych danych	Kompensator wzmacnienia i fazy	Odbiornik OFDM	Antena wzmacniająca Rx 2	FFT
						Zakres kanału
		Szacowanie SNR	Kontrola współczynnika transmisji	Szacunkowy SNR (dB)	ID współczynnika u-1	ID współczynnika

Ilustracja 2.25. Łącze „statek powietrzny-satelita-stacja naziemna”

Blok generatora binarnego kodu Bernoulliego generuje losowe liczby binarne zgodnie z rozkładem Bernoulliego.

Blok generuje dyskretne sygnały i aktualizuje je w odstępach czasowych równych 1.

Prawdopodobieństwo równa się 0.

Blok modulatora składa się z kodera splotowego, kodera Reeda-Solomona, przeplatacza oraz bloku wspomnianych typów modulacji. Koder splotowy koduje sekwencję binarnych wektorów wejściowych, by uzyskać sekwencję binarnych wektorów wyjściowych. Wykorzystuje w tym celu komendę `poly2trellis` [171 133], kod o długości 7 oraz wielomiany generatora kodu 171 i 133. Blok kodera Reeda-Solomona tworzy kod Reeda-Solomona o długości komunikatu K oraz długości słowa kodowego N (N – liczba otworów). Sygnały wejściowe i wyjściowe to sygnały o wartościach binarnych, reprezentujące odpowiednio komunikaty i słowa kodowe. Sygnał wejściowy to ramowy wektor kolumnowy o długości równej liczbie całkowitej $K = 24$. Sygnał wyjściowy to również ramowy wektor kolumnowy o długości równej liczbie całkowitej N (liczbie otworów) i w którym typ danych zależy od sygnału wejściowego. Blok przeplatacza zmienia układ elementów wektora wyjściowego za pomocą permutacji losowej.

Blok nadajnika OFDM transmituje sygnał na kilku ortogonalnych częstotliwościach podnośnych. Podstawowe dane sygnału modulowane są niezależnie na każdej z tych częstotliwości zazwyczaj za pomocą takich typów modulacji, jak kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa (QAM) lub kluczowanie fazy (PSK).

Tego typu złożony sygnał pasma podstawowego jest zazwyczaj stosowany w modulacji głównej częstotliwości nośnej RF.

Dla każdego zestawu symboli obliczana jest odwrotna FFT, co pozwala uzyskać zestaw próbek czasowych. Próbkę tę są następnie modulowane kwadraturowo i przenoszone do pasma przepustowego w sposób standardowy.

Składniki rzeczywiste i urojone są najpierw konwertowane do postaci analogowej, za pomocą odpowiednich konwerterów. Sygnały analogowe są następnie wykorzystywane do modulacji fal sinusoidalnych i kosinusoidalnych na częstotliwości nośnej. Później sygnały te są łączone w jeden główny sygnał przesyłowy. Podczas tworzenia sygnału OFDM strumień danych cyfrowych zostaje podzielony na kilka podstrumieni, przesyłanych na różnych częstotliwościach podnośnych.

Amplituda i faza każdej z częstotliwości podnośnych obliczana jest na podstawie wybranego schematu modulacji.

Zgodnie ze standardem poszczególne częstotliwości podnośne mogą być modulowane z użyciem dwuwartościowego PSK (BPSK), czterowartościowego PSK (QPSK) lub QAM o wartościach 16 lub 64.

Szybkość transferu danych jest w pełni uzależniona od typu modulacji, tzn. każdy typ modulacji zapewnia określoną szybkość transmisji.

Podczas modulacji każda częstotliwość podnośna sygnału OFDM modelowana jest przez sygnał użyteczny, równocześnie przez amplitudę i fazę tworzące sygnał, którego pozycja w układzie współrzędnych fazy i amplitudy przenosi informację na temat zakodowanego w nim symbolu.

Sygnał wektora 16 QAM może zajmować 16 możliwych pozycji w układzie współrzędnych amplitudy i fazy, co oznacza możliwość zakodowania 16 wartości pomiędzy 0000 a 1111.

Sygnał wektora 64 QAM może zajmować 64 pozycje i kodować 64 wartości.

Modulacje BPSK i QPSK kodowały 2 i 4 wartości symboli z odpowiednio dwiema i czterema wartościami fazy.

Amplituda sygnału podczas modulacji QPSK i BPSK nie zmienia się. Dlatego te dwa typy modulacji możemy uznać za szczególny przypadek fazowo-amplitudowej modulacji QAM.

Nieliniowość bezpamięciowa (wzmacniacz dużej mocy) to model wzmacniacza lampowego o fali bieżącej (Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA) wykorzystujący model Saleha. Poziom backoff to parametr pokazujący stopień nasycenia wzmacniacza i margines jego możliwości.

Wyróżniamy trzy poziomy: pierwszy to 30 dB (znikoma nieliniowość), który oznacza, że średnia moc sygnału wejściowego jest o 30 decybeli niższa od mocy wejściowej powodującej nasycenie wzmacniacza (czyli osiągnięcie punktu, w którym krzywa wzmocnienia się wypłaszcza).

Powoduje to znikomą konwersję AM/AM i AM/PM.

Konwersja AM/AM wskazuje, w jaki sposób nieliniowość amplitudy zmienia się wraz z wielkością sygnału.

Konwersja AM/PM to miara pokazująca, w jaki sposób nieliniowość fazy zmienia się wraz z wielkością sygnału.

Poziom drugi to 7 dB (umiarkowana nieliniowość), przy którym średnia moc wejściowa jest o 7 dB niższa od mocy wejściowej powodującej nasycenie wzmacniacza.

Powoduje to umiarkowaną konwersję AM/AM i AM/PM.

Zaś trzeci poziom to 1 dB (znaczna nieliniowość), w którym średnia moc wejściowa jest o 1 decybel niższa od mocy wejściowej powodującej nasycenie wzmacniacza. Powoduje ona znaczną konwersję AM/AM i AM/PM.

Podczas badań wykorzystano różne typy nieliniowości bezpamięciowej, takie jak:

- znikoma nieliniowość o parametrze wejściowym – 21,5457 i wyjściowym – 32,9118,
- umiarkowana nieliniowość o parametrze wejściowym – 1,40444 i wyjściowym – 9,91183,
- znaczna nieliniowość o parametrze wejściowym – 7,40433 i wyjściowym – 3,91183.

Blok tłumienia ścieżki wolnej przestrzeni symuluje spadek mocy sygnału wynikający z odległości pomiędzy nadajnikiem na pokładzie samolotu i odbiornikiem transpondera satelitarnego.

W bloku tym następuje zmniejszenie amplitudy sygnału wejściowego o wielkość określoną przez parametr straty (dB).

Blok przesunięcia fazy/częstotliwości nakłada przesunięcie fazy i częstotliwości na przychodzące sygnały.

Podczas badania przyjęto, że wartość przesunięcia fazy/częstotliwości wynosi zero.

Średnica anten nadawczych i odbiorczych to ważny składnik wektora bloku anten wzmacniających.

Pierwszy składnik (średnica anteny nadawczej) wektora służy do obliczania wzmocnienia anteny nadawczej, a drugi składnik (średnica anteny odbiorczej) – do obliczania wzmocnienia anteny odbiorczej.

Wzmocnienie anten równa się 1.

Blok szumu termalnego odbiornika symuluje wpływ szumu termalnego na złożony sygnał w paśmie podstawowym.

Wyróżniamy trzy poziomy temperatury szumu: 0 (brak szumu), 20 (bardzo niski poziom szumu) i 290 (typowy poziom szumu).

Badanie przeprowadzono dla poziomów 20 K i 290 K.

Blok wzmacniacza pozwala wybrać pięć różnych metod modelowania wzmacniacza nieliniowego.

Wzmacniacze mocy stanowią istotny składnik współczesnych systemów łączności, zapewniając utrzymanie wymaganego poziomu przesyłanych sygnałów, potrzebnego do zniwelowania strat pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem.

W dwóch metodach nieliniowych krzywa wykresu wyznaczana jest na podstawie dwóch parametrów – danych uzyskanych dzięki wzmocnieniu oraz punktu przechwyty trzeciego rzędu.

Pozostałe trzy metody nieliniowe wykorzystują modele opracowane przez Saleha, Ghorbaniego oraz Rappa.

Modele Saleha i Ghorbaniego oparte są na znormalizowanej nieliniowej funkcji przenoszenia.

W modelowaniu omawianym w niniejszym rozdziale wybrano metodę liniową. Podczas modelowania wzmocnienie wzmacniacza liniowego określono na 1 dB.

Odbiornik w stacji naziemnej składa się z odbiornika OFDM, kompensatora wzmocnienia i fazy, nośników pozyskanych danych oraz banku demodulatora.

Blok odbiornika OFDM odbiera sygnał, który następnie jest modulowany kwadraturowo do pasma podstawowego z wykorzystaniem fal sinusoidalnych i kosinusoidalnych na częstotliwości nośnej.

Sygnały w paśmie podstawowym są próbkowane i cyfryzowane na przetwornikach analogowo-cyfrowych, a następnie, za pomocą FFT, przekształcane z powrotem do domeny częstotliwości.

Pozwala to otrzymać N równoległych strumieni, z których każdy przekształcany jest w strumień binarny za pomocą odpowiedniego detektora symboli.

Strumienie te łączone są następnie z powrotem w jeden główny strumień, odpowiadający oryginalnemu binarnemu strumieniowi generowanemu przez nadajnik.

Bank demodulatora składa się z dekodera Viterbiego, rozdzielacza, dekodera Reeda–Solomona oraz demodulatorów modulacji BPSK, QPSK1/2, QPSK3/4, 16QAM1/2, 16QAM3/4, 64QAM2/3 i 64QAM3/4.

Blok dekodera Viterbiego odkodowuje symbole wejściowe, tworząc binarne symbole wyjściowe. Blok dekodera odtwarza wektory komunikatów z wektorów słów kodowych Reeda–Solomona. Blok demodulatora demoduluje modulowane sygnały, wykorzystując określone typy modulacji.

Dokładność przesyłu informacji określana jest za pomocą czynnika, jakim jest stosunek sygnału do szumów (współczynnik SNR), w bloku „szacowania SNR”.

Stosunek sygnału do szumów to miara porównująca poziom sygnału użytecznego z poziomem szumów w tle. Jest definiowana jako stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy szumu tła i często wyrażana w decybelach.

Stosunek o wartości wyższej niż 1:1 (powyżej 0 dB) wskazuje, że sygnał jest mocniejszy od szumu.

Blok obliczania stopy błędów przedstawia 3-elementowy wektor, składający się ze stopy błędów, liczby wykrytych błędów oraz całkowitej liczby porównywanych symboli.

Stopa błędów wyrażana jest zawsze w jako procent całkowitej liczby symboli i podczas badań powinna zawsze wynosić 0.

Symulacja lotniczego kanału satelitarnego

Zależności SNR od tłumienia ścieżki w różnych trybach modulacji, temperatur szumu transpondera oraz szerokości pasma kanału przedstawione zostały na ilustracji 2.26a.

Podczas modelowania wartość BER utrzymano na poziomie zero, zmieniając typ modulacji (wykorzystując szacowane SNR oraz kontrolę prędkości transmisji). Zgodnie z tym zmieniano współczynnik SNR.

Również przesunięcie fazy i częstotliwości wyniosło zero, zysk anten był równy 1, liczba symboli OFDM równała się 1, częstotliwość cykliczna – 1/8, a nieliniowość wzmacniacza pokładowego „w górę” została dezaktywowana.

Wielkość tłumienia ścieżki zmieniano równocześnie w kanałach „w górę” i „w dół”.

Z ilustracji 2.26a wynika, że modulacja 64QAM3/4 była najwyższą wartością współczynnika SNR w porównaniu z innymi typami modulacji. Dodatkowo wskazuje ona, że im niższe są temperatura szumu transpondera i szerokość pasma kanału, tym wyższa jest wartość współczynnika SNR.

Ilustracja 2.26a pokazuje, jak wysoka powinna być wartość SNR i jakiego typu modulację należy zastosować do transmisji danych bez błędów przy określonym tłumieniu ścieżki, temperaturze szumu transpondera, szerokości pasma kanału i minimalnej liczbie symboli OFDM.

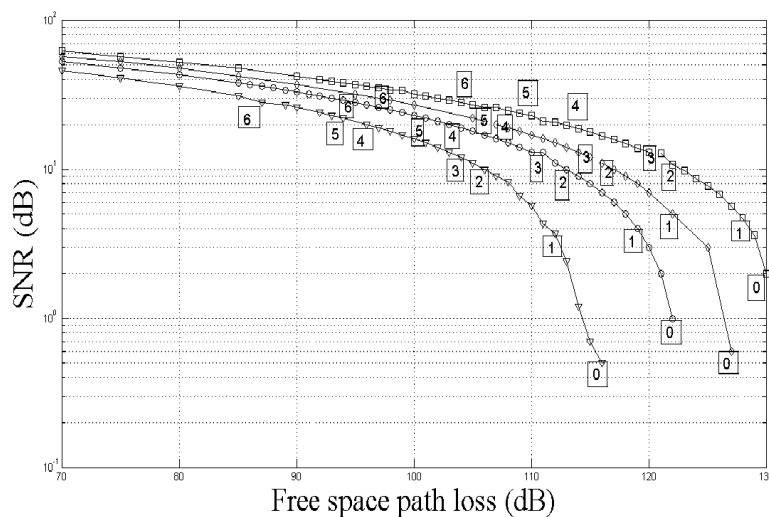
Zależności SNR od tłumienia ścieżki dla różnych trybów modulacji, temperatur szumu transpondera, stałej szerokości pasma kanału oraz różnej liczby symboli OFDM przedstawione zostały na ilustracji 2.26b.

Ilustracja 2.26b pokazuje, jak wysoka powinna być wartość współczynnika SNR i jakiego typu modulację należy zastosować do transmisji danych bez błędów przy stałej szerokości pasma kanału, danej wielkości tłumienia ścieżki i temperaturze szumu transpondera oraz różnej liczby symboli OFDM.

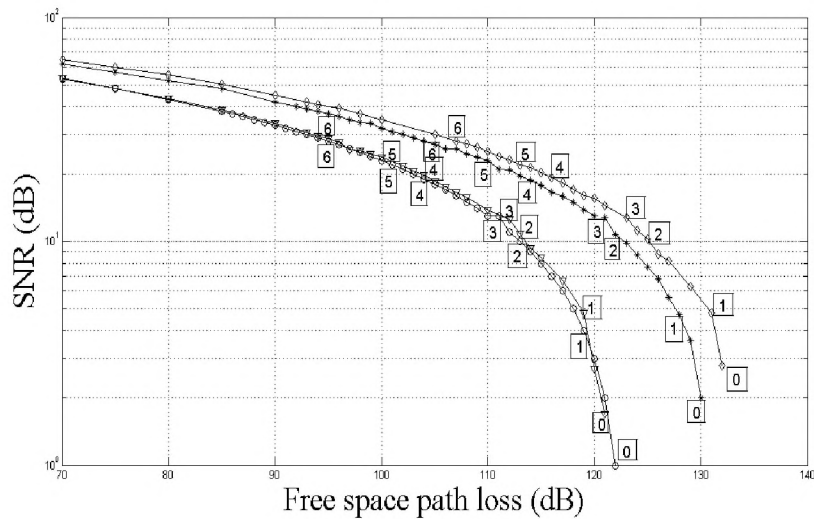
Z kolei ilustracja 2.26c pokazuje, jak wysoka powinna być wartość współczynnika SNR i jakiego typu modulację należy zastosować do transmisji danych bez błędów przy stałej szerokości pasma kanału, liczbie symboli OFDM oraz temperaturze szumu transpondera dla różnych poziomów nieliniowości nadajnika pokładowego.

W badaniu wpływu schematów modulacyjnych i nieliniowości nadajników pokładowych na transmisję komunikatów ADS-B przez niskoorbitalne łącze satelitarne wykorzystano oryginalny model kanału komunikacyjnego „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”, zbudowany z użyciem oprogramowania MATLAB Simulink.

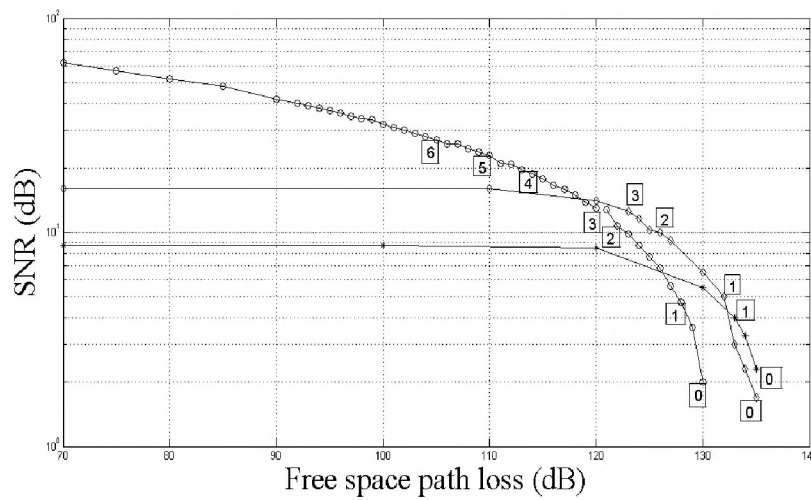
W modelu otrzymano i zbadano zależności współczynnika SNR od tłumienia ścieżki dla różnych typów modulacji (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), różnych temperatur szumu transpondera satelitarnego oraz różnych typów nieliniowości nadajnika pokładowego.



a



b



c

Free space path loss	Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni
----------------------	--------------------------------------

Ilustracja 2.26. Zależność SNR od tłumienia ścieżki w łączu „w górę”/„w dół” dla różnych typów modulacji [118]:

a – temperatury szumu transpondera i pasma kanału: kwadraty – temperatura szumu 20 K, pasmo kanału 3.5 MHz; romby – temperatura szumu 20 K, pasmo kanału 10 MHz, okręgi – temperatura szumu 290 K, pasmo kanału 3,5 MHz, trójkąty – temperatura szumu 290 K, pasmo kanału 10 MHz; liczba symboli OFDM równa się 1; nieliniowość nadajnika pokładowego „w górę” została dezaktywowana; wzmocnienie liniowe wzmacniacza transpondera wynosi 1dB;

b – temperatury szumu transpondera i liczba symboli OFDM: romby – temperatura szumu 20 K, liczba symboli OFDM wynosi 100; gwiazdy – temperatura szumu 20 K, liczba symboli OFDM wynosi 1; trójkąty – temperatura szumu 290 K, liczba symboli OFDM wynosi 100; okręgi – temperatura szumu 290 K, liczba symboli OFDM wynosi 1; pasmo kanału 3,5 MHz;

c – typy nieliniowości: gwiazdy – znacząca nieliniowość, romby – umiarkowana nieliniowość; okręgi – nieliniowość dezaktywowana; temperatura szumu transpondera 20 K, liczba symboli OFDM wynosi 1; pasmo kanału 3,5 MHz; 0 – BPSK1/2, 1 – QPSK1/2, 2 – QPSK 3/4, 3 – 16QAM1/2, 4 – 16QAM 3/4, 5 – 64QAM2/3, 6 – 64QAM3/4

Modulacja 64QAM jest najszybsza, ponieważ umożliwia przesyłanie 64 potencjalnych wartości w jednym symbolu danych, co oznacza większą szybkość symbolu, a w efekcie większą szybkość przesyłu danych w porównaniu z niższymi modulacjami.

Im wyższy jest typ modulacji, tym mniejsze różnice wektorów amplitudy i fazy wartości sąsiadujących przesyłanych komunikatów. Stąd do bezbłędnego odbioru komunikatów wymagany jest mocniejszy sygnał lub raczej wysoki współczynnik sygnału do szumu.

Proponowany model można wykorzystać do badania komunikacji pomiędzy statkami powietrznymi i stacjami naziemnymi za pośrednictwem kilku satelitów. Model może służyć także do wyznaczania optymalnych metod kodowania korekcyjnego [118].

2.2.5. Komputerowe modelowanie transpondera satelitarne o częstotliwości radiowej do przesyłania komunikatów ADS-B kanałem komunikacji satelitarnej

Zgodnie z koncepcją kierowania ruchem lotniczym CNS/ATM służby kontroli ruchu powinny być wspierane przez funkcję automatycznego zależnego dozoru (ADS-B) [84].

Program EUROCONTROL CASCADE koordynuje zastosowanie technologii ADS-B oraz rozległej multilateracji w Europie.

Program obejmuje zastosowania ADS-B zarówno w dozowaniu naziemnym (tzw. „ADS-B out”), jak i w komunikacji pomiędzy uczestnikami ruchu powietrznego („ADS-B in”) [77].

Szerokie wykorzystanie rozwiązań ADS-B w europejskiej przestrzeni powietrznej wspierane jest przez przepisy publikowane przez Komisję Europejską (opracowane na podstawie rozporządzenia dotyczącego skuteczności działania i interoperacyjności systemów dozoru).

ADS-B to technologia, w której statek powietrzny nadaje komunikaty zawierające jego dane identyfikacyjne, pozycję oraz inne istotne informacje na jego temat. Sygnały te odbierane są przez naziemne stacje dozoru (ADS-B out) oraz przez urządzenia na pokładach innych maszyn latających/statków powietrznych (ADS-B in). Dostarczają one wiedzy na temat położenia poszczególnych obiektów w przestrzeni powietrznej i umożliwiają zachowanie bezpiecznych odległości oraz minimów separacyjnych [119].

W telekomunikacji satelitarnej wykorzystuje się sztuczne satelity przekazujące sygnały analogowe oraz cyfrowe, transmitujące dźwięki, obrazy i dane, zapewniające łączność pomiędzy różnymi punktami na powierzchni Ziemi i statkami powietrznymi.

Satelitarne systemy komunikacyjne umożliwiają bezpieczne i niezbędne działania służb łączności, meteorologicznych, nawigacyjnych oraz informacyjnych na całym świecie.

Ważnym aspektem satelitarnej sieci komunikacyjnej jest fakt, iż działa ona bez zakłóceń nawet w warunkach, w których nie można wykorzystać innych metod łączności [120].

Zapewnienie bezpiecznych, regularnych i efektywnych operacji transportu lotniczego to podstawowe zadania Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO).

ICAO tworzy obecnie system satelitarne, który będzie mógł zaspokoić przyszłe potrzeby lotnictwa cywilnego w zakresie łączności, nawigacji, dozoru radarowego oraz kontroli ruchu lotniczego.

Obecnie dalszy rozwój ruchu lotniczego w rejonie lotnisk ograniczany jest przez fakt, że na określenie współrzędnych obiektu i wyświetlenie tych informacji na ekranie radaru potrzeba od 6 do 12 sekund, a w tym czasie statek powietrzny może zmienić swoje położenie.

Dlatego kontrolerzy ruchu lotniczego, by zapewnić pełne bezpieczeństwo lotów, muszą wydłużać okresy pomiędzy kolejnymi lądowaniami statków powietrznych, co powoduje niepełne wykorzystanie możliwości infrastruktury lotniskowej. Jednym z rozwiązań zwiększających wydajność istniejących systemów jest wykorzystanie technologii informatycznych i satelitarnych, łączy danych oraz elementów awioniki pokładowej [125]. W dniu 25 czerwca 2012 r. operator

satelitarny Iridium podjął decyzję o montowaniu odbiorników ADS-B na wszystkich swoich satelitach nowej generacji.

Model łącza „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

Podczas eksperymentu przeanalizowano działanie modelu łącza satelitarnego przygotowanego na podstawie modelu demonstracyjnego `simrf_friis` wykorzystującego oprogramowanie MATLAB Simulink (ilustracja 2.27).

Model składa się z „nadajnika pokładowego”, kanału „w górę/w dół”, „transpondera satelitarnego” oraz „odbiornika naziemnego”.

Elementy „nadajnika pokładowego” to:

- blok generatora losowych liczb całkowitych, który generuje równomiernie rozłożone liczby całkowite w przedziale $[0, M-1]$, gdzie M oznacza liczbę szeregów M określoną w polu dialogowym;
- blok modulatora pasma podstawowego OQPSK, który moduluje dane, wykorzystując metodę przesuniętego poczwórnego kluczowania fazy (Offset Quadrature Phase Shift Keying);
- blok filtra transmisji wykorzystującego charakterystykę podniesionego cosinusa, który dokonuje próbkowania i filtruje sygnał wejściowy;
- blok wzmocnienia czaszy anteny nadajnika, który zwielokrotnia sygnał wejściowy o stałą wartość (wzmocnienie).

Łącze „w górę/w dół” zawiera następujące elementy:

- blok normalizujący, który zwielokrotnia sygnał wejściowy o stałą wartość (wzmocnienie);
- blok tłumienia ścieżki wolnej przestrzeni, który symuluje tłumienie sygnału wynikające z odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, a także redukuje amplitudę sygnału wejściowego o określoną wielkość;
- blok poziomu szumów, który dokłada szum termiczny odbiornika do złożonego sygnału w paśmie podstawowym;
- blok odbuforowujący, który odbuforowuje ramkę sygnału wejściowego w sekwencję skalarnych sygnałów wyjściowych.

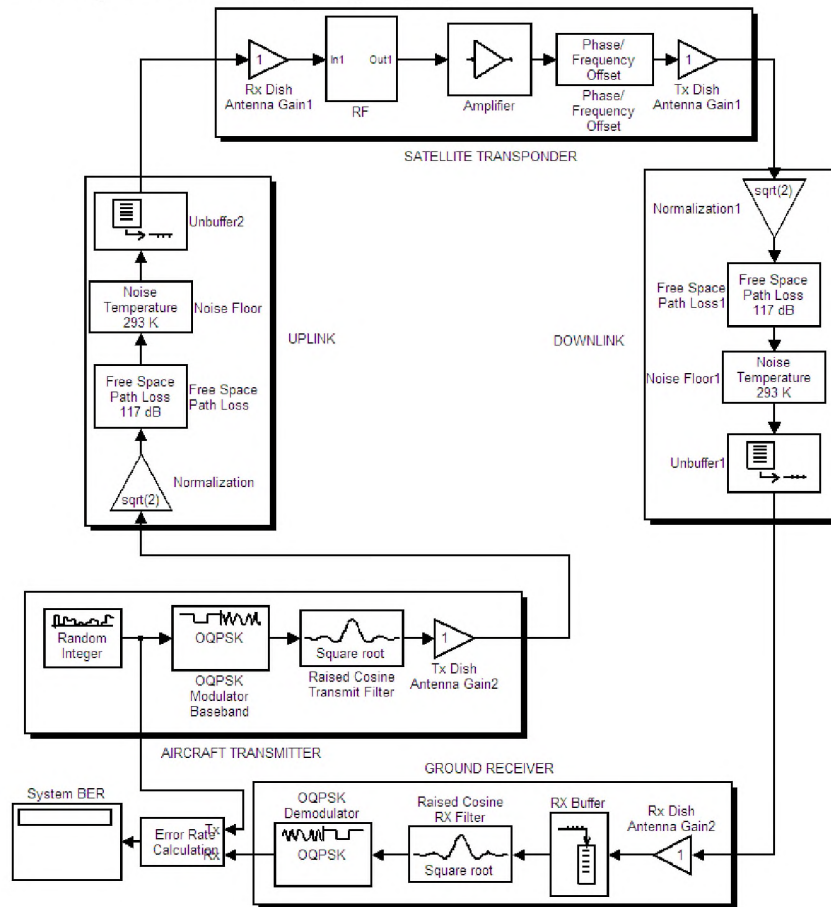
„Transponder satelitarny” składa się z:

- bloku wzmocnienia czaszy anteny odbiornika;
- bloku częstotliwości radiowej (RF);
- wzmacniacza;
- bloku przesunięcia fazy/częstotliwości;
- bloku wzmocnienia czaszy anteny nadajnika.

Blok częstotliwości radiowej (ilustracja 2.28) zawiera:

- blok portu wejściowego SimRF, który przekształca sygnał wejściowy Simulink w sygnał SimRF;
- blok wzmacniacza niskoszumowego (Low-Noise Amplifier, LNA);
- blok miksera, który służy jako model miksera w środowisku symulującym obwiedni obwodów SimRF;
- blok portu wyjściowego SimRF, który przekształca sygnał SimRF w sygnał wyjściowy Simulink;
- blok fali ciągłej, który modeluje stałą modulację nośnej w środowisku symulacyjnym obwiedni obwodów SimRF;
- blok konfiguracji solvera, który reprezentuje środowisko sieci fizycznej i konfigurację solvera;

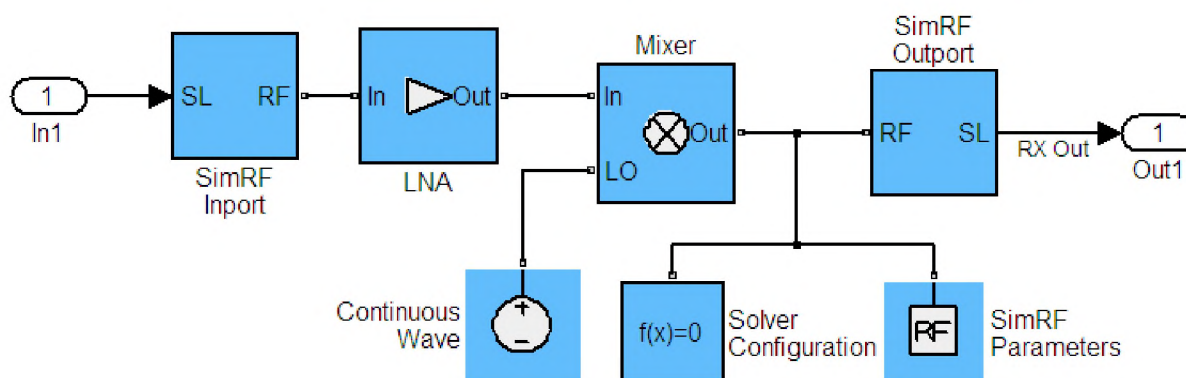
– blok parametrów SimRF, który określa parametry systemu wykorzystywane w analizie obwiedni obwodu. W konstelacji satelitów, której celem jest zapewnienie dozoru statków powietrznych przez służby żeglugi powietrznej w czasie rzeczywistym [79].



1	Wejście 1	Wyjście 1		Przesunięcie fazy/częstotliwości	1
Wzmocnienie czaszy anteny Rx 1	RF		Wzmacniacz	Przesunięcie fazy/częstotliwości	Wzmocnienie czaszy anteny Tx 1
TRANSPONDER SATELITARNY					
Temperatura szumu 293 K	Odbuforowanie 2		W GÓRĘ W DÓŁ	Normalizacja 1	$\sqrt{2}$
Tłumienie ścieżki 117 dB	Szum tła			Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni 1	Tłumienie ścieżki 117 dB
$\sqrt{2}$	Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni 1			Szum tła 1	Temperatura szumu 293 K
Losowa liczba Całkowita	Normalizacja			Odbuforowanie 1	
	OQPSK		Pierwiastek kwadratowy	1	
	Modulator pasma podstawowego OQPSK		Filtr transmisji wykorzystujący podniesiony cosinus	Wzmocnienie czaszy anteny Tx 2	
NADAJNIK POKŁADOWY					
			ODBIORNIK NAZIEMNY		
BER układu	Obliczanie stopy błędów		Demodulator OQPSK	Filtr Rx wykorzystujący podniesiony cosinus	Bufor RX
			OQPSK	Pierwiastek kwadratowy	Wzmocnienie czaszy anteny Rx 2
					1

Ilustracja 2.27. Łącze „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”

1	SL RF	Wejście Wyjście	Mikser	Port wyjściowy SimRF		1
Wejście 1	Port wejściowy SimRF	LNA	Wejście Wyjście LO	RF SL	Wyjście RX	Wyjście 1
		Fala ciągła	$f(x) = 0$	Konfiguracja solvera	RF	Parametry SimRF



Ilustracja 2.28. Schemat bloku RF [126]

Blok wzmacniacza pozwala na wybór pomiędzy modelowaniem wzmacniania liniowego i pięciu rodzajów wzmacniania nieliniowego. Podczas modelowania wzmacniania liniowego wartość wzmacnienia określono na 1 dB.

Blok przesunięcia fazy/częstotliwości symuluje przesunięcie częstotliwości i fazy sygnału wejściowego.

Blok wzmacnienia czaszy anteny nadajnika zwiela sygnał wejściowy o określoną wielkość stałą (wzmocnienie).

„Odbiornik naziemny” zawiera blok wzmacnienia czaszy anteny odbiorczej oraz blok demodulatora systemu RF.

Najważniejsze elementy bloku demodulatora systemu RF to:

- blok bufora odbiornika, który buforuje sekwencję wejściową do mniejszych lub większych ramek danych;
- blok filtra odbiornika wykorzystujący charakterystykę podniesionego cosinusa, który filtruje sygnał wejściowy;
- blok demodulatora OQPSK, który demoduluje sygnał modulowany za pomocą metody przesuniętego poczwórnego kluczowania fazy.

Blok „obliczania stopy błędów” zawiera trzelementowy wektor, na który składają się stopa błędów, liczba wykrytych błędów i całkowita liczba porównanych symboli.

Blok „obliczania stopy błędów” pokazuje stopę błędów w formie procentu i podczas analizy powinna ona zawsze być równa 0.

Symulacja lotniczych kanałów satelitarnych MIMO

Symulację lotniczego kanału satelitarnego przeprowadzono dla częstotliwości nośnych RF 1,6 GHz (pasmo L) oraz 2,1 GHz, 3,1 GHz (pasmo S).

Blok wzmacniacza niskich szumów służył jako model wzmacniacza liniowego o wzmacnieniu 100 dB, współczynnika szumów 6 dB i oporze wejściowym/wyjściowym 50 om.

Blok miksera miał wzmacnienie -5 dB, współczynnik szumów 15 dB oraz opór wejściowy/wyjściowy 50 om.

Ze względu na wysokie koszty kosmicznych elementów systemów komunikacji satelitarnej podczas ich tworzenia wdrażane są projekty i rozwiązania umożliwiające wykorzystanie transponderów satelitarnych przez jak najliczniejsze grupy użytkowników naziemnych.

Właściwą alokację zasobów transpondera satelitarnego można uzyskać, tworząc wiele łączy dzięki wykorzystaniu wielu transponderów satelitarnych operujących na różnych częstotliwościach [94, 124].

Transponder to szerokopasmowy kanał częstotliwości radiowej wykorzystywany do wzmacnienia jednej lub więcej częstotliwości nośnych w komunikacji satelitarnej „w dół”. Jest to element systemu przekaźnika mikrofalowego i anteny umieszczony na pokładzie satelity.

Nawet niewielkie obniżenie przepustowości łącza satelitarnego wpływa negatywnie na możliwości obsługi danych lub zasięg działania systemu, co w konsekwencji przekłada się na wyższe koszty kapitałowe i operacyjne. Dlatego wszystkie parametry systemu powinny zostać zoptymalizowane na etapie projektowania, przed podjęciem ostatecznej decyzji o inwestycji w jego uruchomienie.

Dodatkowo, w przypadku problemów w fazie budowy lub po uruchomieniu, model symulacyjny może ułatwić wykrycie nieprawidłowo funkcjonujących elementów. Model może być również przydatny do testowania działań naprawczych przed wykonaniem ich w przestrzeni kosmicznej lub na stacjach naziemnych [121].

Modelowanie satelitarnych kanałów telekomunikacyjnych omówiliśmy wcześniej w rozdziałach [82, 115, 122, 123].

Kwestie związane z przesyłaniem komunikatów ADS-B łącami satelitarnymi na częstotliwościach radiowych nie zostały dotychczas szczegółowo zbadane.

Celem niniejszego rozdziału jest:

- 1) stworzenie modelu łącza „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”, obejmującego transponder satelitarny działający na częstotliwości radiowej, z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink;
- 2) zbadanie zależności stopy błędów (Bit Error Rate, BER) od tłumienia ścieżki wolnej przestrzeni, temperatur szumu i wzmacnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego.

Blok portu wyjściowego SimRF przekształcił napięcie/prąd elektryczny w sygnał Simulink o częstotliwości nośnej 500 MHz.

Lokalny oscylator (LO) bloku fali ciągłej działał na częstotliwościach nośnych 1,1 GHz, 1,6 GHz i 2,6 GHz.

Wzmacnienie liniowe wzmacniacza transpondera satelitarnego wyniosło 1 dB. Wzmacnienie wszystkich anten wyniosło $G = 1$.

Ilustracja 2.29 przedstawia zależności BER od tłumienia ścieżki dla różnych częstotliwości RF i LO.

Ilustracja 2.30 przedstawia zależności BER od tłumienia ścieżki dla różnych temperatur szumu.

Ilustracja 2.31 przedstawia zależności BER od tłumienia ścieżki dla różnych wartości wzmocnienia liniowego wzmacniacza satelitarnego.

W przypadku łączy wielokanałowych transpondery satelitarne działają na różnych częstotliwościach.

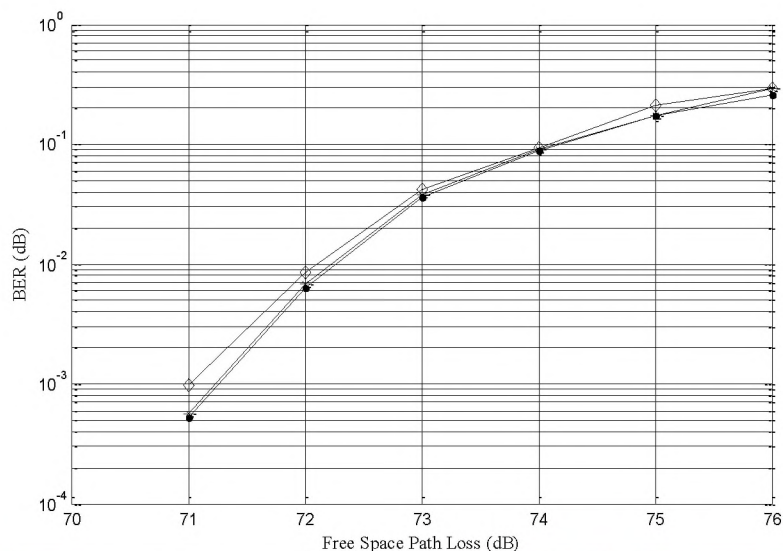
Transponder satelitarny to centralny element pełnego łączy komunikacyjnego przedstawionego na ilustracji 2.27.

Dlatego właśnie analiza transmisji komunikatów ADS-B łączy satelitarnym o częstotliwości radiowej jest istotna.

Na potrzeby niniejszego rozdziału stworzono oryginalny model łączy satelitarnego „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”, by określić i przeanalizować najważniejsze zależności pomiędzy BER a tłumieniem ścieżki wolnej przestrzeni, temperaturą szumu oraz wzmocnieniem wzmacniacza transpondera satelitarnego.

Przygotowany model można wykorzystać do przeanalizowania łączności pomiędzy dwoma statkami powietrznymi i stacjami naziemnymi z wykorzystaniem kilku satelitów.

Może on również pomóc w określeniu optymalnych metod kodowania korekcyjnego [126].



BER	Stopa błędów
Free Space Path Loss	Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni (dB)

Ilustracja 2.29. Zależność pomiędzy stopą błędów (BER) a tłumieniem ścieżki dla różnych częstotliwości RF i LO [126]:

kropki: RF = 1,6 GHz, LO = 1,1 GHz;

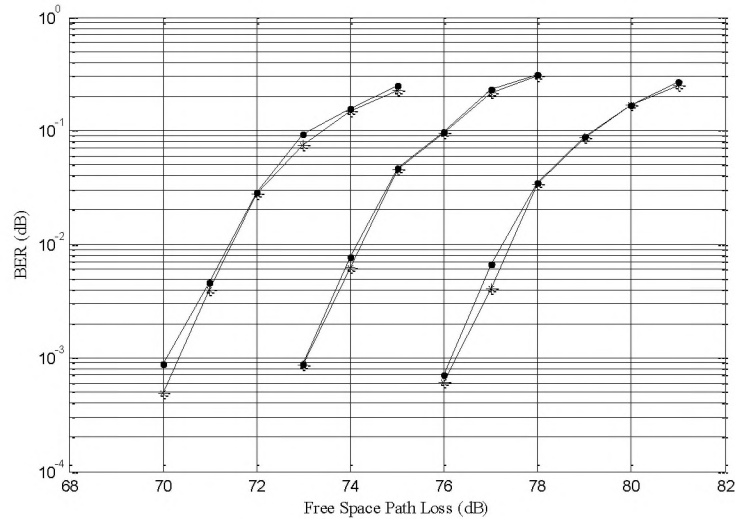
okręgi: RF = 2,1 GHz, LO = 1,6 GHz;

romby: RF = 3,1 GHz, LO = 2,6 GHz;

temperatura szumu $T = 20$ K;

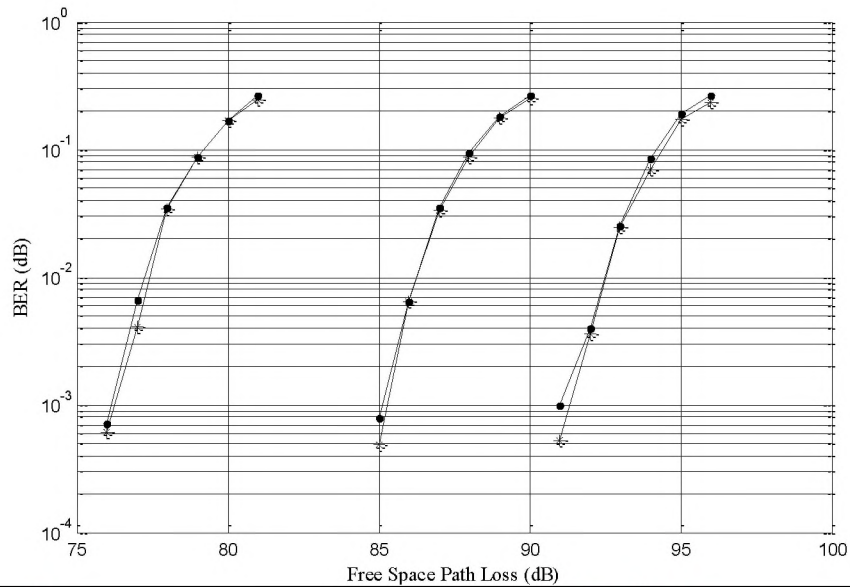
wzmocnienie liniowe transpondera satelitarnego 1 dB;

wzmocnienie anten $G = 1$.



BER	Stopa błędów
Free Space Path Loss	Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni (dB)

Ilustracja 2.30. Zależność pomiędzy stopą błędów a tłumieniem ścieżki dla różnych temperatur szumu [126]:
 wykres lewy: $T = 20K$;
 wykres środkowy: $T = 100K$;
 wykres prawy: $T = 290K$;
 punkty: $RF = 1,6 \text{ GHz}$, $LO = 1,1 \text{ GHz}$;
 okręgi: $RF = 2,1 \text{ GHz}$, $LO = 1,6 \text{ GHz}$;
 wzmacnienie liniowe transpondera 1 dB ;
 wzmacnienie anten $G = 1$.



BER	Stopa błędów
Free Space Path Loss	Tłumienie ścieżki wolnej przestrzeni (dB)

Ilustracja 2.31. Zależność pomiędzy stopą błędów a tłumieniem ścieżki dla różnych wartości wzmacnienia liniowego wzmacniacza satelitarne [126]:

wykres lewy: 1 dB ;
 wykres środkowy: 2 dB ;
 wykres prawy: 3 dB ($SFRF = 2,1 \text{ GHz}$ $SFLO = 1,6 \text{ GHz}$ jest oznaczona okręgami a $SFRF = 1,6 \text{ GHz}$ $SFLO = 1,1 \text{ GHz}$ punktami);
 punkty: $RF = 1,6 \text{ GHz}$, $LO = 1,1 \text{ GHz}$;

*okręgi: $RF = 2,1 \text{ GHz}$, $LO = 1,6 \text{ GHz}$;
temperatura szumu $T = 20\text{K}$;
wzmocnienie anten $G = 1$*

2.2.6. Analiza działania łącza „statek powietrzny – satelita – stacja naziemna” z wykorzystaniem kodowania korekcyjnego

Lotnicza sieć telekomunikacyjna (Aeronautical Telecommunication Network, ATN) została stworzona, by umożliwić służbom ruchu lotniczego łączność i przesyłanie danych związanych z zarządzaniem ruchem lotniczym, kontrolą operacyjną przestrzeni powietrznej, obsługą administracyjną oraz obsługą pasażerską. ATN obejmuje rozwiązania i usługi komunikacyjne zapewniające interoperacyjność podsięci ziemia–ziemia, powietrze–ziemia oraz powietrze–powietrze dzięki wykorzystaniu podsięci satelitarnej [84].

Satelitarne systemy łączności wykorzystywane są do przesyłania danych ze statków powietrznych do stacji naziemnych w ramach kontroli operacyjnej przestrzeni powietrznej, zarządzania ruchem lotniczym oraz kontroli lotów. Szerokie zastosowanie satelitów w lotnictwie umożliwia utrzymanie łączności równolegle z wieloma statkami powietrznymi, bez względu na odległość między nimi, przy kosztach niezależnych od odległości i bez znaczącego wpływu warunków meteorologicznych oraz położenia stacji naziemnych na jakość i niezawodność procesu komunikacji [13].

Śledzenie statków powietrznych za pomocą satelitów to technologia dostępna dla operatorów statków powietrznych, która zapewnia im ogromne korzyści stosunkowo niskim kosztem [90]. Statek powietrzny może zgłaszać swoje położenie za pośrednictwem łącza satelitarne. System ADS-B zwiększa bezpieczeństwo lotów i umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie przestrzeni powietrznej [77].

Statki powietrzne wyposażone w urządzenia ADS-B przesyłają informacje o swoim położeniu w przestrzeni poprzez cyfrowe kanały łączności. Kod cyfrowy zawierający te informacje jest aktualizowany kilka razy w ciągu sekundy i transmitowany na wybranych częstotliwościach.

Szczególnie istotne w tym obszarze są systemy ADS-B wykorzystujące satelity umieszczone na niskiej orbicie okołoziemskiej [94].

Badania pokazały [127], że najważniejszymi czynnikami wszystkich systemów wykorzystywanych przez statki powietrzne są anteny nadawcze oraz ilości danych przesyłanych w systemach łączności. Maksymalne ilości danych w dzisiejszych systemach zależą od mocy nadajników w stacjach naziemnych (lub na statkach powietrznych) oraz od czułości odbiorników satelitarnych. Dlatego konieczne jest wcześniejsze określenie ilości przesyłanych danych oraz ustalenie czasu transmisji.

Problemy związane z działaniami i wydajnością lotniczych satelitarnych kanałów łączności są bardzo istotne. Nawet nieznaczne pogorszenie parametrów kanału komunikacyjnego może oddziaływać na szybkość transmisji danych, opóźnienie oraz zasięg. Czynniki te wpływają na bezpieczeństwo lotu i wydatki operacyjne. Dlatego przed wdrożeniem systemu należy zoptymalizować wszystkie najważniejsze parametry [131], np. wykorzystując stworzony w tym celu model, który może również ułatwić wykrycie nieprawidłowo funkcjonujących elementów i być przydatny do testowania działań naprawczych przed wykonaniem ich w przestrzeni kosmicznej lub na stacjach naziemnych.

By odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób można stale utrzymać parametry kanału łączności na optymalnym poziomie, musimy przygotować realistyczny model takiego kanału i zbadać jego zachowanie. Kanał komunikacyjny może powodować zniekształcenie przesyłanych komunikatów [132].

W pracy [130] przedstawiono przegląd wielu praktycznych zastosowań teorii kodowania kanałów, m.in.: w łączności w przestrzeni kosmicznej, łączności satelitarnej, transmisji danych, przechowywaniu danych, komunikacji mobilnej, transferze plików oraz transmisji audio/wideo.

W większości rozdziałów możliwości kodowania zaprezentowano na przykładzie bezpamięciowego kanału Gaussa (Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel), który stanowi podstawę twierdzenia kodowania kanałów Shannona [133].

Bardzo istotna jest również rola transpondera satelitarnego, jako elementu systemu przekaźnika mikrofalowego i anteny, zamontowanego na pokładzie działającego satelity [131]. Transponder wykorzystywany jest do wzmocnienia częstotliwości nośnej w łączu komunikacji satelitarnej „w dół”. Działanie transpondera wzmacniane jest przez wzmacniacz lampowy o fali bieżącej lub wzmacniacz tranzystorowy. Transpondery satelitarne mogą przesyłać dane z prędkością od 50 do 150 Mb/s, a osiągnięcie tych prędkości jest możliwe dzięki zapewnieniu odpowiednich parametrów transpondera.

Niniejszy rozdział poświęcony jest analizie działania lotniczego łączy satelitarnego o paśmie podstawowym, przeprowadzonej z wykorzystaniem modelu pierwotnego, obejmującego nadajnik pokładowy statku powietrznego, łączy „w górę” (AGWN), transponder satelitarny, łączy „w dół” (AWGN) oraz odbiornik w stacji naziemnej. Dodatkowo podczas analizy zbadano również wpływ typu modulacji (BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM), współczynnika E_b/N_0 oraz wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego bez kodowania i z kodowaniem na stopę błędów transmisji (BER).

Wykrywanie błędów i analiza korekty

Najistotniejsza kwestia dotycząca efektywności wykrywania i korygowania błędów w łączu „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna” została przeanalizowana za pomocą klasycznych liniowych kodów blokowych, np. kodu Hamminga (7,4). Jest to liniowy kod korekcyjny, który koduje 4 bity danych jako słowo 7-bitowe, dodając 3 bity parzystości i może korygować dowolne błędy pojedyncze (polegające na przekłamaniu jednego bitu) lub wykrywać wszystkie błędy pojedyncze i podwójne (dwa przekłamate bity). Kod Hamminga (7,4) jest skuteczny, jeśli poziom szumów w medium transmisyjnym nie jest zbyt wysoki i jeśli błędy nie występują seryjnie.

Kod Hamminga (7, 4) można obliczyć za pomocą algebry liniowej, wykorzystującej dwie macierze – macierz generującą kod \mathbf{G} oraz macierz kontroli parzystości \mathbf{H} [132]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1101 \\ 1011 \\ 1000 \\ 0111 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1010101 \\ 0110011 \\ 0001111 \end{bmatrix}$$

Macierz generująca generuje wszystkie możliwe słowa kodowe

$$w = c\mathbf{G},$$

gdzie w to słowo kodowe liniowego kodu c , c oznacza wektor wiersza, a między w i c istnieje bijekcja. Macierz generująca może służyć do skonstruowania macierzy kontroli parzystości (i vice versa).

Wiersze macierzy kontroli parzystości służą kontrolowaniu parzystości poszczególnych słów kodu. To znaczy, że pokazują one, w jaki sposób kombinacje liniowe poszczególnych słów kodowych równają się zeru. Wiersze macierzy kontroli parzystości wykorzystywane są do obliczenia wektora syndromu po stronie odbiorcy i jeśli wektor syndromu jest wektorem zerowym,

to w odebranym słowie nie ma błędów; jeśli zaś wektor syndromu nie jest równy zeru, jego wartość wskazuje, w którym z bitów występuje błąd.

W modelu MATLAB Simulink [129] blok koder Hamminga tworzy kod Hamminga dla komunikatu o długości K i słowa kodowego o długości N . Liczba N musi mieć postać $2^M - 1$, gdzie M to liczba całkowita większa lub równa 3, wówczas K równa się $N - M$. Sygnał wejściowy musi zawierać dokładnie K elementów i jeśli jest transmitowany w ramkach, musi to być wektor kolumny. Sygnał wyjściowy to wektor o długości N . Blok dekodera Hamminga odtwarza komunikat ze słowa kodowego, zakodowanego kodem Hamminga. By odkodowanie było prawidłowe, wartości parametrów w tym bloku powinny być takie same, jak wartości parametrów odpowiadającego mu bloku koder Hamminga.

Symulacja lotniczego kanału satelitarnego

By otrzymać bardziej realistyczny model satelitarnego łącza komunikacyjnego, dodaliśmy do niego transponder satelitarny oraz dwa kanały AWGN, „w górę” i „w dół”. Model symulacyjny MATLAB przedstawiony jest na ilustracji 2.32 i składa się ze źródła informacji (blok generatora binarnego kodu Bernoulliego), nadajnika pokładowego w statku powietrznym (blok koder Hamminga, blok modulatora pasma podstawowego), kanału „w górę” (AWGN), transpondera satelitarnego (czasza anteny odbiorczej, kompleksowy wzmacniacz pasma podstawowego z szumem, czasza anteny nadawczej), odbiornika w stacji naziemnej (blok demodulatora pasma podstawowego, blok dekodera Hamminga) oraz bloku obliczania stopy błędów.

Blok wzmacniacza złożonego pasma podstawowego w transponderze satelitarnym generuje model wzmacniacza złożonego pasma podstawowego z szumem termicznym. Stymuluje on wzmacniacz liniowy i umożliwia określenie poziomu szumu (temperatura szumu – określa poziom szumu w Kelvinach; współczynnik szumów – określa poziom szumu za pomocą poniższego równania:

$$\text{Współczynnik szumów} = 1 + \text{temperatura szumów} / 290).$$

Model na ilustracji 2.32 zawiera również modulator/demodulator BPSK. Podczas symulacji uwzględniono również typy modulacji QPSK, 8PSK i 16QAM.

Dla każdego z tych typów obliczono stopę błędów (BER) z kodowaniem i bez kodowania, jako funkcję współczynnika E_b/N_0 . Wartość współczynnika E_b/N_0 była zmieniana symetrycznie w kanałach AWGN „w górę” i „w dół”.

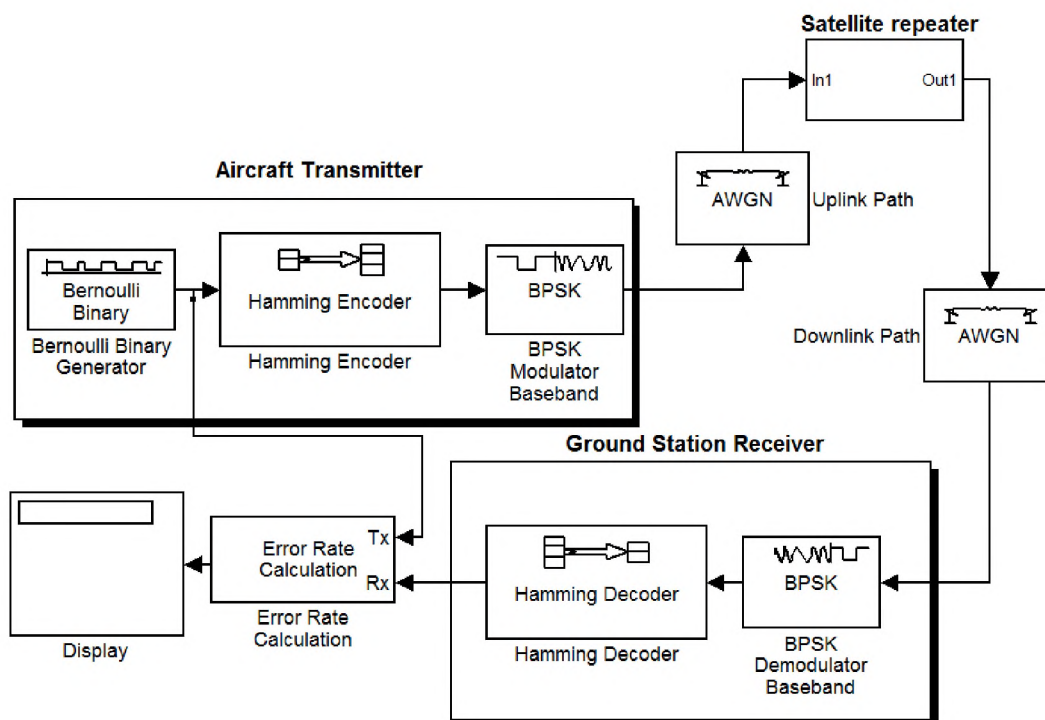
Wszystkie obliczenia były wykonywane przy wzmocnieniu anteny równym jednostce. Przyjęta wartość współczynnika szumów wzmacniacza złożonego pasma podstawowego wynosi 2 (290 K – typowy poziom szumu). Analizując wpływ kodowania na różne typy modulacji przyjęliśmy wzmocnienie liniowego wzmacniacza satelitarnego o wartości równej jednostce.

Model pozwala również na zbadanie zależności pomiędzy BER i wzmocnieniem wzmacniacza transpondera satelitarnego, z kodowaniem i bez kodowania. Zależności takie określono i przeanalizowano dla modulacji BPSK, QPSK, 8PSK oraz 16QAM.

Rezultaty symulacji zostały przedstawione na ilustracjach 2.32–2.39. Przede wszystkim interesująco wygląda porównanie BER dla różnych typów modulacji bez kodowania. Z ilustracji 2.33–2.35 (linie ciągłe) wynika, że wartość BER jest najniższa w przypadku modulacji BPSK, a najwyższa w przypadku modulacji 16QAM. Na przykład dla $E_b/N_0 = 8$ dB:

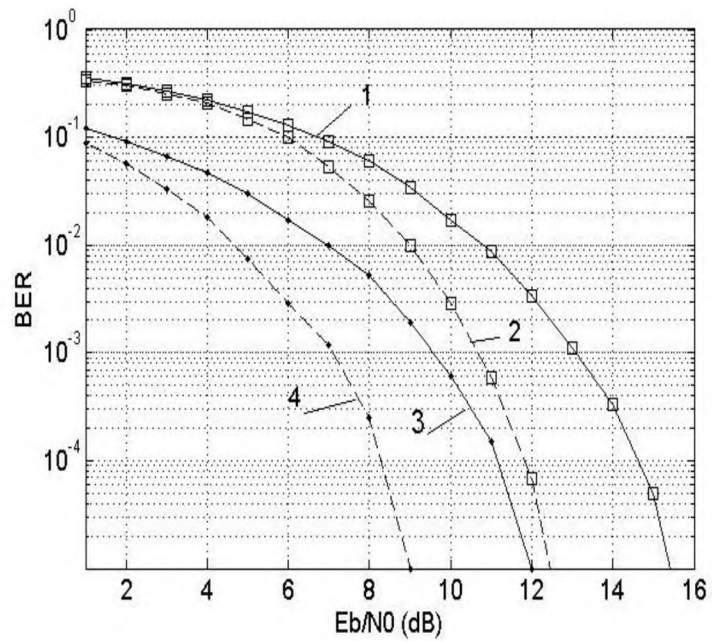
$$\begin{aligned} \text{BER}_{\text{BPSK}} &= 5,8 \cdot 10^{-3}, \\ \text{BER}_{\text{QPSK}} &= 6,0 \cdot 10^{-2}, \\ \text{BER}_{\text{8PSK}} &= 3,1 \cdot 10^{-1}, \end{aligned}$$

$$BER_{16QAM} = 4,1 \cdot 10^{-1}$$

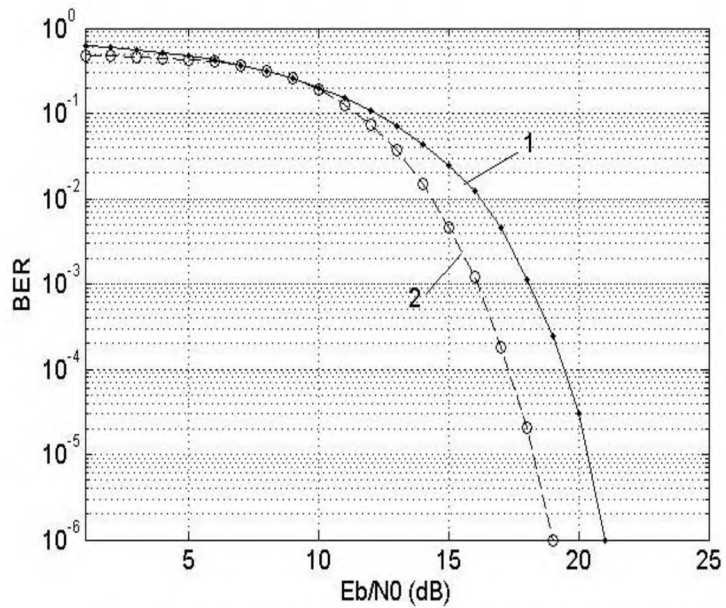


Aircraft transmitter	Nadajnik pokładowy
Satellite repeater	Przełącznik satelitarny
In	Sygnal wejściowy
Out	Sygnal wyjściowy
Bernoulli binary	Binarny kod Bernoulliego
Bernoulli binary generator	Generator binarnego kodu Bernoulliego
Hamming encoder	Koder Hamminga
BPSK Modulator baseband	Modulator pasma podstawowego BPSK
Uplink path	Ścieżka „w górę”
Downlink path	Ścieżka „w dół”
Ground station receiver	Odbiornik w stacji naziemnej
Display	Monitor
Error rate calculation	Obliczanie stopy błędów
Hamming decoder	Dekoder Hamminga
BPSK Demodulator baseband	Demodulator pasma podstawowego BPSK

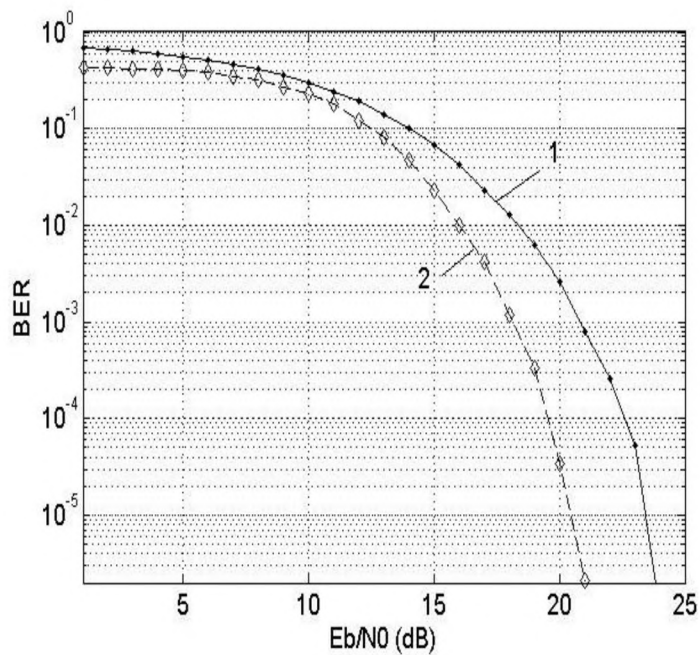
Ilustracja 2.32. Łącze „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna”



Ilustracja 2.33. Wpływ kodowania na modulacje QPSK (1, 2) i BPSK (3, 4) [135]:
 1, 3 bez kodowania;
 2, 4 – z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4), $t = 1$



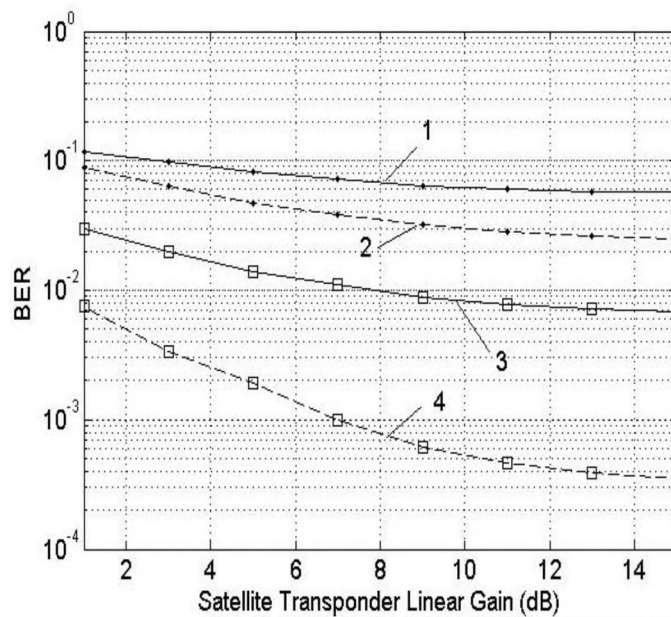
Ilustracja 2.34. Wpływ kodowania na modulację 8PSK [135]:
 1 – bez kodowania;
 2 – z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4), $t = 1$



Ilustracja 2.35. Wpływ kodowania na modulację 16QAM [135]:

1 – bez kodowania;

2 – z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4), $t = 1$



BER	BER (stopa błędów)
Satellite Transponder Linear Gain	Wzmocnienie liniowe transpondera satelitarne (dB)

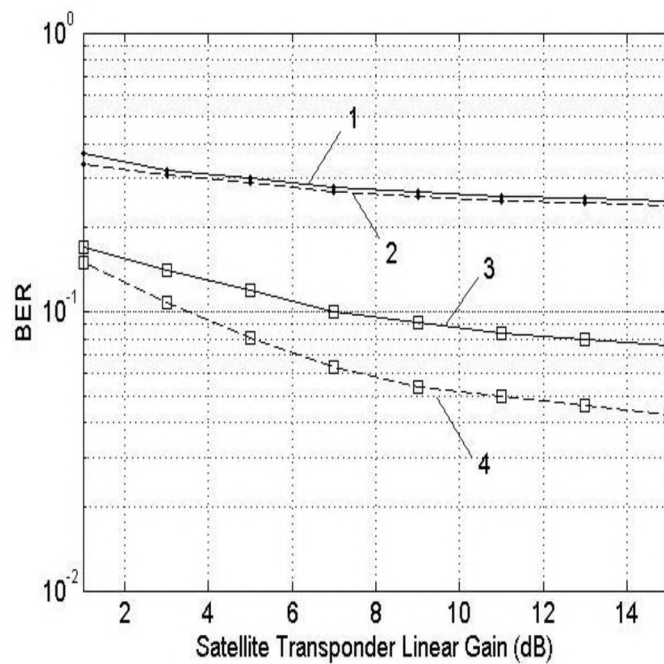
Ilustracja 2.36. Wpływ wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarne na modulację BPSK [135]:

1 – $E_b/N_0 = 1$ dB, bez kodowania;

2 – $E_b/N_0 = 1$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$;

3 – $E_b/N_0 = 5$ dB, bez kodowania;

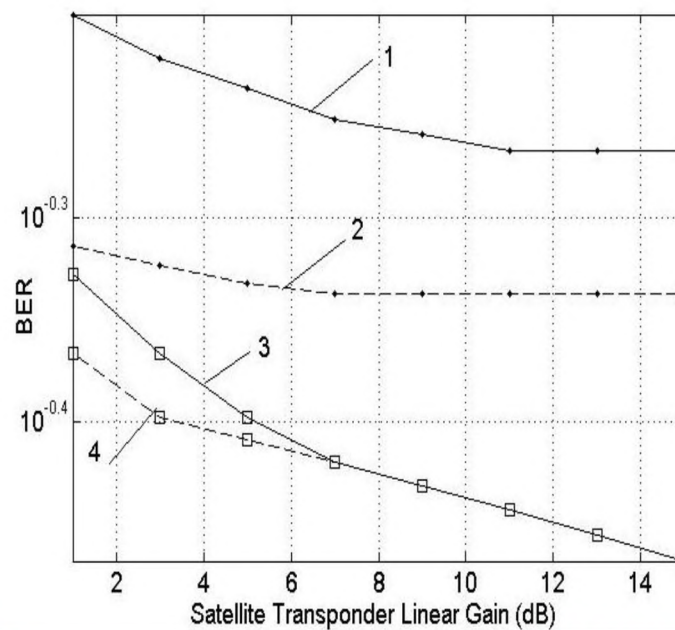
4 – $E_b/N_0 = 5$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$



BER	BER (stopa błędów)
Satellite Transponder Linear Gain	Wzmocnienie liniowe transpondera satelitarnego (dB)

Ilustracja 2.37. Wpływ wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na modulację QPSK [135]:

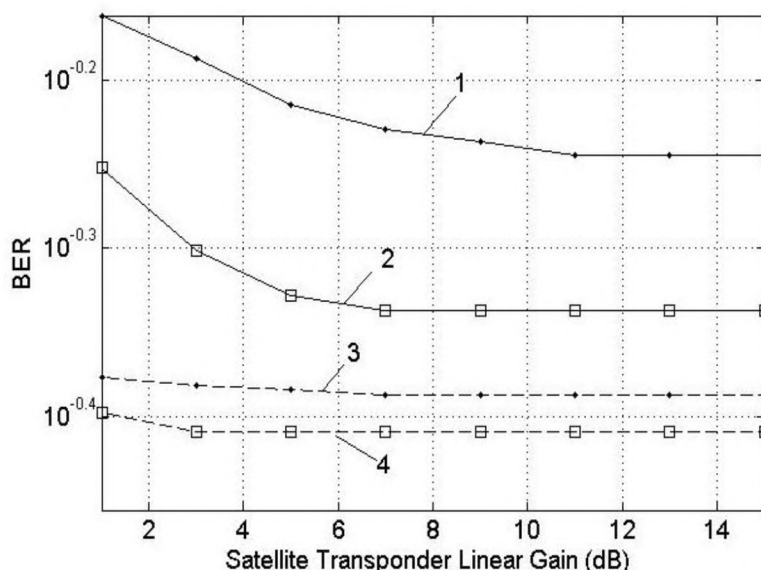
- 1 – $E_b/N_0 = 1$ dB, bez kodowania;
- 2 – $E_b/N_0 = 1$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$;
- 3 – $E_b/N_0 = 5$ dB, bez kodowania;
- 4 – $E_b/N_0 = 5$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$



BER	BER (stopa błędów)
Satellite Transponder Linear Gain	Wzmocnienie liniowe transpondera satelitarnego (dB)

Ilustracja 2.38. Wpływ wzmacnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na modulację 8PSK [135]:

- 1 – $E_b/N_0 = 1$ dB, bez kodowania;
- 2 – $E_b/N_0 = 1$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$;
- 3 – $E_b/N_0 = 5$ dB, bez kodowania;
- 4 – $E_b/N_0 = 5$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$



BER	BER (stopa błędów)
Satellite Transponder Linear Gain	Wzmacnienie liniowe transpondera satelitarnego (dB)

Ilustracja 2.39. Wpływ wzmacnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na modulację 16QAM [135]:

- 1 – $E_b/N_0 = 1$ dB, bez kodowania;
- 2 – $E_b/N_0 = 1$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$;
- 3 – $E_b/N_0 = 5$ dB, bez kodowania;
- 4 – $E_b/N_0 = 5$ dB, z kodowaniem kodem Hamminga (7, 4) $t = 1$

Im większa jest liczba symboli modulacji, tym bliżej siebie ułożone są wykresy, np. przy $E_b/N_0 = 8$ dB:

$$\begin{aligned} \text{BER}_{\text{QPSK}} / \text{BER}_{\text{BPSK}} &\approx 10,3, \\ \text{BER}_{\text{8PSK}} / \text{BER}_{\text{QPSK}} &\approx 5,2, \\ \text{BER}_{\text{16QAM}} / \text{BER}_{\text{8PSK}} &\approx 1,3. \end{aligned}$$

Ponadto kodowanie kodem Hamminga (7,4), $t = 1$ pokazuje, że jego wpływ na zmniejszenie stopy błędów jest największy w przypadku modulacji BPSK. Na przykład przy $E_b/N_0 = 8$ dB:

$$\begin{aligned} (\text{BER}_{\text{BPSK}} - \text{BER}_{\text{kodowaneBPSK}}) / \text{BER}_{\text{BPSK}} &\approx 96\%, \\ (\text{BER}_{\text{QPSK}} - \text{BER}_{\text{kodowaneQPSK}}) / \text{BER}_{\text{QPSK}} &\approx 57\%, \\ (\text{BER}_{\text{8PSK}} - \text{BER}_{\text{kodowane8PSK}}) / \text{BER}_{\text{8PSK}} &\approx 0\%, \\ (\text{BER}_{\text{16QAM}} - \text{BER}_{\text{kodowane16QAM}}) / \text{BER}_{\text{16QAM}} &\approx 2\%. \end{aligned}$$

Należy zauważyć, że w zakresie $5 \text{ dB} \leq E_b/N_0 \leq 10 \text{ dB}$ efektywność kodowania dla modulacji 8PSK jest niższa niż dla 16QAM (porównaj ilustracje 2.35 i 2.36).

Badanie zależności stopy błędów transmisji (BER) od wzmacnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego przeprowadzono dla dwóch wartości współczynnika E_b/N_0 (1 dB i 5 dB)

w kanałach „w górę” i „w dół”, przy wzmocnieniu anteny odbiorczej/nadawczej o wartości równej jednostce i współczynniku szumów wzmacniacza złożonego pasma podstawowego równym 2 (ilustracje 2.36–2.39).

Badanie pokazało, że wzmocnienie wzmacniacza transpondera satelitarnego ma największy wpływ na stopę błędów w przypadku modulacji BPSK (ilustracja 2.36). Podobny, choć nie tak silny wpływ możemy zaobserwować w przypadku modulacji QPSK (porównaj ilustracje 2.36 i 2.37).

Zarówno w przypadku BPSK, jak i QPSK spadek BER jest większy dla wyższych wartości współczynnika E_b/N_0 (porównaj odpowiednio górne wykresy dla $E_b/N_0 = 1$ dB i dolne wykresy dla $E_b/N_0 = 5$ dB na ilustracjach 2.36 i 2.37).

Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku modulacji 8PSK i 16QAM (ilustracje 2.38 i 2.39). Dla $E_b/N_0 = 1$ dB spadek BER po kodowaniu jest większy, niż dla $E_b/N_0 = 5$ dB – co oznacza efekt odwrotny niż w przypadku BPSK i QPSK.

Innym ciekawym wynikiem jest spostrzeżenie, że im większa jest liczba alternatywnych sygnałów modulacyjnych, tym mniejszy jest wpływ wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na spadek stopy błędów (wykresy na rys. 2.38 i 2.39 przy wzmocnieniu przekraczającym 6 dB).

Znaczenie łączności satelitarnej stale rośnie, a wraz z nim zwiększa się międzynarodowa konkurencja w branży kosmicznej. Poszerza się również zakres europejskich działań badawczo-rozwojowych w tym obszarze, obejmujących kolejne programy i organizacje. Omówienie tych działań [128] wskazuje, że „optymalizacja systemów satelitarnych wymaga uwzględnienia kwestii transmisji informacji już we wczesnych fazach projektowania. Kanały transmisyjne mają ogromny wpływ na wydajność systemów, dlatego należy tworzyć odpowiednie modele umożliwiające symulację i ocenę jakości oraz efektywności systemów. Symulacje i modele umożliwiają również opracowywanie i wprowadzanie odpowiednich rozwiązań pozwalających ograniczać lub wyeliminować potencjalne utrudnienia, jakie mogą występować w kanałach transmisji danych”.

Przedstawione tutaj wyniki naszych symulacji mogą pomóc w zrozumieniu i rozwiązaniu powyższych problemów. Niniejszy rozdział omawia analizę działania lotniczego łącza satelitarnego w paśmie podstawowym.

Model stworzony na potrzeby tej analizy obejmuje nadajnik pokładowy, kanały „w górę” i „w dół” (AWGN), transponder satelitarny oraz odbiornik w stacji naziemnej. Przedmiotem badania był wpływ typu modulacji (BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM) oraz wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego, z kodowaniem i bez kodowania, na stopę błędów transmisji (BER). Przeanalizowano również efektywność wykrywania i korekty błędów w łączu „statek powietrzny–satelita–stacja naziemna” z wykorzystaniem kodu Hamminga (7,4).

Najważniejsze wyniki badania zachowań modelu obejmującego dwa kanały AWGN i transponder satelitarny to:

- najniższa stopa błędów (BER) występuje w modulacji BPSK, a najwyższa – w modulacji 16QAM;
- im większa jest liczba alternatywnych symboli modulujących, tym bliżej siebie znajdują się wykresy BER jako funkcji współczynnika E_b/N_0 w sekwencji BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM;
- kodowanie z użyciem kodu Hamminga (7,4) pokazuje, że jego wpływ na zmniejszenie BER jest największy w przypadku modulacji BPSK;
- w zakresie $5 \text{ dB} \leq E_b/N_0 \leq 10 \text{ dB}$ efektywność kodowania w przypadku modulacji 8PSK jest niższa niż w przypadku 16QAM;

- wzmocnienie wzmacniacza transpondera satelitarnego ma największy wpływ na BER w przypadku modulacji BPSK;
- wpływ kodowania na BER jest podobny w przypadku modulacji BPSK i QPSK, jednak w przypadku QPSK jest on mniejszy;
- nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku modulacji typu 8PSK i 16QAM – w tym wypadku im większa jest liczba alternatywnych symboli modulujących, tym mniejszy jest wpływ wzmocnienia wzmacniacza transpondera satelitarnego na zwiększenie lub zmniejszenie stopy błędów [135].

2.2.7. Badanie parametrów anteny współliniowej w systemie odbiorczym za pomocą metod numerycznych

W związku z rosnącym znaczeniem nowych technologii ADS-B dla poprawy zarządzania globalnym systemem żeglugi powietrznej kwestia ta staje się również istotnym elementem procesu kształcenia na wielu uczelniach lotniczych. Celem wprowadzenia tego tematu jest przekazanie studentom odpowiedniej wiedzy, stworzenie prostego systemu odbierania sygnałów ADS-B oraz wykorzystanie tej technologii do zarządzania ruchem lotniczym.

System naziemny odbierający sygnały ADS-B wysyłane z transponderów pokładowych działających w trybie S, na częstotliwości 1090 MHz może służyć jako wirtualny radar, zapewniający obraz ruchu lotniczego w czasie rzeczywistym. Zazwyczaj system taki składa się z czterech elementów: anteny, odbiornika, dekodera oraz oprogramowania komputerowego.

By stworzyć rzeczywisty model naziemnego systemu ADS-B, należy przede wszystkim określić parametry anteny.

Do obliczania pola elektromagnetycznego i określania związanej z nim charakterystyki promieniowania anteny wykorzystuje się zazwyczaj metody numeryczne, w tym metodę momentów [137], w których metalowe elementy anten zastępowane są przez odpowiednie powierzchniowe prądy elektryczne i tworzone są odpowiednie modele siatkowe obiektów. W ten sposób rozwiązuje się problemy związane z wyznaczeniem pola elektromagnetycznego powstającego w wyniku działania tych prądów. W tym celu powierzchnię metalową dzieli się na segmenty elementarne, a prądy elektryczne w każdym segmencie przedstawia się w postaci rozkładu funkcji podstawowych za pomocą czynników ważących [138, 139, 140].

W oprogramowaniu stworzonym w National Aviation University [140] do aproksymacji prądów wykorzystuje się funkcje odcinkowe – stałe, a wzdłuż metalowego przewodu pod napięciem wyznacza się warunki brzegowe pola elektromagnetycznego. W rezultacie określenia warunków brzegowych uzyskujemy układ równań całkowych umożliwiających obliczenie współczynników funkcji podstawowych, które są amplitudami prądu w ramach segmentów elementarnych. Układ równań w tym oprogramowaniu [139] można rozwiązać za pomocą relatywnie współzależnych prądów, wykorzystując metodę Krauta [137].

Dokładność metody momentów jest większa w przypadku mniejszych segmentów elementarnych. Przyjmuje się, że dokładność jest na dopuszczalnym poziomie w segmentach o wielkości nieprzekraczającej $\lambda/10$, gdzie λ to długość fali w wolnej przestrzeni. Liczba równań całkowych równa jest liczbie segmentów elementarnych N , która wzrasta wraz ze wzrostem wielkości obiektu lub wraz ze wzrostem częstotliwości. Dlatego rozwiązywanie problemów związanych z rozpraszaniem fal radiowych na powierzchni obiektu z wykorzystaniem metody momentów wymaga rozwiązania układu równań całkowych w formie macierzy o dużych wymiarach.

Cel badania

Celem niniejszego rozdziału jest:

- 1) zbadanie pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez antenę współliniową z wykorzystaniem stworzonego oprogramowania [4], z wykorzystaniem metody momentów;
- 2) stworzenie eksperymentalnego modelu anteny naziemnej do odbioru sygnałów ADS-B na częstotliwości 1090 MHz;
- 3) analiza rezultatów dozoru ruchu lotniczego za pomocą stworzonego systemu ADS-B.

Sekwencja obliczeń charakterystyki promieniowania anteny współliniowej

Wektor pola elektrycznego wzbudzonego przez obiekt elektromagnetyczny zazwyczaj określany jest przez wektorową sumę projekcji:

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{l}_r E_{r\theta\Sigma} + \vec{l}_\theta E_{\theta\Sigma} + \vec{l}_\varphi E_{\varphi\Sigma},$$

którą należy obliczyć.

Dla celów obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody momentów antena współliniowa została podzielona na N segmentów, o długości znacznie mniejszej od długości fali. Łączna amplituda poszczególnych komponentów wektora \vec{E}_Σ w polu dalekim promieniowania każdego z segmentów obliczana jest z następującej zależności [137]:

$$\dot{E}_\theta = -i \frac{ik^2}{\omega\varepsilon} G(z, z') \{r_2 [\sin \theta_2 \cos \theta \cos(\varphi_2 - \varphi) - \cos \theta_2 \sin \theta_2] - r_1 [\sin \theta_1 \cos \theta \cos(\varphi_1 - \varphi) + \cos \theta_1 \sin \theta]\};$$

$$\dot{E}_\varphi = -i \frac{ik^2}{\omega\varepsilon} G(z, z') [r_2 \sin \theta_2 \sin(\varphi_2 - \varphi) - r_1 \sin \theta_1 \sin(\varphi_1 - \varphi)];$$

$$\dot{E}_r \cong 0.$$

Wskaźniki 1 i 2 należą do współrzędnych sferycznych punktów $[r, \theta, \varphi]$, które określają początek i koniec segmentu elementarnego anteny o łącznej amplitudzie prądu \dot{I} .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$G(z, z') = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r};$$

$$r = \sqrt{(z - z')^2 + a^2};$$

gdzie a to promień pręta anteny; z to współrzędna punktu obserwacyjnego na powierzchni; z' to współrzędna punktu na osi elementu modelu sieci o długości L , w którym znajduje się częściowe źródło prądu liniowego:

$$I(z') = \int_L j(z) dz.$$

Metoda określania natężenia prądu w poszczególnych elementach modelu to numeryczne rozwiązanie równania Pocklingtona [138]:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + k^2 G(z, z') \right] dz' = -i\omega\varepsilon E_z^i(z).$$

(2.2.7.1)

Do rozwiązania równań (2.2.7.1) z wykorzystaniem metody momentów należy określić rozkład prądu $I(z')$ wzdłuż osi z dowolnego fragmentu modelu w systemie wybranych funkcji podstawowych $J_n(z')$:

$$I(z') = \sum_{n=1}^N I_n J_n(z'),$$

w którym należy wyznaczyć wartość nieznaną stałą I_n . Wówczas równanie całkowe Pocklingtona przyjmie następującą postać:

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} j_n(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + k^2 G(z, z') \right] dz' = -i\omega \varepsilon E_z^i(z).$$

Po zastosowaniu funkcji wazących W_m wzajemnego wpływu elementu m na element n równanie Pocklingtona wygląda w następujący sposób:

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{L_n} \int_{L_m} W_m(z) j_n(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + k^2 G(z, z') \right] dz' dz = -i\omega \varepsilon \int_{L_m} W_m(z) E_z^i(z) dz.$$

Zgodnie z metodą Galerkiina wybrana funkcja waząca W_m musi być taka sama jak funkcja podstawowa $J_m(z')$:

$$W_m = J_m(z').$$

Całka w równaniu Pocklingtona reprezentuje aspekt oporności, oznaczana jest jako Z_{mn} i nazywana jest często ogólną impedancją. Prawa strona równania reprezentuje ogólne napięcie wzbudzające U_m . Układ równań w formie macierzy wygląda następująco:

$$[Z] \times [I] = [U],$$

gdzie $[Z]$ to macierz ogólnej impedancji; $[I]$ to wektor nieznaną współczynników rozchodzenia się prądów; $[U]$ to wektor źródeł wzbudzenia. Układ równań w formie macierzy można rozwiązać przy użyciu specjalnego oprogramowania, po przekształceniu elementów:

$$[I] = [Z]^{-1}[U],$$

lub też po rozwinięciu w odpowiedni układ równań:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \dot{Y}_{11} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{12} \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{1n} \dot{U}_n; \\ i_2 &= \dot{Y}_{21} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{22} \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{2n} \dot{U}_n; \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots ; \\ i_n &= \dot{Y}_{n1} \dot{U}_1 + \dot{Y}_{n2} \dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{nn} \dot{U}_n \end{aligned} \right\}$$

gdzie i_p to amplituda i faza prądu przepływającego przez zaciski elementu p anteny; \dot{Y}_{pq} to wzajemne łączne przewodnictwo pomiędzy elementami p i q ; \dot{U}_p to amplituda i faza napięcia na zaciskach elementu p . Układ równań został rozwiązany w programie wykorzystującym współzależne prądy przy użyciu metody Krauta. Wyniki wykorzystywane są do określania projekcji wektorów modułów pola elektrycznego i ich znormalizowanych wartości [138].

Wzory zaprezentowane w publikacjach [137, 138] stanowią podstawę obliczeń intensywności pola promieniowania w charakterystyce promieniowania anteny, wykonywanych z wykorzystaniem zestawu oprogramowania [139].

Obliczanie charakterystyki promieniowania

Pierwszym krokiem jest określenie wymagań dla systemu anteny naziemnej ADS-B i wybranie typu anteny współliniowej.

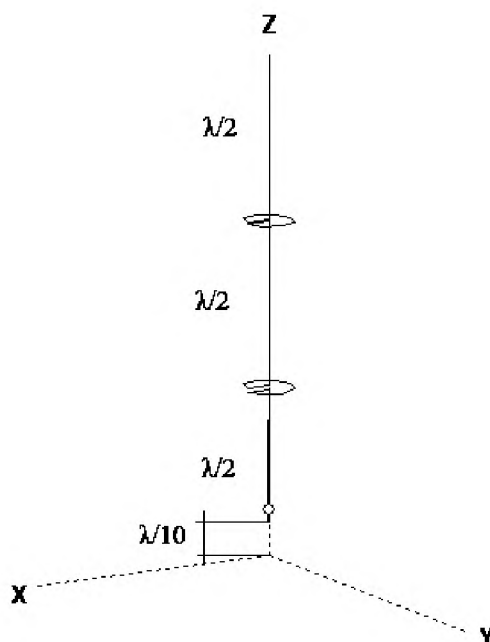
Antena naziemna do odbioru sygnałów ADS-B powinna wytwarzać promieniowanie kołowe w płaszczyźnie poziomej, z polaryzacją w płaszczyźnie pionowej. Drugorzędne urządzenia radarowe działające w trybie S zapewniają pokrycie obszaru nadzorowanego przez centrum kontroli lotów, równego lub większego niż pole widzenia kontrolerów. Dlatego by zapewnić wysokie

wzmocnienie w płaszczyźnie pionowej, antena współliniowa składa się z trzech synfazowych półfalowych segmentów, pomiędzy którymi zainstalowano dwa zmieniające fazę łączniki, o długości $\lambda/2$, umożliwiające wzbudzenie wibratorów w trybie synfazowym.

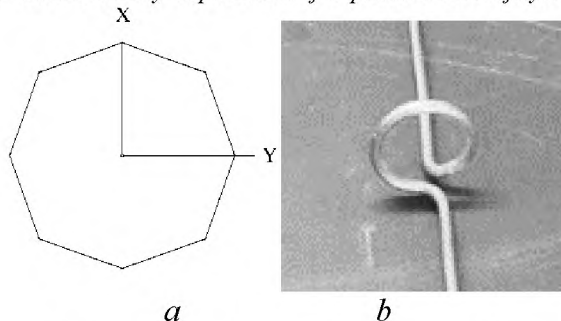
Obszar promieniowania anteny współliniowej obliczono z wykorzystaniem programów [139, 140], a następnie porównano otrzymane rezultaty.

Dane początkowe wykorzystane do obliczenia pola promieniowania są identyczne. Uwzględniają one wysokość, na jakiej umieszczono antenę oraz następujące parametry: przenikalność względną $\epsilon = 9,0$ i przewodność powierzchni właściwej $\gamma = 0,01 \text{ (ohm} \times \text{m)}^{-1}$. W obu programach wykorzystano metodę momentów wymagającą podzielenia masztu anteny na segmenty elementarne. Program [139] umożliwia wykonywanie obliczeń przy stałej liczbie segmentów. Program MMANA-GAL [140] umożliwia wybór od 40 do 400 segmentów o różnej gęstości na całej długości anteny. Dla porównania wyników obliczeń wybrano 400 segmentów elementarnych. Antena zainstalowana została na wysokości $\lambda/10$ nad ziemią.

Wybrana konfiguracja anteny przedstawiona została na ilustracji 2.40. Elementem zmieniającym fazę jest w niej cewka z drutu o długości $\lambda/2$, o kształcie przypominającym ośmiokąt (ilustracja 2.41, a).



Ilustracja 2.40. Model anteny współliniowej w przestrzeni trójwymiarowej [141]



Ilustracja 2.41. Antena współliniowa [141]:

a – model anteny w płaszczyźnie XOY;

b – fragment anteny

Podczas symulacji uwzględniono różne sposoby wygięcia drutu: od płaskiego do spiralnego o stopniowym przyroście wzdłuż osi OZ $(0,01 \dots 0,1)$ λ . Odkryto, że płaska cewka ułożona prostopadle do głównego elementu anteny wytwarza najmniejsze pasożytnicze pole poziome.

Interfejs programu [139] wykorzystywany do wprowadzania danych na temat parametrów i geometrii anteny przedstawiony został na ilustracji 2.42.

Wyniki obliczeń charakterystyki promieniowania anteny współliniowej z powierzchnią właściwą o następujących parametrach: $\varepsilon = 9,0$ i $\gamma = 0,01$ ($\text{ohm} \times \text{m}$)⁻¹ przedstawione zostały w tabeli na ilustracji 2.42.

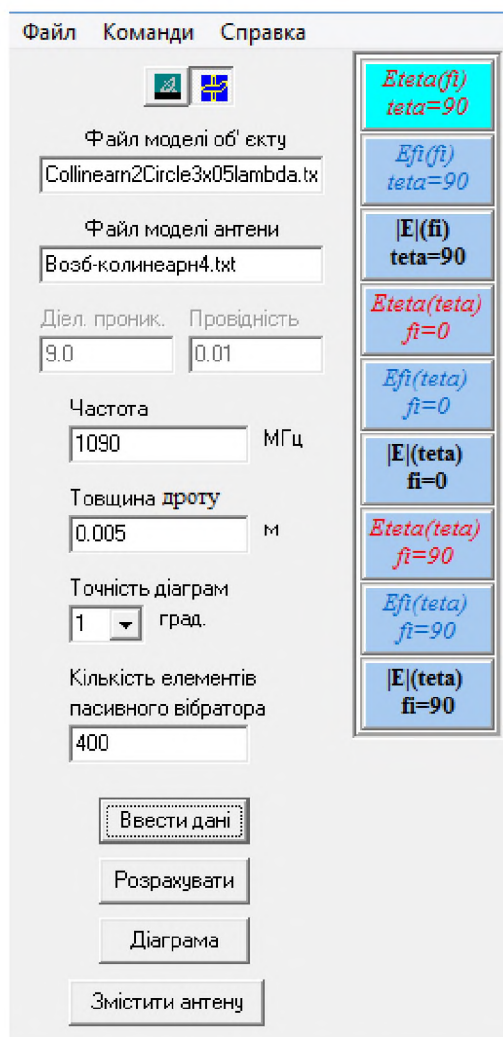
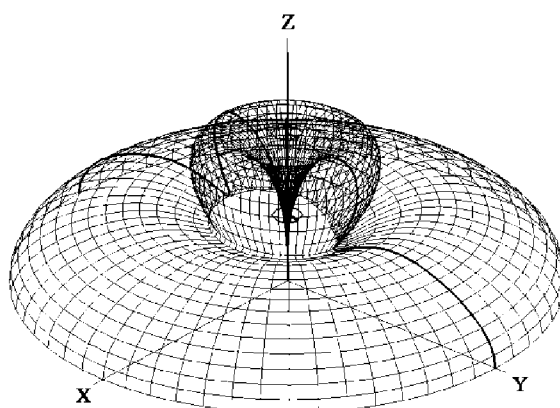


Иллюстрация 2.42. Интерфейс программы [138]

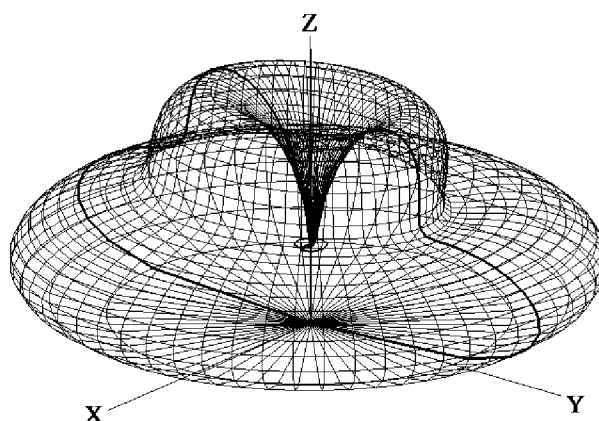
Програми [139] i [140] opierają się na różnych metodach przetwarzania danych wyjściowych. Program [139] wykorzystuje dwie metody normalizacji modułów pola elektrycznego i przedstawia charakterystykę promieniowania w skali liniowej. W tym przypadku maksymalny moduł amplitudy pola elektrycznego równy jest 1,0 jednostce względnej.

Program [140] z kolei wykorzystuje logarytmiczną metodę normalizacji modułów pola elektrycznego. Dla lepszego porównania wyników w programie [139] zastosowano lokalny tryb normalizacji.

Zmiany charakterystyki promieniowania podczas przejścia od idealnej do realnej przewodności powierzchni właściwej przeanalizowano z wykorzystaniem zaawansowanych aplikacji graficznych [140]. Pokazują one, że charakterystykę promieniowania można znacząco poprawić, redukując występujące „wady” (ilustracje 2.43 i 2.44).



Ilustracja 2.43. Trójwymiarowa charakterystyka promieniowania anteny uzyskana za pomocą programu MMANA-GAL dla idealnie przewodzącej powierzchni właściwej [141]



Ilustracja 2.44. Trójwymiarowa charakterystyka promieniowania anteny współliniowej uzyskana za pomocą programu MMANA-GAL dla powierzchni właściwej o parametrach: $\varepsilon = 9,0$ i $\gamma = 0,01$ ($\text{ohm} \times \text{m}$)⁻¹ [141]

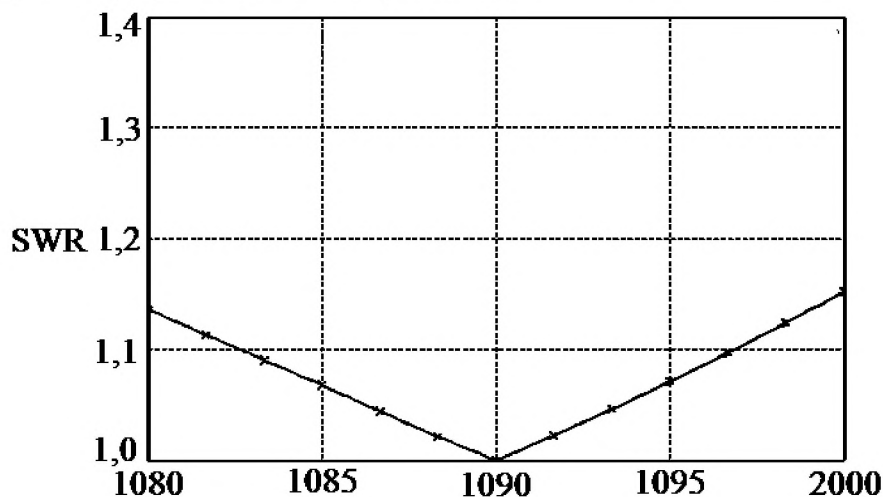
Eksperymentalny model anteny

Na podstawie obliczeń badacze wykonali eksperymantalną antenę współliniową (ilustracja 2.41b) z drutu miedzianego o grubości 5 mm. Antena zawierała elementy zmieniające fazę (płaskie cewki o długości drutu $\lambda/2$) umieszczone pomiędzy elementami półfalowymi umożliwiające zasilanie synfazowe. Zapobiegają one powstawaniu prądów o kierunku przeciwnym do elementów anteny współliniowej. Rozwiązanie takie zapewnia synfazowe zasilanie pionowych elementów anteny i pożądany kształt charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej o nachyleniu z największym listkiem promieniowania wzdłuż powierzchni gruntu. Przy kącie nachylenia 16° wzmocnienie anteny wynosi $G_v = 0,1$ dB. Dla skompensowania komponentów poziomego pola elektromagnetycznego drut w elementach zmieniających fazę został skręcony

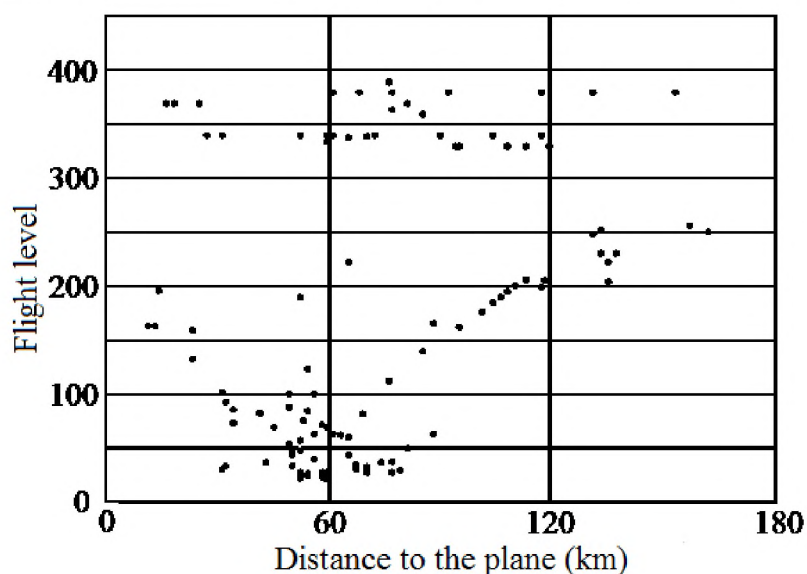
odpowiednio w prawo i w lewo. Jest to antena wąskopasmowa. Jak pokazuje ilustracja 6, pracuje ona w paśmie 67,74 MHz przy współczynniku fali stojącej niższym niż 1,5.

Zbudowana antena współliniowa zapewnia zadowalające połączenie na częstotliwości 1090 MHz przy współczynniku impedancji wejściowej $Z = 76,049 - j258,117 \text{ oma}$. Umożliwia to odbiór sygnałów z transponderów pokładowych w trybie S rozszerzony squitter i właściwe funkcjonowanie naziemnego systemu ADS-B (ilustracja 2.46).

Podczas badania stwierdzono, że antena ma niewielkie „ślepe pole”, co umożliwia śledzenie nawet samolotów przelatujących bezpośrednio ponad nią.



Ilustracja 2.45. Zależność współczynnika fali stojącej od częstotliwości [141]

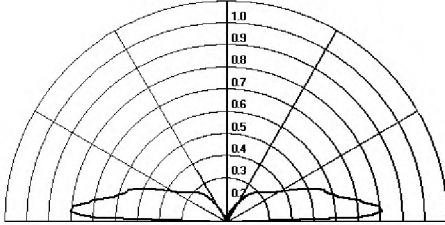
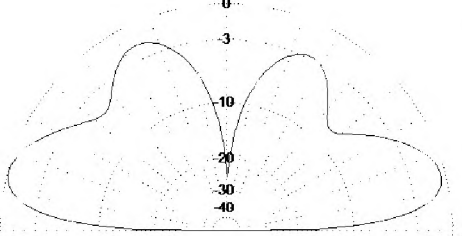
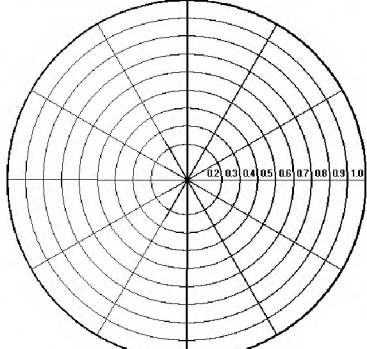
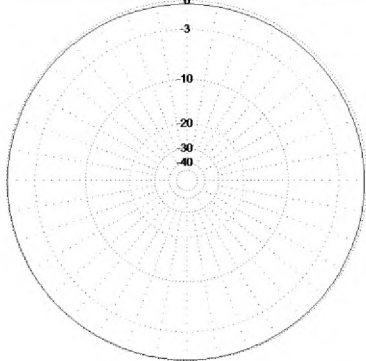


Flight level	Poziom lotu
Distance to the plane	Odległość od samolotu (km)

Ilustracja 2.46. Zależność od odległości do samolotu na różnych poziomach lotu, określona w wyniku eksperymentu [141]

Jak pokazuje ilustracja 2.47, zbudowana antena umożliwia odbiór sygnałów ADS-B ze statków powietrznych oddalonych nawet o 600 km od odbiornika umieszczonego w Kijowie, na dachu jednego z budynków uniwersytetu, o wysokości 20 m.

Tabela 2.5. Charakterystyka promieniowania anteny współliniowej [141]

Składniki wektora \vec{E}_E	Program NAU (skala liniowa)	Program MMANA-GAL (skala logarytmiczna)
Komponent pola elektrycznego w płaszczyźnie pionowej XOZ $E_{\theta}(\theta)|_{\varphi=0^{\circ}}$		
Komponent pola elektrycznego w płaszczyźnie poziomej XOY $E_{\theta}(\varphi)|_{\theta=90^{\circ}}$		



Ilustracja 2.47. Wynik obserwacji – fragment mapy sytuacji w przestrzeni powietrznej [141]

W ramach eksperymentu przeprowadzono obliczenia charakterystyki pola elektromagnetycznego i promieniowania współliniowej anteny odbiorczej.

Do obliczeń parametrów pola elektrycznego wykorzystano programy [139] i [140], które dały podobne wyniki i pozwoliły na przeprowadzenie analizy jakościowej charakterystyki w płaszczyźnie pionowej.

Eksperyment pokazał, że stworzony naziemny system odbiorczy ADS-B zapewnia pełną łączność na kanale „transponder pokładowy–odbiornik naziemny”, w trybie S, na częstotliwości 1090 MHz [141].

2.3. Modelowanie i technologie w zarządzaniu żeglugą powietrzną

2.3.1. Innowacyjne koncepcje synergicznego zarządzania ruchem lotniczym w warunkach zwielokrotnionego konfliktu

Bezpieczeństwo współczesnych statków powietrznych zależy w dużym stopniu od natężenia lotów. Specjaliści przewidują, że do 2025 r. ruch lotniczy w Europie zwiększy się 1,6 razy w porównaniu z 2011 r., a do 2050 r. – 2,6 razy [148]. Ta tendencja rosnącej intensywności ruchu prowadzi również do zwiększonej liczby konfliktów w powietrzu, w których dochodzi do interakcji trzech lub więcej potencjalnie zagrożonych statków powietrznych i zamiast pojedynczego „konfliktu pary” coraz częściej dochodzi do konfliktu większej liczby samolotów (konfliktu zwielokrotnionego). Światowa społeczność lotnicza oczekuje odejścia od regulowanych sztywnych torów lotów na rzecz swobodnych trajektorii (swobodne loty, 4D), możliwości użytkowania w jednej przestrzeni zarówno tradycyjnych załogowych, jak i sterowanych zdalnie bezzałogowych statków powietrznych (UAV, RPAS) [151], a także rozdzielania odpowiedzialności za wykrywanie i rozwiązywanie sytuacji konfliktowych pomiędzy pilotów i kontrolerów (koncepcja A³), wykorzystujących narzędzia ADS-B [142]. Równocześnie wymagania dotyczące bezpieczeństwa zarówno autonomicznych, jak i kontrolowanych usług lotniczych wykonywanych przez załogowe i bezzałogowe statki powietrzne we wspólnej przestrzeni (obejmującej statyczne i dynamiczne strefy wyłączone z ruchu oraz ograniczenia) pozostają niezmiennie.

Problem bezpieczeństwa we współczesnej przestrzeni powietrznej można rozwiązać, tworząc jedną systemową metodę rozwiązywania sytuacji zwielokrotnionego konfliktu dla wszystkich typów statków powietrznych w krótkim, średnim i długim horyzoncie czasowo-przestrzennym.

Obecnie do rozwiązania sytuacji konfliktowych, w których uczestniczą pary statków powietrznych, wykorzystuje się zazwyczaj statystyczne, probabilistyczne i optymalizacyjne metody rozstrzygnięcia konfliktów w powietrzu.

Analiza zastosowania metod statystycznych i probabilistycznych pokazuje, że nie są one wystarczająco skutecznym narzędziem projektowania bezkolizyjnych trajektorii statków powietrznych w sytuacjach, w których:

- ilość danych statystycznych na temat procesów toczących się w środowisku żeglugi powietrznej w momencie wystąpienia konfliktu jest niewielka lub dane takie są niedostępne;
- dane statystyczne na temat charakterystyki konfliktu są mało wiarygodne;
- okresowe weryfikacje hipotez statystycznych dotyczących konfliktów są niemożliwe lub utrudnione itd.

Poważnym ograniczeniem metod optymalizacyjnych jest fakt, iż są one oparte na zastosowaniu funkcji kosztów (jakościowej). Rozszerzenie funkcji kosztów poprzez włączenie wielu parametrów prowadzi do znaczącego zwiększenia modelu kontrolowanego procesu. Złożoność kontrolowanego procesu (N) zależy od złożoności procesu kontrolującego [154]:

$$N \geq n + 0,5n(n + 1),$$

gdzie n – to wymiarowość procesu kontrolującego.

Analiza powyższego wyrażenia pokazuje, że zwiększenie kompleksowości matematycznego modelu konfliktu prowadzi do znaczącego zwiększenia wymiaru bezkonfliktowego regulatora i tworzy efekt tzw. przekleństwa wymiarowości.

Jak widać, w wielu przypadkach wykorzystanie metod statystycznych, probabilistycznych i optymalizacyjnych nie pozwala na skuteczne wyznaczanie bezkonfliktowych trajektorii statków powietrznych w sytuacjach zwielokrotnionego konfliktu.

Omówienie metod synergicznych

Główna komplikacja w projektowaniu i rozwoju synergicznych metod rozstrzygania zwiłokrotnionych konfliktów w powietrzu wynika z potrzeby rozwiązania dwóch typów problemów – zewnętrznych i wewnętrznych. Problemy zewnętrzne to przede wszystkim konieczność uwzględnienia wpływu czynników środowiskowych na rozwiązanie konfliktu. Uczestnicy takich sytuacji powinni wspólnie analizować warunki otoczenia, by zapewnić właściwe reakcje i ograniczyć potencjalny negatywny wpływ tych warunków. Problem wewnętrzny zaś wiąże się z potrzebą uświadomienia uczestnikom sytuacji konfliktowej jej synergicznych właściwości, co może ułatwić im znalezienie bezpiecznego rozwiązania. Działania wszystkich zaangażowanych stron powinny być spójne i w pełni zgodne z obowiązującymi przepisami.

Rozwiązywanie takich problemów z wykorzystaniem standardowych metod naukowych wydaje się niemożliwe. Wymaga to zastosowania synergicznego (niezależnego) podejścia do zarządzania ruchem lotniczym.

Podejście synergiczne stosowane jest przez badaczy już od pewnego czasu. Jednym z prekursorów tego podejścia był A. Kolesnikow, który wykorzystał je do syntezy praw umożliwiających kontrolę nieliniowych obiektów dynamicznych [152]. Jego metoda opiera się na procesach „rozszerzania” i „kurczenia” przestrzeni fazowej. Podstawą proponowanych rozwiązań są prawa zachowania energii. Działanie fizyczne w procesie „rozszerzania” opiera się na wykorzystaniu odpowiednich zasobów (zazwyczaj zasobów energetycznych) zapewniających ruch poszczególnych elementów układu. Zaopatrzenie układu w potrzebne zasoby energetyczne umożliwia jego prawidłowe funkcjonowanie i osiąganie zakładanych celów. Wprowadzenie parametru energii jako dodatkowej współrzędnej fazowej do modelu kontrolnego stanowi podstawę procesu „rozszerzania” przestrzeni fazowej.

Wprowadzenie dodatkowych współrzędnych fazowych nadaje układowi nowe właściwości dynamiczne. Pod działaniem wielostronnej synergicznej kontroli rozszerzony układ zmniejsza liczbę dostępnych stopni swobody, tzn. zapewnia asymptotycznie stabilny ruch określonej liczby stanów fazy. „Kurczenie” przestrzeni fazowej to nic innego, jak proces kontroli układu obejmujący jego wewnętrzne nieliniowe właściwości dynamiczne.

W termodynamice pomysłodawcy podejścia synergicznego, G. Haken [149] i I. Prigozhin [153], wyróżniają parametry „uporządkowania” wśród zazwyczaj występujących parametrów układów złożonych. Głównymi parametrami „uporządkowania” układów są energia i entropia, stanowiące podstawę samoorganizacji układu.

Jednakże ze względu na trudności związane ze sformalizowaniem najbardziej znanych metod synergicznych nie można ich wykorzystać jako ogólnosystemowego narzędzia syntezy zarządzania ruchem lotniczym w sytuacjach zwiłokrotnionego konfliktu.

Synergiczne zarządzanie ruchem lotniczym w sytuacjach zwiłokrotnionego konfliktu

Przeprowadźmy teraz formalizację synergicznej kontroli statków powietrznych operujących w warunkach zwiłokrotnionego konfliktu, w celu przekształcenia nieuporządkowanego układu sytuacji konfliktowej w układ o korzystnej dynamice bezkolizyjnych zachowań statków powietrznych. Korzystną dynamikę należy tutaj rozumieć jako właściwość przekształconego procesu, która gwarantuje osiągnięcie zakładanego stanu docelowego przez każdy ze statków powietrznych, przy zachowaniu bezpieczeństwa wszystkich dopuszczalnych ruchów w określonych warunkach.

„Gwarancję osiągnięcia stanu docelowego” możemy w tym wypadku rozumieć jako zapewnienie odpowiedniego, możliwego do osiągnięcia położenia statków powietrznych. Jeśli środowisko nawigacyjne gwarantuje osiągnięcie stanu docelowego, oznacza to, że istnieją w nim narzędzia kontrolne umożliwiające wyznaczenie wektora współrzędnych fazowych dla wszystkich

statków powietrznych znajdujących się w dowolnym miejscu tego środowiska i umieszczenie układu w docelowym położeniu, z uwzględnieniem różnych możliwych perturbacji.

By przedstawić ruch samolotu w postaci sformalizowanej (w układzie dwuwymiarowym) w celu rozwiązania określonych zadań, często wykorzystuje się poniższe równania:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{1i}}{dt} &= f(x_{1i}(t), u_{1i}(t), \xi_{1i}(t)), \\ \frac{dx_{2i}}{dt} &= f(x_{2i}(t), u_{2i}(t), \xi_{2i}(t)), \quad (2.3.1.1) \\ u_{1i \min} &\leq u_{1i} \leq u_{1i \max}, \\ u_{2i \min} &\leq u_{2i} \leq u_{2i \max}. \end{aligned}$$

gdzie x_{1i} , x_{2i} – to współrzędne statku powietrznego i ; u_{1i} , u_{2i} – to współczynniki wymaganej kontroli ruchu, zapewniającej bezpieczeństwo statków powietrznych i osiągnięcie przez nie docelowego położenia; ξ_{1i} , ξ_{2i} – perturbacje zakłócające działanie statku powietrznego i .

Specyfika równań różniczkowych (2.3.1.1), uwzględniających dynamiczne procesy statku powietrznego w obliczu zwielokrotnionego konfliktu, polega na tym, że przedstawiają one właściwości procesów konfliktu, których bezpośrednia obserwacja i wykorzystanie są niemożliwe, w „skondensowanej”, „uproszczonej” formie. Równania te stanowią „zewnętrzną” formalną powłokę układu, pod którą ukrywają się „wewnętrzne” właściwości funkcjonalne procesów konfliktowych. Prowadzi to do utraty funkcjonalnych i strukturalnych właściwości zwielokrotnionego konfliktu, a także znacząco utrudnia analizę i syntezę kontroli ruchu statków powietrznych w tych warunkach.

W niniejszym rozdziale autorzy proponują całkowicie nową systemową koncepcję synergicznej kontroli statków powietrznych w warunkach zwielokrotnionego konfliktu, opartą na właściwościach rzeczywistego pola sił. Zakłada ona, że:

- środowisko żeglugi powietrznej to duży, otwarty system ergatyczny (człowiek–maszyna);
- podstawowymi właściwościami środowiska żeglugi powietrznej są legalność, integralność i synergizm;
- statki powietrzne charakteryzują się właściwościami typowymi dla układów technicznych – obejmującymi rozwój i degradację funkcjonalności w czasie;
- integralność i ciągłość synergicznych dynamicznych procesów kontroli statków powietrznych w sytuacjach konfliktowych uznawane są za niezmiennie elementy systemu.

Większość układów fizycznych w świecie rzeczywistym charakteryzuje się unikalnymi cechami, które decydują o ich efektywności. W procesach kontrolnych w tych układach nie widać wpływu „przekleństwa wymiarowości”. Poza tym jakość funkcjonowania układów może wzrastać, nawet jeśli będziemy rozbudowywać wewnętrzne podsystemy. Dodatkowo ich różnorodność odgrywa rolę stabilizującą. W przypadku wielu z tych właściwości logiczne i rozsądne wydaje się ekstrapolowanie ich na systemy kontroli statków powietrznych w warunkach zwielokrotnionego konfliktu.

Celem syntezy synergicznych metod rozwiązywania zwielokrotnionych konfliktów jest stworzenie wirtualnego świata (\aleph) poprzez modelowanie właściwości podobnych, w pewnym zakresie, do właściwości rzeczywistych układów fizycznych. W tym przypadku właściwości te powinny zapewnić efektywne funkcjonowanie rzeczywistego układu fizycznego.

Jako przykład weźmy rzeczywistą ograniczoną przestrzeń nawigacyjną (określaną jako \mathfrak{R}), w której znajdują się statki powietrzne na kursach kolizyjnych, strefy zamknięte dla ruchu powietrznego, a także statyczne i dynamiczne przeszkody, takie jak góry, fronty burzowe itp.

Tworząc \mathfrak{N} , wykorzystujemy podejście naukowe [145], które zostało w jasny sposób sformułowane przez Helmholtza [147]: „...ostatecznym celem nauk fizycznych jest patrzenie na wszystkie zjawiska fizyczne przez pryzmat sił przyciągania i odpychania, których moc zależy całkowicie od odległości między obiektami. Przyjęcie tego podejścia pozwala zrozumieć całą naturę”.

Siły przyciągania i odpychania wytwarzane przez pola sił stanowią podstawę synergicznych zasad sprawowania kontroli, które możemy ująć ogólnie pod hasłem „połączenie możliwego i pożądanego”.

Wirtualny świat \mathfrak{N} to złożona struktura obejmująca trzy podprzestrzenie:

- wirtualna podprzestrzeń „pożyczanych zachowań” obiektów dynamicznych w świecie \mathfrak{N} ;
- wirtualna podprzestrzeń aktualizowanych zachowań obiektów dynamicznych w \mathfrak{N} ;
- wirtualna całkowita podprzestrzeń \mathfrak{N} .

Chcąc opisać powyższe podprzestrzenie, wykorzystujemy następujące zasady wirtualnego świata \mathfrak{N} :

1. Świat \mathfrak{N} z perspektywy klasycznej mechaniki to kompletny, zamknięty układ obiektów statycznych i dynamicznych, pomiędzy którymi zachodzą interakcje wynikające z działania sił przyciągania i odpychania w każdym dowolnym punkcie czasowym.

2. Świat \mathfrak{N} składa się z wirtualnych warstw, w których każda odpowiada jakiemuś obiektowi statycznemu lub dynamicznemu.

3. Każdy obiekt znajdujący się w świecie \mathfrak{N} to punkt materialny o masie własnej, będący źródłem pełnego zestawu sił (w tym również sił przyciągania i odpychania).

4. Zestaw sił w każdym obiekcie w świecie \mathfrak{N} cechuje symetria. Zgodnie z klasyczną mechaniką symetria oznacza, iż siły przyciągania i odpychania działają równocześnie. Funkcjonalnie ich wielkość zależy od masy obiektów i odległości między nimi.

5. Układ oddziałujących na siebie obiektów w świecie \mathfrak{N} jest heterogeniczny. Obiekty mogą się różnić pod względem charakterystyki dynamicznej i mogą mieć różne priorytety, intencje, źródła oraz pozycje docelowe.

6. W świecie \mathfrak{N} istnieją rozmaite ograniczenia (więzy) statyczne i dynamiczne. Są one przedstawione jako „gęste” skupiska punktów materialnych (o masie własnej m) lub jako grupa ruchomych punktów materialnych (o masie własnej m), których trajektorie ruchu są zgodne z zewnętrznymi granicami stref ograniczeń i tworzone są na podstawie pewnych algorytmów.

7. Końcowe pozycje docelowe wszystkich obiektów dynamicznych w świecie \mathfrak{N} charakteryzują się pełnym zestawem sił (w tym przyciągania i odpychania) i są ruchomymi lub stałymi punktami materialnymi o masie własnej znacznie przewyższającej masę obiektów dynamicznych.

8. Jeśli w przestrzeni nie ma zagrożenia konfliktem, pożądaný ruch każdego obiektu dynamicznego odbywa się wzdłuż linii „geodezyjnych” w pełnym polu sił. Linie geodezyjne to krzywe w przestrzeni wskazujące najkrótszą drogę pomiędzy ich punktami końcowymi. Charakterystyka pola sił zależy od jego potencjału mocy i energii;

9. Dla każdego obiektu dynamicznego w świecie \mathfrak{N} jego linię geodezyjną wyznacza się na podstawie punktu końcowego.

Synteza strukturalna i parametryczna świata wirtualnego obejmuje następujące kroki:

1. Formalizacja właściwości świata \mathfrak{N} wymagająca określenia jego granic jako układu nierówności liniowych z wykorzystaniem operatora transformacji $\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^1$

$$\mathfrak{R}(x_1, x_2) < 0 \xRightarrow{\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^1} \mathfrak{N}(z_1, z_2) < 0,$$

gdzie x_1, x_2 – to współrzędne granic przestrzeni \mathfrak{R} ; z_1, z_2 – to współrzędne granic świata \mathfrak{N} .

2. Przeniesienie położenia stref zamkniętych i więzów z przestrzeni \mathfrak{R} do świata \mathfrak{N} , z wykorzystaniem operatora transformacji

$$\mathfrak{R}_k(x_{1k}, x_{2k}) < 0 \xRightarrow{\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^2} \mathfrak{N}_k(z_{1k}, z_{2k}) < 0,$$

$$k \in \{1, 2, \dots, N_c\}; N_c \in \{N_r \cap N_f \cap N_d\}; \mathfrak{R}_k \in \mathfrak{R}; \mathfrak{N}_k \in \mathfrak{N},$$

gdzie x_{1k}, x_{2k} – to współrzędne stref zamkniętych i ograniczeń w przestrzeni \mathfrak{R} ; z_{1k}, z_{2k} – to współrzędne stref zamkniętych i ograniczeń w świecie \mathfrak{N} ; N_c – to liczba wszystkich zamkniętych stref i ograniczeń w przestrzeni nawigacyjnej; N_r – to liczba nieruchomych stref zamkniętych i ograniczeń; N_f – to liczba elastycznych stref zamkniętych i ograniczeń; N_d – to liczba dynamicznych stref zamkniętych i ograniczeń.

3. Przeniesienie pozycji statków powietrznych z przestrzeni \mathfrak{R} do świata \mathfrak{N} , z wykorzystaniem operatora transformacji $\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^3$

$$\mathfrak{R}_i(x_{1i}, x_{2i}) \xRightarrow{\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^3} \mathfrak{N}_i(z_{1i}, z_{2i}), \quad i \in I\{1, 2, \dots, N_{AC}\}; \mathfrak{R}_i \notin \mathfrak{R}_k; \mathfrak{N}_i \notin \mathfrak{N}_k,$$

gdzie N_{AC} to łączna liczba statków powietrznych w ograniczonej przestrzeni nawigacyjnej.

4. Przeniesienie docelowych pozycji statków powietrznych z przestrzeni \mathfrak{R} do świata \mathfrak{N} , z wykorzystaniem operatora transformacji $\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^4$

$$\mathfrak{R}_i(x_{1i}^*, x_{2i}^*) \xRightarrow{\mathfrak{T}_{\mathfrak{RN}}^4} \mathfrak{N}_i(z_{1i}^*, z_{2i}^*), \quad i \in I\{1, 2, \dots, N_g\}; N_g \geq N_{AC},$$

gdzie N_g to łączna liczba pozycji docelowych statków powietrznych w ograniczonej przestrzeni nawigacyjnej.

5. Wyznaczenie bieżącej pozycji każdego statku powietrznego $\mathfrak{N}_i(z_{1i}, z_{2i})$ z uwzględnieniem masy i potencjału przyciągania i odpychania:

$$\forall \mathfrak{N}_i(z_{1i}(t), z_{2i}(t)) \in \mathfrak{N} \Rightarrow U_i^+(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), m_i, G)_+ + U_i^-(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), r_{cr_i}, m_i, G);$$

$$i \in I\{1, 2, \dots, N_{Di}\}.$$

gdzie U_i^+ i U_i^- to odpowiednio potencjał przyciągania i odpychania „towarzyszący” i statkom powietrznym w świecie \mathfrak{N} ; $r_i(t)$ to odległość od statku powietrznego i ; r_{cr_i} to odległość krytyczna od statku powietrznego i ; m_i to masa punktu i ; G to stała wartość pola obwodu wirtualnego, które generuje ogólną moc w świecie \mathfrak{N} ; a N_{Di} to liczba obiektów dynamicznych.

Krytyczne odległości pomiędzy punktami w świecie \mathfrak{N} określone są na podstawie wymagań regulacyjnych dotyczących stref bezpieczeństwa. Określenie wielkości stref bezpieczeństwa statków powietrznych w przestrzeni \mathfrak{R} wiąże się ze spełnieniem poniższego warunku:

$$r_{cr,i} \geq \max(\Delta x_{1i}, \Delta x_{2i}),$$

gdzie $\Delta x_{1i}, \Delta x_{2i}$ to wymiary geometryczne statku powietrznego i .

6. Wyznaczenie potencjału sił przyciągania i odpychania dla pozycji docelowej $\mathfrak{N}_i(z_{1i}^*, z_{2i}^*)$ statku powietrznego i

$$\forall \mathfrak{N}_i(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t)) \in \mathfrak{N} \Rightarrow U_i^+(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G) + U_i^-(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G);$$

$$i \in I\{1, 2, \dots, N_g\},$$

gdzie z_{1i}^*, z_{2i}^* to współrzędne pozycji końcowej statku powietrznego i ; $r_i^*(t)$ to odległość od pozycji docelowej statku powietrznego i , a m_i^* to masa pozycji docelowej statku powietrznego i .

7. Prezentacja zamkniętych stref i ograniczeń istniejących w rzeczywistej przestrzeni nawigacyjnej w formie elementów geometrycznych (okręgów, elips, linii itp.) w przestrzeni \mathfrak{N} . Granice stref zamkniętych przedstawia się jako skończone zbiory punktów, z których każdy definiowany jest za pomocą potencjału przyciągania i odpychania:

$$\forall \mathfrak{N}_k(z_{1k}(t), z_{2k}(t)) \in \mathfrak{N} \Rightarrow U_k^+(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), m_k, G) + U_k^-(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_{cr,k}(t), m_k, G);$$

$$k \in \{1, 2, \dots, N_{\bar{n}}\},$$

gdzie $N_{\bar{n}}$ to liczba punktów tworzących wszystkie strefy zamknięte w przestrzeni \mathfrak{N} .

8. Każdy punkt w przestrzeni \mathfrak{N} charakteryzowany jest przez całkowity potencjał sztucznego pola sił:

$$U_{\Sigma}(z_1, z_2) = \sum_{i=1}^{N_{Ac}} (U_i^+(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), m_i, G) +$$

$$+ U_i^-(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), r_{cr,i}, m_i, G)) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_g} (U_i^+(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G) +$$

$$+ U_i^-(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G)) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N_c} (U_k^+(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), m_k, G) +$$

$$+ U_k^-(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_{cr,k}(t), m_k, G)).$$

Każdy obiekt umieszczony w przestrzeni \mathfrak{N} generuje reakcję sztucznego pola sił i jest charakteryzowany przez swój potencjał przyciągania i odpychania:

$$U_i^+ = \frac{Gm_i}{r_{ij}}, \quad U_i^- = -\frac{Gm_i}{r_{ij}}.$$

Otrzymany wektor siły w każdym punkcie przestrzeni \mathbb{N} obejmuje siły przyciągania i odpychania:

$$F_{ij}^+ = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^\alpha} = U_i^+ \frac{m_j}{r_{ij}^{(\alpha-1)}}; \quad (2.3.1.2)$$

$$F_{ij}^- = \frac{Gm_i m_j r_{cr}}{r_{ij}^\beta} = U_i^- \frac{m_j r_{cr}}{r_{ij}^{(\beta-1)}}; \quad 1 < \alpha < \beta, (2.3.1.3)$$

gdzie α, β to liczby naturalne.

Odpowiednie projekcje sił przyciągania i odpychania na osiach z_1 i z_2 wyglądają w następujący sposób:

$$\begin{aligned} F_{ijz_1}^+ &= F_{ij}^+ \frac{|z_{1i} - z_{1j}|}{r_{ij}}; & F_{ijz_2}^+ &= F_{ij}^+ \frac{|z_{2i} - z_{2j}|}{r_{ij}}; \\ F_{ijz_1}^- &= F_{ij}^- \frac{|z_{1i} - z_{1j}|}{r_{ij}}; & F_{ijz_2}^- &= F_{ij}^- \frac{|z_{2i} - z_{2j}|}{r_{ij}}; \\ r_{ij} &= \sqrt{(z_{1i} - z_{1j})^2 + (z_{2i} - z_{2j})^2}. \end{aligned}$$

W równaniach (2.3.1.2) i (2.3.1.3) stan środowiska świata wirtualnego (substancji synergicznej) definiowany jest stosunkiem α/β . Taki stan środowiska charakteryzuje stopień samoorganizacji działań statków powietrznych występujący w sytuacji zwielokrotnionego konfliktu. Stanem analogicznym do stanu środowiska wirtualnego jest stan skupienia substancji fizycznych – np. gazowy, ciekły, krystaliczny itd.

Zgodnie z drugą zasadą Newtona ruch posiadających masę punktów materialnych w powyższym sztucznym polu sił można opisać równaniami:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_{1i}}{dt^2} &= \frac{1}{m_i} \left(\sum_{j=1}^{N_{AN}+N_{ib}+N_g} F_{ij}^{z_1^+} + \sum_{j=1}^{N_{AN}+N_{ib}+N_g} F_{ij}^{z_1^-} + \mu_1 \frac{dz_{1i}}{dt} \right); \\ \frac{d^2 z_{2i}}{dt^2} &= \frac{1}{m_i} \left(\sum_{j=2}^{N_{AN}+N_{ib}+N_g} F_{ij}^{z_2^+} + \sum_{j=2}^{N_{AN}+N_{ib}+N_g} F_{ij}^{z_2^-} + \mu_2 \frac{dz_{2i}}{dt} \right) \\ &\quad \forall j \neq i, \end{aligned} \quad (2.3.1.4)$$

gdzie N_{ob} to liczba przeszkód statycznych i dynamicznych, a; $\mu_1 \frac{dz_{1i}}{dt}$ and $\mu_2 \frac{dz_{2i}}{dt}$ to składniki tłumiące.

W rezultacie całkowania równań (2.3.1.4) możemy zidentyfikować kierunek wektorów prędkości wszystkich punktów materialnych, który determinuje sposób kontroli statków powietrznych pozwalający na uniknięcie kolizji w sytuacji ryzyka zwielokrotnionego konfliktu:

$$u_{is} = \psi_i(k) = \arctg \left(\frac{z_{2m_i}(k) - z_{2m_i}(k-1)}{z_{1m_i}(k) - z_{1m_i}(k-1)} \right) \quad (2.3.1.5)$$

gdzie k to etap całkowania układu równań (2.3.1.4).

Podczas formułowania synergicznych metod kontroli statków powietrznych umożliwiających unikanie kolizji należy uwzględnić wykryte ograniczenia:

$$\frac{d\psi_i}{dt} = \frac{g}{V_i} t g \gamma_{i\text{lim}}$$

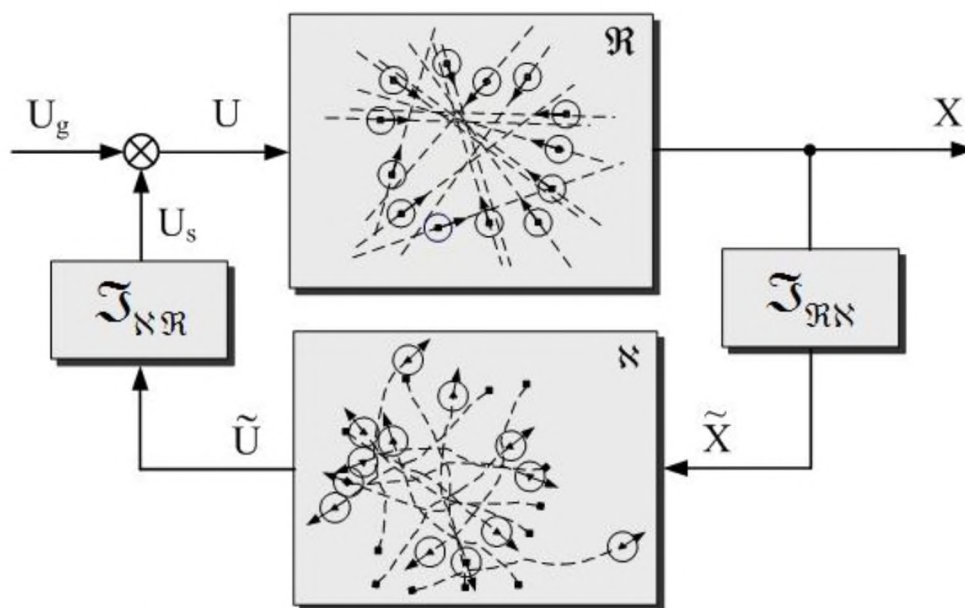
gdzie g jest stała; $\gamma_{i\text{lim}}$ to ograniczenie bieżącej wartości kąta obrotu statku powietrznego i , w zależności od trybu lotu i warunków.

Zazwyczaj kontrolę statków powietrznych za pomocą regulatorów synergicznych opisujemy następującym wzorem:

$$u = u_g + u_s,$$

gdzie u_g to składnik celu wektora kontroli statku powietrznego, a u_s to składnik synergiczny wektora kontroli statku powietrznego służący zapobieganiu kolizji.

Schemat blokowy kontroli statków powietrznych z wykorzystaniem regulatora synergicznego, na podstawie opisanych powyżej zasad, znajduje się na poniższej ilustracji 2.48.



Ilustracja 2.48. Schemat blokowy synergicznej kontroli statków powietrznych [156]

Główną cechą i zaletą stworzonego świata wirtualnego \mathcal{N} jest, że kiedy punkty materialne są bliskie osiągnięcia odległości krytycznych r_{cr} , ogólna wartość działających na nie sił jest równa zero. Innymi słowy, siły przyciągania i odpychania równoważą się wzajemnie [145]. Przy odległości r_{cr} energia punktów materialnych osiąga swoje minimum, co oznacza najmniejszą interakcję i oddziaływanie na siebie ciał fizycznych. Równocześnie odległość r_{cr} umożliwia wyznaczenie stref bezpieczeństwa statków powietrznych. Niedopuszczenie do przecięcia się tych stref, w warunkach nieprzewidywalności pozycji statków powietrznych umożliwia utrzymanie

gwarantowanego poziomu bezpieczeństwa ruchu elementów w sytuacjach zwielokrotnionego konfliktu.

Opisane wyżej zasady sprawiają, że przestrzeń \mathcal{N} może służyć jako powszechnie wykorzystywany model przestrzeni nawigacyjnej, wolny od heurystyki i ograniczeń funkcjonalnych. Model może być skuteczny dla różnej liczby obiektów w przestrzeni \mathcal{N} (z uwzględnieniem jej ograniczeń) i umożliwia on:

- dowolne określanie właściwości sztucznego pola sił w przestrzeni \mathcal{N} i wykorzystanie go jako ogólnego modelu topologicznego przestrzeni nawigacyjnej;
- równoczesne syntezywanie synergicznych metod kontroli umożliwiającej zapobieganie kolizjom wszystkich statków powietrznych uczestniczących w sytuacji konfliktowej;
- zmniejszenie stopnia skomplikowania modelu przestrzeni nawigacyjnej i uniknięcie zjawiska „przekleństwa wymiarowości”.

Podczas wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii obliczany jest tylko planowany kąt toru lotu, a wartość wektora prędkości statku powietrznego pozostaje niezmienną. Dlatego długość wyznaczonej trajektorii od punktu początkowego rozwiązywania zwielokrotnionego konfliktu do punktu docelowego statku powietrznego (kryterium (2.3.1.6)) to jedyny wskaźnik zużycia paliwa w płaszczyźnie poziomej.

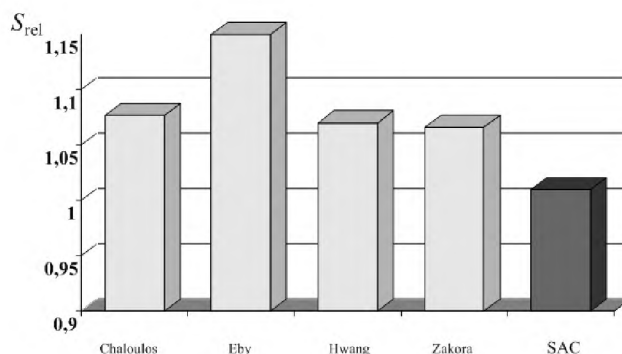
Ocena efektywności wykorzystania synergicznych metod kontroli statków powietrznych opiera się na kryterium minimalnego względnego toru lotu statku powietrznego S_{rel} , liczonego od punktu początkowego do punktu końcowego, z uwzględnieniem omijania przeszkód znajdujących się w wyznaczonej przestrzeni.

$$S_{rel} = \frac{S_{sim}}{S_{sh}}, \quad (2.3.1.6)b$$

gdzie S_{sim} to rzeczywisty (obliczony podczas symulacji) tor lotu statku powietrznego od punktu początkowego do punktu końcowego (docelowego), a S_{sh} to najkrótsza odległość od punktu początkowego do punktu docelowego.

W literaturze dostępne są dane graficzne pokazujące jedynie trajektorie wyznaczone za pomocą metod rozwiązywania podwójnych konfliktów [143, 146, 150, 155], dlatego porównaliśmy efektywność synergicznej kontroli statków powietrznych właśnie z efektywnością metod rozwiązywania podwójnych konfliktów, wykorzystując jako podstawę kryterium (2.3.1.6).

Wyniki symulacji wskazują, że wykorzystanie synergicznych metod kontroli statków powietrznych do rozwiązywania sytuacji konfliktowych może obniżyć wartość kryterium (2.3.1.6) nawet o 5% w porównaniu z innymi istniejącymi metodami rozwiązywania podwójnych konfliktów (ilustracja 2.49).



Ilustracja 2.49. Wartość kryterium (3.1) dla metod rozwiązywania podwójnych konfliktów prezentowanych w literaturze (Chaloulos i in. 2009; Eby 1994; Hwang i in. 2002; Zakora 2006) i dla synergicznej kontroli statków powietrznych (SAC) [156]

Koncepcja synergicznej kontroli statków lotniczych pozwala również na wyznaczanie skutecznych bezkolizyjnych trajektorii na podstawie innych kryteriów, takich jak trajektorie najprostsze dla pilotów, trajektorie uwzględniające potrzeby pasażerów i ładunków itd. Brakuje jednak danych na temat wartości tych kryteriów dla innych metod rozwiązywania sytuacji konfliktowych, dlatego porównanie ich nie było możliwe.

Proponowana koncepcja ułatwia rozwiązanie problemu ciągłego podnoszenia poziomu bezpieczeństwa lotów w obszarach pozostających pod nadzorem centrów kontroli ruchu lotniczego wykorzystujących rozwiązania CNS/ATM, ponieważ umożliwia prognozowanie konfliktów strategicznych i operacyjnych oraz wyznaczanie bezkolizyjnych trajektorii lotu statków powietrznych w strefach swobodnego ruchu. Może być również podstawą stworzenia inteligentnych naziemnych systemów zarządzania ruchem lotniczym oraz urządzeń pokładowych wspierających kontrolę w trudnych warunkach, przy wysokim natężeniu ruchu i w sytuacjach ryzyka zwielokrotnionego konfliktu.

Badacze przewidują, że proponowana koncepcja umożliwi:

- rozwiązanie problemu „przekleństwa wymiarowości” w rozwiązywaniu złożonych konfliktów i potencjalnych kolizji statków powietrznych;
- rozwiązywanie równoczesnych wielokrotnych konfliktów bez konieczności podziału na „pary na kursie kolizyjnym”, co pozwala uniknąć „efektu domina”;
- wyznaczanie efektywnych bezkolizyjnych trajektorii lotu statków powietrznych w przestrzeni 4D w czasie rzeczywistym;
- ograniczenie zużycia energii potrzebnej na wdrożenie bezkolizyjnych trajektorii ruchu statków powietrznych;
- uniezależnienie wyznaczania bezkonfliktowych trajektorii statków powietrznych od regulacji prędkości lotu i kąтового położenia wektora prędkości;
- wybór priorytetowych statków powietrznych na podstawie ich funkcji, zadań i statusu;
- wyznaczanie celowych, bezkolizyjnych tras ruchu różnego typu obiektów dynamicznych, takich jak załogowe i bezzałogowe systemy latające, pojazdy naziemne, ruchome roboty czy autonomiczne pojazdy naziemne i podwodne.

Spodziewane efekty wykorzystania proponowanej koncepcji obejmują:

- zwiększenie skuteczności procesu decyzyjnego w złożonych rozproszonych systemach zarządzania ruchem lotniczym;
- poprawę bezpieczeństwa lotów;
- wzrost efektywności ekonomicznej służb ruchu lotniczego, a także efektywności stref swobodnych lotów;
- optymalizację wykorzystania przestrzeni powietrznej;
- poprawę bezpieczeństwa w sytuacjach zwiększonego natężenia ruchu w przestrzeni powietrznej [156].

2.3.2. Zasady doskonalenia zarządzania przepływem ruchu lotniczego i przepustowością w rejonach kontrolowanych lotniska w warunkach niepewności

Najbardziej palącym problemem, przed jakim stanęły europejskie służby zarządzania ruchem lotniczym (ATM), było zapewnienie wystarczającej przepustowości, by spełnić wymagania rosnącego ruchu lotniczego, przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa i ograniczeniu kosztów. Przepustowość europejskiej przestrzeni powietrznej stała się niewystarczająca, co

spowodowało wzrost liczby opóźnień. Sytuacja ta uwypukliła potrzebę poprawy planowania przepustowości na poziomie europejskiej sieci ATM. Jednym z najważniejszych aspektów działań w tym zakresie jest doskonalenie zarządzania przepustowością w rejonach kontrolowanych lotnisk w warunkach niepewności.

Kwestia przepustowości prawdopodobnie pozostanie poważnym problemem europejskiej sieci ATM również w nadchodzącym okresie, w związku z przewidywanym wzrostem ruchu lotniczego. Organizacja EUROCONTROL zainicjowała kolejne działania w celu poprawy planowania przepustowości przez europejskie służby ATM, uruchamiając Dynamic Management of European Airspace Network Framework Programme (program ramowy dynamicznego zarządzania europejską siecią powietrzną, DMEAN).

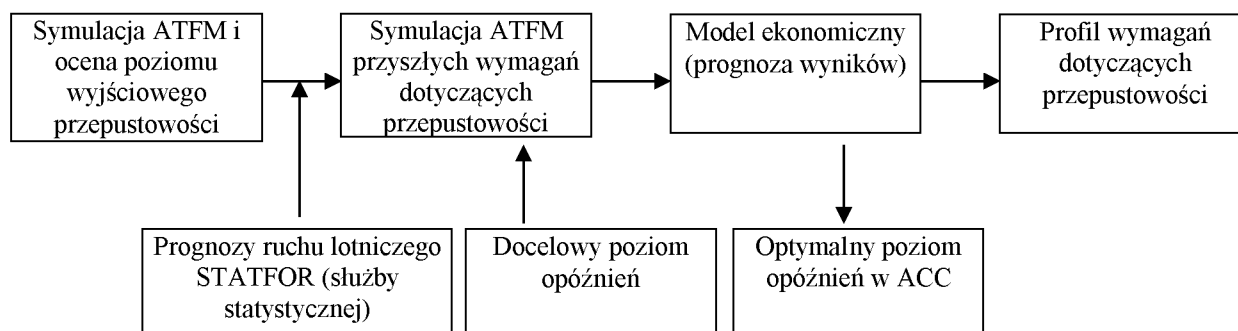
Program ramowy DMEAN koordynuje i stopniowo wprowadza kolejne usprawnienia operacyjne w europejskich strukturach oraz procesach ATM w obszarach [158]:

- udoskonalonego planowania i równoważenia przepustowości/zapotrzebowania;
- zarządzania przepływem i przepustowością na poziomie całej sieci, lokalnym i regionalnym.

Przyszły profil ATM według EUROCONTROL

Przyszły profil ATM (Future ATM Profile, FAP) to grupa narzędzi służących do modelowania i analizy, obejmująca urządzenia symulacyjne ATFM (Air Traffic Flow Management, zarządzania przepływem ruchu lotniczego), a także arkusze analityczne oraz narzędzia raportowania pozwalające ocenić i obliczyć obecne możliwości oraz przepustowość poszczególnych rejonów przestrzeni powietrznej w ramach bieżącego systemu ATM, a także oszacować bieżące i przyszłe wymagania dotyczące przepustowości na poziomie centrum kontroli obszaru (Area Control Centre, ACC) i grupy sektorowej (ilustracja 2.50).

Krok 1: Opracowanie dokładnych prognoz wymagań dotyczących przepustowości w europejskim systemie ATM wymaga przede wszystkim wiedzy na temat bieżącej przepustowości tego systemu. FAP określa wyjściowy poziom przepustowości dla każdego ACC i poszczególnych grup sektorowych.



Ilustracja 2.50. Procesy przyszłego profilu ATM [164]

Krok 2: Kolejnym zadaniem jest opracowanie prognoz przyszłego zapotrzebowania dla każdego ACC (i poszczególnych grup sektorowych) na następne 5 lat, na podstawie prognozowanego wzrostu ruchu lotniczego i jego rozkładu w przyszłej sieci połączeń.

Krok 3: FAP przeprowadza analizę ekonomiczną, równoważąc koszty zapewnienia przepustowości z kosztami opóźnień, przy założeniu, że każde ACC działa na poziomie optimum ekonomicznego lub zbliżonym do niego, utrzymując docelowy poziom opóźnień.

Krok 4: Dla każdego ACC i poszczególnych grup sektorowych FAP tworzy 5-letni profil wymagań dotyczących przepustowości. Zawiera on przyrost procentowy szacowany względem

wyjściowego poziomu przepustowości.

Tę samą metodę można wykorzystać do oszacowania bieżącej/wymaganej przepustowości, przyszłego zapotrzebowania oraz innych parametrów ruchu lotniczego w wybranych rejonach kontrolowanych lotnisk w warunkach niepewności.

Ocena bieżącej przepustowości w warunkach niepewności

Istnieje kilka metod oceny bieżącej przepustowości ACC oraz grupy sektorowej, którą nazwaliśmy wyjściowym poziomem przepustowości. Metody te są efektem wieloletnich modyfikacji i udoskonalień, a adekwatność i efektywność każdej z nich zależy od liczby opóźnień ATFM generowanych przez oceniane ACC.

Najdokładniejszą metodą w przypadku ACC o dużej liczbie opóźnień jest odwrócona CASA. Z kolei dla ACC generujących nieliczne opóźnienia najlepszym rozwiązaniem przez długi okres była metoda NEVAC (Network Estimation & Visualisation of ACC Capacity tool), aż do czasu opracowania metodologii ACCESS w 2004 r. Metodologia ta wprowadza jednolity sposób określania wyjściowego poziomu przepustowości dla wszystkich centrów kontroli obszaru i zapewnia ciągłość oceny ACC, które przechodzą z jednej kategorii do innej.

Elementy niezbędne do zapewnienia efektywnego zarządzania przepływem ruchu lotniczego i przepustowością w rejonach kontrolowanych lotniska w warunkach niepewności to:

- wizualizacja danych dotyczących TMA (zapotrzebowania, przepustowości w poszczególnych sektorach, konfiguracji, opóźnień, tras itd.);
- optymalizacja systemów otwarcia konfiguracji;
- oszacowanie przyszłego poziomu ruchu lotniczego;
- ocena oddziaływania sieci ochrony i ścigania;
- stworzenie wirtualnych TMA i analiza możliwości reorganizacji przestrzeni powietrznej pomiędzy sąsiadującymi TMA;
- obliczenie wyjściowego poziomu przepustowości TMA w danym okresie;
- szczegółowa analiza struktury zapotrzebowania, interakcji w sieci, adekwatności konfiguracji, nasycenia i opóźnień ATFM, które mają wpływ na przepustowość w TMA;
- analiza zapotrzebowania TMA w zakresie struktury, rozkładu obciążenia i przepływów składowych.

Porównanie wszystkich metodologii oceny bieżącej przepustowości znajduje się w tabeli 2.6 [158].

Jak zwiększyć przepustowość TMA

Zwiększenie przepustowości TMA można osiągnąć, podejmując trzy działania [158]:

Zadanie 1. Optymalizacja wykorzystania sieci. Optymalizacja dostępnej przepustowości poprzez zarządzanie przepływem ruchu lotniczego, której celem jest lepsze dopasowanie sektoryzacji przestrzeni do przepływu ruchu lotniczego w każdym dowolnym momencie, tak by zapewnić wymaganą przepustowość zawsze i wszędzie tam, gdzie jest ona potrzebna.

Tabela 2.6. Metody oceny bieżącej przepustowości [164]

Metoda	Zalety	Wady
--------	--------	------

Odwrócone CASA (komputerowe wyznaczanie slotów)	Bardzo dokładny pomiar przepustowości ATM w badanym okresie. Uwzględnia wpływ sieci. Brak danych wejściowych od ANSP (służb żeglugi powietrznej)	Przydatne tylko w przypadku ACC generujących opóźnienia. Wielokrotne symulacje wymagają czasu
NEVAC (narzędzie oceny sieci i wizualizacji przepustowości ACC)	Może być wykorzystywana we wszystkich ACC. Mierzy potencjalną przepustowość, jaka może być dostępna w danym okresie. Szybka i prosta	Nie uwzględnia wpływu sieci. Rezultaty zależą od dokładności danych CFMU (Central Flow Management Unit). Nie mierzy rzeczywistej dostępnej przepustowości, tylko potencjalną dostępną przepustowość
Metodologia ACCESS	Wspólna metoda dla wszystkich ACC. Ciągłość oceny ACC, które zmieniają kategorię. Mierzy przepustowość dostępną w danym okresie. Uwzględnia wpływ sieci	Wymaga proaktywnego wkładu ze strony ANSP, by zapewnić dokładność danych. Wielokrotne symulacje

Przepływ ruchu lotniczego może się zmieniać bardzo szybko, zatem elastyczny, dynamiczny system i proaktywny menedżer przepływu są niezbędne dla:

- poprawy prognozowania przepływu;
- wsparcia systemu w dynamicznej sektoryzacji;
- elastycznego zarządzania konfiguracją;
- bardziej elastycznego wykorzystania przestrzeni powietrznej (FUA);
- weryfikacji działań kontrolerów;
- lepszego wsparcia kontrolerów i współpracy z nimi.

Zadanie 2. Zwiększenie przepustowości sektorów. Poprawa produktywności sektorów poprzez zwiększenie monitorowanych wartości bez wprowadzania dodatkowych zmian. Umożliwienie przelotu większej liczby statków powietrznych przez ten sam rejon przestrzeni przed wprowadzeniem regulacji ATFM:

- poprawa koordynacji działań jednostek cywilnych i wojskowych oraz pełne wdrożenie FUA;
- zwiększenie zaufania kontrolerów wobec ATFM (poprzez poprawę jego niezawodności), umożliwiające eliminację lub zmniejszenie deklarowanego „bufora” przepustowości w sektorze;
- zmniejszenie obciążenia kontrolerów poprzez uproszczenie struktury przestrzeni powietrznej (dualizacja tras, przesunięcie punktów konfliktu, bardziej zrównoważone obciążenie pracą), wprowadzenie dobrych praktyk (mniejsza potrzeba koordynacji, wzrost efektywności) oraz zwiększone wsparcie systemowe (prognozowanie wektorów, łącze danych powietrze–ziemia, naziemne sieci bezpieczeństwa);
- wprowadzenie strukturyzowanych planów awaryjnych i programu szkoleń dla kontrolerów (umożliwiający utrzymanie wyższej przepustowości w sektorze w sytuacjach awaryjnych).

Restrukturyzacja zatłoczonych sektorów i zwiększenie ich przepustowości poprzez reorganizację istniejących sektorów w celu optymalizacji struktury przestrzeni powietrznej, czyli utrzymanie tej samej liczby sektorów przy znaczącym zwiększeniu ich możliwości, wymaga:

- rozwoju struktury przestrzeni powietrznej (planowanie, projektowanie, modelowanie komputerowe, symulacje szybkie i/lub w czasie rzeczywistym);
- wykwalifikowanego personelu odpowiedzialnego za planowanie i operacje;
- udziału jak największej liczby aktywnych kontrolerów w symulacjach.

Zadanie 3. Zwiększenie liczby otwartych sektorów. Wydłużenie czasu otwarcia sektorów (w przypadku opóźnień poza okresami szczytowymi) z udziałem kontrolerów.

Stworzenie dodatkowych sektorów (w przypadku opóźnień w okresach największego natężenia ruchu). Jeśli w okresach największego natężenia ruchu występują opóźnienia spowodowane nadmiernym zatłoczeniem w sektorze, należy rozważyć możliwość stworzenia dodatkowych sektorów, wymagających:

- personelu odpowiedzialnego za planowanie i operacje;
- rozwoju struktury przestrzeni powietrznej (modelowanie komputerowe, symulacje);
- kontrolerów;
- infrastruktury (pomieszczenia i wyposażenie);
- systemów i wsparcia (oprogramowanie);
- dostępnych częstotliwości wraz z wymaganym zasięgiem i ochroną.

Narzędzia analizy przepustowości/obciążenia

Do analizy przestrzeni powietrznej i systemów lotniskowych EUROCONTROL wykorzystuje specjalne oprogramowanie obejmujące wstępne i końcowe przetwarzanie danych, uzupełnione o rozwiązania umożliwiające gromadzenie danych statystycznych na temat zachowań poszczególnych statków powietrznych w różnych fazach lotu, zarówno w powietrzu, jak i na ziemi. Dane te pozwalają określić czas przelotu i długość opóźnienia, a także oszacować wskaźniki obciążenia sektora. Stanowią one również podstawę graficznych elementów symulacji.

Analiza TMA obejmuje poniższe wskaźniki:

- wskaźniki obciążenia TMA;
- wskaźniki zajęcia TMA (całkowity przepływ statków powietrznych przez TMA, liczba statków powietrznych w TMA w okresie największego natężenia i średni czas przelotu statku powietrznego przez TMA);
- czas oczekiwania na lądowanie (całkowita liczba statków powietrznych przetrzymywanych w strefach oczekiwania na lądowanie, a także średni i maksymalny czas oczekiwania na lądowanie);
- czas przelotu i opóźnień statków powietrznych (średni czas lotu i kołowania podczas lądowania, średni czas kołowania i lotu podczas startu, średni czas opóźnienia w locie i na ziemi podczas lądowania oraz średni czas opóźnienia na ziemi i w locie podczas startu);
- czas oczekiwania w kolejce podczas startu.

By zweryfikować deklaracje użytkowników ATFM dotyczące ich celów, wykorzystuje się specjalne wskaźniki efektywności, pozwalające zmierzyć efektywność regulacji naziemnych dotyczących [163]:

- zapobiegania godzinnym przekroczeniom;
- zapobiegania akumulacji ruchu lotniczego.

Wskaźniki te zostały stworzone, by oceniać poszczególne regulacje naziemne i ich przydatność w utrzymywaniu napływającego ruchu poniżej wyznaczonego progu (wyrażonego proporcjonalnie do wymaganego tempa przepływu) w danym okresie (wyrażanym w relacji do

okresu działania regulacji).

By określić obciążenie/przepustowość i przepływ ruchu lotniczego w TMA, model Eulera musi uwzględniać wpływ działań kontroli ruchu lotniczego [162]. Model ten w naszym przypadku skupia się na tempie przepływu i liczbie statków powietrznych w rejonie kontroli.

Rejon kontroli to jednostka jednowymiarowa o określonej długości, przez którą przemieszczają się statki powietrzne. Działania kontroli ruchu lotniczego modulują tempo wypływu statków powietrznych z rejonu kontroli, zmieniając ich prędkość lub wydłużając trasę przemieszczania w tym rejonie.

Niech p_j oznacza liczbę statków powietrznych w rejonie kontroli j w momencie i . W takim przypadku zmianę liczby statków powietrznych w danym rejonie kontroli możemy opisać poniższym dyskretnym równaniem różnicowym [163]:

$$p_j(i+1) = p_j(i) + \tau_j[q_{j-1}(i) - q_j(i)].$$

Liczba statków powietrznych wlatujących do rejonu kontroli j z rejonu kontroli $j-1$ w jednostce czasu wynosi $q_{j-1}(i)$, a liczba statków powietrznych wylatujących z rejonu kontroli wynosi $q_j(i)$. Krok czasowy τ_j obliczany jest na podstawie średniej prędkości v_j statków powietrznych w rejonie kontroli i wielkości rejonu kontroli Ω_j , jako $\tau_j = \Omega_j/v_j$. Zatem, τ_j to czas przelotu statku powietrznego przez rejon kontroli.

W normalnych warunkach tempo wypływu ruchu lotniczego z rejonu kontroli j będzie proporcjonalne do nasycenia przestrzennego ruchu lotniczego i jego średniej prędkości:

$$q_j = \frac{v_j p_j}{\Omega}.$$

By kontrolować przepływ przez rejon kontroli, kontroler ruchu lotniczego może zmieniać prędkość lub trasy przelotów statków powietrznych w tym rejonie.

Ponieważ model Eulera nie opisuje zachowań poszczególnych statków powietrznych, ich skutki można połączyć, wprowadzając współczynnik tempa przepływu kontrolowanego ruchu lotniczego q^{ATC}_j , by zmodyfikować współczynnik tempa wypływu z rejonu kontroli do postaci [163]:

$$q_j = \frac{v_j p_j}{\Omega} - q_j^{\text{ATC}}.$$

By spełnić zasadę zachowania, możemy zrównoważyć ten ujemny współczynnik wypływu ruchu lotniczego dodatnim współczynnikiem przepływu ruchu lotniczego wpływającego do rejonu kontroli. Fizyczne uwarunkowania podpowiadają ograniczenie przepływu ruchu lotniczego w formie $0 \leq \tau_j q^{\text{ATC}}_j \leq x_j$, oznaczające, że wypływ z rejonu kontroli w danym kroku czasowym nie może przekraczać liczby statków powietrznych znajdujących się w tym rejonie.

Na podstawie powyższego omówienia możemy przedstawić nasze dyskretne równanie różnicowe dla rejonu kontroli j jako [162]:

$$p_j(i+1) = \left(1 - \frac{a_j v_j \tau_j}{\Omega_j}\right) p_j(i) + \tau_j q_j^{\text{ATC}}(i) + \tau_j q_{j-1}(i),$$

$$\tau_j = \frac{\Omega_j}{v_j},$$

$$q_j = \frac{v_j p_j}{\Omega} - q_j^{\text{ATC}}.$$

W sytuacjach, w których statki powietrzne zwalniają swój lot podczas podejścia do lądowania lub przyspieszają do prędkości przelotowej podczas wznoszenia po starcie, rejon kontroli można

podzielić na kilka segmentów, w których prędkość jest stała, co ułatwia oszacowanie tempa zwalniania lub przyspieszania ruchu lotniczego w tym rejonie.

Model Eulera można przedstawić również w lepiej znanej formie, jeśli zdefiniujemy liczbę statków powietrznych w rejonie kontroli p_j jako jego zmienną stanu x_j , wpływ q_j jako element wyjściowy y_j , a współczynnik kontrolowanego przepływu q^{ATC}_j jako zmienną kontrolną u_j . W ten sposób model Eulera zyskuje postać liniowego dynamicznego układu dyskretnego, który można przedstawić jako [162]:

$$x_j(i+1) = a_j x_j(i) + \tau_j u_j(i) + \tau_j y_{j-1}(i),$$

$$y_j(i) = b_j x_j(i) - u_j(i).$$

Model Eulera ma teraz formę, w której może stać się przedmiotem analizy z wykorzystaniem technik znanych z nowoczesnych teorii kontroli.

Specyfikacja zadań kontrolerów ruchu lotniczego

Model przestrzeni powietrznej umożliwia analizę postępów każdego lotu odbywającego się w symulowanym obszarze i określenie działań ATC (kontroli ruchu lotniczego/kontroli lotów) koniecznych dla właściwej obsługi tego lotu. Działania te obejmują ok. 110 różnych zadań wykonywanych przez kontrolerów ruchu lotniczego. Zadania ATC zostały podzielone na 5 głównych kategorii [157, 160]:

1. Zarządzanie danymi lotu (obejmuje takie zadania jak przygotowanie, uzupełnienie i archiwizacja pasków postępu lotu czy aktualizacja danych w systemach komputerowych).
2. Koordynacja (koordynacja współpracy pomiędzy różnymi centrami kontroli [zewnętrzna] i pomiędzy sektorami tego samego centrum [wewnętrzna]).
3. Analiza konfliktów (przed wydaniem zezwolenia na działanie kontroler analizuje swoje dane, by upewnić się, że dane działanie nie spowoduje zagrożenia).
4. Rutynowa łączność radiowa (obejmuje pierwszy i ostatni kontakt na danej częstotliwości, raportowanie pozycji itd.).
5. Obsługa radaru (związana z rozwiązywaniem konfliktów taktycznych przez kontrolera – obejmuje nadzór radaru i działania interwencyjne).

Nadzór wskazań radaru jest szczególnie istotny w sytuacjach, w których kontroler wykryje zagrożenie konfliktu pomiędzy dwoma statkami powietrznymi i musi zdecydować, czy konieczne jest podjęcie działań interwencyjnych.

Czas prowadzenia nadzoru wskazań radaru jest różny w różnych sytuacjach konfliktowych. Zasadniczo obliczamy go na podstawie długości okresu obserwacji (czas aktualizacji ekranu lub pełnego obrotu anteny radaru) oraz liczby tych okresów w danej sytuacji. Tabela 2.7 przedstawia czasy prowadzenia nadzoru dla różnych typów sytuacji konfliktowych wykorzystanych podczas symulacji lotów.

Tabela 2.7. Czasy prowadzenia nadzoru wskazań radaru w różnych sytuacjach konfliktowych [164]

Typ konfliktu	Okres obserwacji [s]	Liczba aktualizacji ekranu	Czas prowadzenia nadzoru [s]
1	2	10	20
2	2	12	24
3	2	12	24
4	2	15	30

5	3	12	36
6	4	9	36
7	2	9	18
8	3	9	27
9	4	9	36

W przypadku pewnych typów sytuacji konfliktowych wymagany jest szczególnie dokładny nadzór wskazań radaru, z analizą średnio raz na dwie aktualizacje ekranu.

Lista typów sytuacji konfliktowych zidentyfikowanych na podstawie modelu przestrzeni powietrznej (tabela 2.7) z udziałem dwóch statków powietrznych [157]:

- na tym samym kursie i na tym samym poziomie lotu, w fazie lotu;
- na tym samym kursie, jeden w fazie lotu, drugi w fazie wznoszenia lub zniżania;
- na tym samym kursie, oba w fazie wznoszenia lub zniżania;
- na przecinających się kursach, na tym samym poziomie lotu, w fazie lotu;
- na przecinających się kursach, jeden w fazie lotu, drugi w fazie wznoszenia lub zniżania;
- na przecinających się kursach, oba w fazie wznoszenia lub zniżania;
- na przeciwnych kursach, na tym samym poziomie lotu, w fazie lotu;
- na przeciwnych kursach, jeden w fazie lotu, drugi w fazie wznoszenia lub zniżania;
- na przeciwnych kursach, oba w fazie wznoszenia lub zniżania.

Zadania rozdzielane są pomiędzy pracowników poszczególnych sektorów, zgodnie z ich zakresem obowiązków i rozdziałem odpowiedzialności pomiędzy sektorami. W ten sposób model pozwala obliczyć nie tylko rzeczywiste obciążenia pracą na poszczególnych stanowiskach pracy, ale także procentowe obciążenia na każdym stanowisku, podczas całego okresu objętego symulacją lub też podczas wybranych okresów zwiększonego natężenia ruchu.

Określając czas realizacji zadań, analitycy kierowali się następującymi zasadami:

- czas realizacji każdego zadania wyrażany jest w sekundach;
- określony czas realizacji to średni czas wykonania danego zadania przez wykwalifikowanego kontrolera, z pominięciem sytuacji ekstremalnych, które mogłyby korzystnie lub niekorzystnie wpłynąć na czas realizacji;
- czas realizacji nie musi oznaczać rzeczywistego okresu potrzebnego na przeprowadzenie wszystkich działań związanych z danym zadaniem, ale okres, w którym kontroler jest w pełni zaangażowany w wykonanie zadania, wyłączając się z innych zajęć;
- w niektórych przypadkach zadanie może obejmować więcej niż jedno stanowisko kontroli i dla każdego ze stanowisk może być wymagane określenie innego czasu realizacji;
- dla tych samych zadań wykonywanych w różnych sektorach można określać różne czasy realizacji.

Poprawa przepustowości ukraińskiej przestrzeni powietrznej w rejonach kontrolowanych lotnisk w warunkach niepewności wymaga wprowadzenia następujących działań/programów:

- zwiększenia zaufania kontrolerów wobec ATFM (poprawa poziomu taktycznego zarządzania przepływem i wprowadzenie wspólnego planowania lotów),
- dynamiczna sektoryzacja i elastyczne zarządzanie konfiguracją; poprawa koordynacji działań jednostek cywilnych i wojskowych oraz pełne wdrożenie FUA (rozszerzenie FUA o dynamiczne zarządzanie przestrzenią powietrzną i wdrożenie wspólnego cywilno-wojskowego planowania przestrzeni powietrznej na poziomie europejskim);
- zmniejszenie obciążenia kontrolerów (wdrożenie narzędzi zarządzania przylotami;

wdrożenie automatycznego wsparcia zarządzania odlotami; wdrożenie automatycznego wsparcia rozwiązywania konfliktów) i rozwój struktury przestrzeni powietrznej [164].

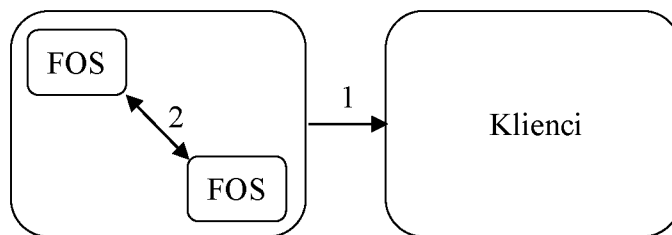
2.3.3. Analiza koncepcji modułu lotu

Od czasów braci Wright obserwujemy stały rozwój branży lotniczej. Obecnie jedną z najważniejszych instytucji decydujących o obliczu lotnictwa w Europie jest EUROCONTROL. Jest to organizacja, która realizuje plan wspierania partnerów lotniczych w prowadzeniu bezpiecznych i wydajnych operacji ruchu lotniczego poprzez wdrażanie rozwiązań usprawniających gromadzenie danych i tworzenie mechanizmów raportujących. Jest to możliwe przede wszystkim dzięki utrzymaniu wysokiego poziomu produkcji i wdrażaniu zróżnicowanych nowoczesnych urządzeń oraz technologii, wspomagających zapobieganie ryzyku bezpieczeństwa i pozwalających sprostać wyzwaniom związanym z przepustowością i wydajnością, jakie pojawiają się w związku z budową jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej. Rosnąca stale liczba operacji lotniczych wymaga stworzenia środowiska umożliwiającego nieprzerwaną obserwację lotów, stanowiącego nieodłączną część wizji przyszłego zarządzania ruchem lotniczym (ATM). Dziś rozmaite nowoczesne programy umożliwiają przekazywanie coraz większych ilości informacji lotniczych. Bieżące prace i analizy prowadzone w Europie wskazują na perspektywy rozwoju nowych rozwiązań wspierających gromadzenie i wymianę spójnych danych na temat lotu przez wszystkie zainteresowane strony, możliwego dzięki wprowadzeniu koncepcji modułu lotu (Flight Object, FO).

Pod koniec 2004 r. EUROCONTROL uruchomiła badanie w celu określenia proponowanych standardów interoperacyjności modułów lotu (Flight Object Interoperability Proposed Standard, FOIPS), w którym zdefiniowano model FO, wspierany przez sieć serwerów modułów lotu (Flight Object Servers, FOS), oparty na dwóch rodzajach połączeń – pomiędzy FOS i jego klientami oraz pomiędzy różnymi FOS, wspomagających kontrolę ruchu lotniczego podczas lotu i w rejonach lotnisk (ilustracja 2.51). Efektem tych działań było stworzenie dwóch uzupełniających się modeli – modelu „analitycznego”, określającego standardowy zestaw usług zapewnianych przez FO, oraz modelu „użytkowego”, określającego, na jakich warunkach użytkownicy mogą korzystać z usług zdefiniowanych przez model analityczny. Kolejnymi krokami w procesie wdrożenia FO są budowa i weryfikacja prototypów FOS, planowane jako jeden z elementów programu SESAR (Single European Sky ATM Research) [165].

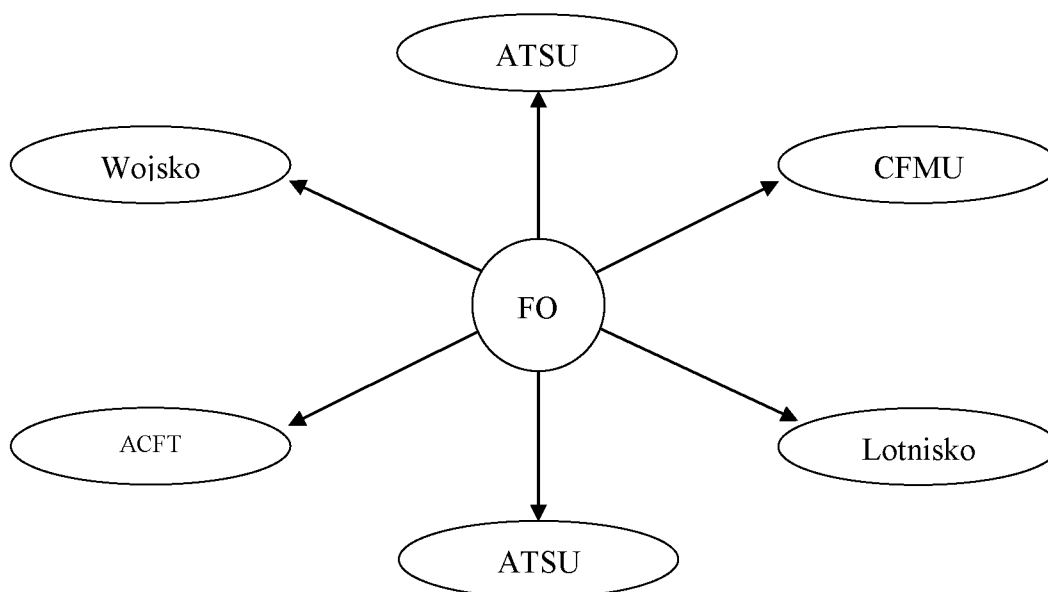
Podstawa wymiany danych lotu

System przetwarzania danych lotu (Flight Data Processing System, FDPS) to część automatycznego systemu kontroli lotów (ATC), która pozwala kontrolerom lotniczym gromadzić i aktualizować informacje o każdej operacji, wykonywać automatyczne obliczenia, drukować wybrane paski lotów, a także uzyskiwać aktualne informacje na temat trwających lotów. Dzięki systemowi przetwarzania danych lotu kontrolerzy mogą obserwować, modyfikować, aktywować i odwoływać nadzorowane przez siebie operacje. W ten sposób system stanowi podstawę wymiany i udostępniania dynamicznych informacji lotniczych w czasie rzeczywistym [166].



Ilustracja 2.51. Połączenia [169]

Wykorzystanie funkcji gromadzenia danych przez FDPS jest jednym z kluczowych aspektów działania FO, który dostarcza użytkownikom nawet takich informacji, jak osiągi statków powietrznych, zapewniając spójny obraz danych lotu we wszystkich systemach FDPS. Dzięki FO można osiągnąć najwyższy poziom interoperacyjności między różnymi podmiotami. Mogą to być np. systemy działające zarówno w cywilnych, jak i wojskowych jednostkach służb ruchu lotniczego (ATSU) (ponieważ oba opisane powyżej połączenia mogą wykorzystywać niedostępne wcześniej mechanizmy i platformy koordynacji działań jednostek cywilnych i wojskowych), centralnych jednostkach zarządzania przepływem (CFMU) lub kombinacjach tych podmiotów, pokładowych systemach zarządzania lotem (FMS), u operatorów statków powietrznych czy władz portów lotniczych (ilustracja 2.52).



Ilustracja 2.52. Zainteresowane podmioty [169]

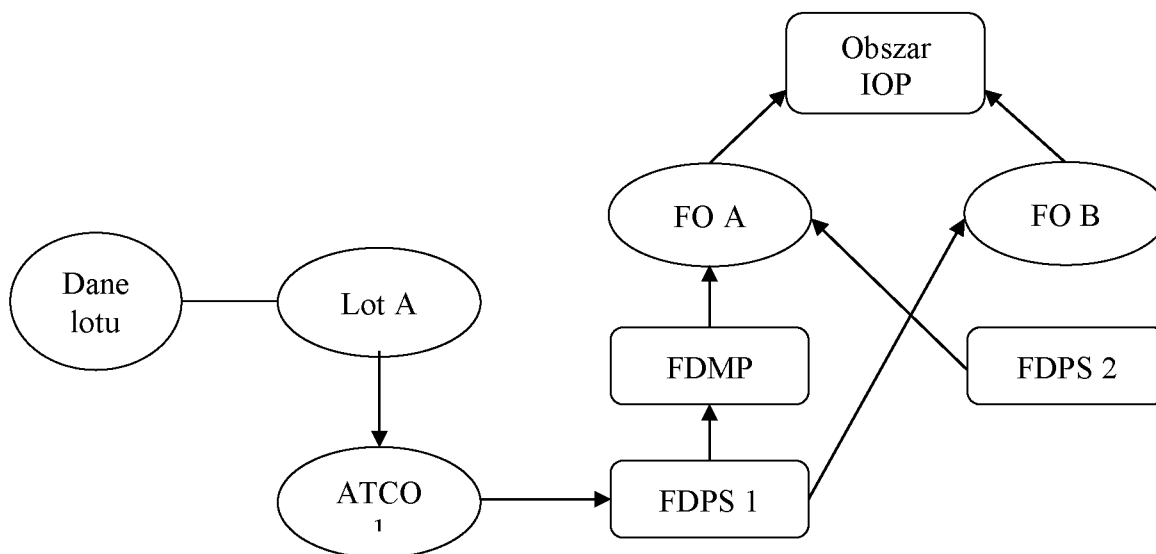
Interoperacyjność FO

Jeśli weźmiemy pod uwagę bieżącą sytuację, to, logicznie, dla każdego lotu powstaje jeden FO, ponieważ rozproszone informacje na temat lotu spływają do różnych systemów, wykorzystywanych przez pilotów lub ATC. Pytanie tworzy spójny obraz wszystkich lotów poprzez dystrybucję aktualnych informacji do wszystkich zainteresowanych stron; a odpowiedź – FO, stanowi wspólny odnośnik ułatwiający wyszukiwanie danych. Tak właśnie ma wyglądać stan docelowy.

Najważniejszym filarem, na którym opiera się dziś rozwój lotnictwa, jest bezpieczeństwo, które wymaga nieustannej kontroli sytuacji w powietrzu: dostępu do najnowszych potwierdzonych danych lotu oraz planów jego dalszego przebiegu o odpowiednim poziomie dokładności, dostępności, szczegółowości i spójności. Na przykład jeśli wszystkie centra kontroli obszarów wspólnie z CFMU uzgodnią nową trasę lotu, którą zaakceptują piloci, ATSU wprowadza aktualizację do FO i udostępnia ją wszystkim CFMU i ATSU zainteresowanym interoperacyjnością, wraz z informacją, że modyfikacje zostały uzgodnione przez wszystkich uczestników. Aktualizacja FO oznacza również aktualizację jej kopii w całym obszarze IOP. W przypadku odrzucenia propozycji można dołączyć również informacje o przyczynach. Menedżer danych lotu (FDM), będący w każdym przypadku stroną ostatecznie odpowiedzialną za lot, ma również możliwość aktualizowania modyfikacji, nawet bez akceptacji wszystkich zainteresowanych (ilustracja 2.53).

Cele interoperacyjności

Występowanie sytuacji kryzysowych w zróżnicowanym i intensywnym europejskim ruchu powietrznym wymaga od wszystkich zainteresowanych stron realizacji najważniejszego celu interoperacyjności – tworzenia spójnego obrazu danych lotu (do czego niezbędne są skuteczne połączenia) i ich koordynacji, również w systemach, które dotychczas uznawano za mniej istotne. Dodatkowymi celami interoperacyjności jest poprawa ogólnego bezpieczeństwa i zapewnienie jednakowego obrazu FO dla wszystkich użytkowników, a ich realizacja możliwa jest tylko pod warunkiem powszechnego dostępu do spójnych informacji. Kolejną kwestią jest możliwość zastąpienia poszczególnych FDPS w nagłych sytuacjach. Każdy FDPS działa niezależnie, jednak w przypadku awarii systemu inne FDPS podłączone do tej samej sieci powinny wziąć na siebie obsługę procesów, którymi oryginalnie zarządzał uszkodzony system – by umożliwić natychmiastowe odzyskanie wszystkich danych lotu i kontynuację działań europejskiej sieci ATM. Wreszcie nieograniczona wymiana celów i pomysłów pomaga w rozwoju i poprawie efektywności zarządzania bezpieczeństwem, stanowiącym absolutny priorytet, a także w wyznaczaniu i realizacji kolejnych celów w dążeniu do doskonałości.



Ilustracja 2.53. Koncepcja obiektu lotu [169]

Cechy FO

Ogromną część danych lotu stanowią informacje na temat jego przewidywanej trajektorii. Ponieważ procesy prognozowania trajektorii w różnych FDPS różnią się od siebie, mogą one w efekcie prezentować również rozbieżne przewidywania. Wynika to z faktu, iż różne modele stosują różne metody układania tras i w rezultacie otrzymane trajektorie również nie są jednakowe. W takich przypadkach można wykorzystać metodę scenariusza lotu. Określa ona zakres danych wejściowych niezbędnych do prognozowania trajektorii lotu, ale dzięki wykorzystaniu ich w połączeniu z innymi danymi umożliwia opracowanie przez FDPS podobnych, choć nadal nie identycznych trajektorii dla poszczególnych operacji. Następnie FDMP tworzy końcową trajektorię, obejmującą cały obszar IOP, która udostępniana jest zainteresowanym za pomocą FO.

Warto przy tym zauważyć, że w obliczeniach trajektorii uwzględnia się nie tylko trasę statku powietrznego 2D, ale również jego położenie 4D, kąt ścieżki oraz prędkość. W procesie rejestrowane są również instrukcje kontrolera ruchu lotniczego, co można wyjaśnić w prosty sposób. Przechowywanie tych danych ma na celu zwiększenie ogólnej świadomości na temat wpływu instrukcji kontrolerów lotniczych na tworzenie końcowych ścieżek lotu dostępnych w FO [167].

Efektywność wdrożenia koncepcji FO

Ocena efektywności wdrożenia koncepcji FO w centrach kontroli obszarów wiąże się z kwestią wieloaspektowej optymalności tego rozwiązania. Możemy wskazać kilka kryteriów optymalności – koszt c_1 wdrożenia algorytmów FO, regularność lotów c_2 czy stopień skomplikowania kontroli lotów c_3 .

Dlatego do oceny efektywności wdrożenia FO celowe wydaje wykorzystanie wieloaspektowego modelu.

Wprowadźmy następujące zapisy: x – wybór alternatywny (x_1 oznacza działania z FO, a x_2 – działania bez FO); $i = \overline{1,3}$ – liczba kryteriów optymalności c .

Wartości $c_2(x_1)$ i $c_3(x_1)$ można określić na dwa sposoby: poprzez symulację procesów ATC z wykorzystaniem FO w ACC, w którym planowane jest wdrożenie FO, albo też na podstawie danych statystycznych pozyskanych z ACC, w których koncepcja FO została już wdrożona.

Normalizację kryteriów optymalności przeprowadzamy za pomocą poniższego wyrażenia:

$$\bar{c}_i(x) = 1 - \frac{c_i(x)}{\max_x c_i(x)},$$

gdzie \bar{c}_i to znormalizowana wartość kryterium c_i . W przypadkach kiedy $\bar{c}_i < 0,05$, zakłada się, że $\bar{c}_i = 0,05$.

Kryterium ogólnej efektywności C określone jest na podstawie ogólnej funkcji celowości Harringtona [167]:

$$C(x) = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \bar{c}_i(x)}.$$

Wdrożenie FO jest zatem celowe, jeśli prawdziwa jest poniższa nierówność:

$$C(x_1) > C(x_2).$$

Badania pokazują, że największą część prac w tym zakresie wykonano pomiędzy 2007 i 2009 r., podczas opisywania modelu FO i wykorzystywanych w nim połączeń. Kolejnymi krokami w procesie wdrożenia FO mają być budowa i weryfikacja prototypów FOS, planowane jako jeden z

elementów programu SESAR. Wyniki badań są obiecujące, ponieważ wskazują, że jest to właściwa droga do osiągnięcia pożądanego poziomu zarządzania bezpieczeństwem. Doskonalenie działań ATM, stworzenie platform koordynacji działań cywilnych i wojskowych, rozwój ekologicznych i wydajnych operacji lotniczych, a także zyskanie spójnego obrazu każdego lotu – wszystkie te nieodłączne aspekty realizacji wizji przyszłego zarządzania ruchem lotniczym mogą pomóc w skutecznym wdrożeniu koncepcji FO [168].

Wzrost liczby sytuacji kryzysowych związany ze zwiększeniem natężenia ruchu w europejskiej przestrzeni powietrznej skłania nas do tworzenia środowiska, w którym dostęp do spójnych danych lotu poprawi skuteczność zarządzania bezpieczeństwem. Wdrożenie koncepcji modułów lotu może stać się źródłem kolejnych nowych pomysłów wspierających wymianę spójnych danych lotu. Rozwiązanie to, oparte na FOS, pozwoli nam gromadzić i modyfikować dynamiczne informacje lotnicze w ramach wymiany w czasie rzeczywistym. Dostarcza wszystkim zainteresowanym podmiotom różnego rodzaju wcześniej niedostępne informacje – wizualizacje tras w formacie 4D, dane o osiągnięciach statków powietrznych, zapisy instrukcji kontrolerów lotów, nowe zasady zarządzania trajektoriami itd. Trudno przecenić możliwości, jakie otwiera wdrożenie tej koncepcji. Co więcej, z upływem czasu możemy oczekiwać, że bazy danych FO zostaną wykorzystane do tworzenia różnego rodzaju oprogramowania, wykorzystywanego głównie na potrzeby cywilne [169].

2.3.4. Symulacja wielocelowego rozwiązywania sytuacji konfliktowych w lotnictwie

Jednym z najważniejszych problemów współczesnego lotnictwa jest konieczność opracowania nowych metod rozwiązywania sytuacji konfliktowych w powietrzu, które to rozwiązania umożliwiłyby wyznaczanie bezkolizyjnych trajektorii w dynamicznym środowisku ruchu lotniczego z wykorzystaniem wybranych kryteriów optymalności.

Wyznaczanie bezkolizyjnych trajektorii lotów służące rozwiązywaniu sytuacji konfliktowych to proces podejmowania decyzji umożliwiających realizację kilku celów.

Najważniejszym priorytetem, jak zawsze, jest bezpieczeństwo lotu. Rozwiązywanie sytuacji konfliktowych w powietrzu polega na wyznaczeniu trajektorii lotu zapewniającej utrzymanie minimów separacyjnych.

W rozwiązywaniu sytuacji konfliktowych w powietrzu wyróżniamy następujące kryteria optymalności: regularność i ekonomika lotów, pierwszeństwo statków powietrznych, stopień skomplikowania manewrów oraz komfort pasażerów. Bieżące tendencje ciągłego zwiększania intensywności ruchu lotniczego powodują szczególnie wzrost znaczenia takich kryteriów, jak regularność i ekonomika lotów. Należy również zdecydować, który ze statków powietrznych uczestniczących w zdarzeniu ma pierwszeństwo w danej sytuacji, biorąc pod uwagę ich warunki techniczne, ilość paliwa w zbiorniku oraz rodzaj lotu. Kolejnym aspektem, ważnym z perspektywy żeglugi powietrznej i kontroli ruchu lotniczego (ATC), jest stopień skomplikowania oraz czas potrzebny na wykonanie manewrów koniecznych do uniknięcia konfliktu. Wiąże się to również z ostatnim kryterium – kryterium komfortu, istotnym z punktu widzenia linii lotniczych. Niespodziewane zwroty, a także nagłe zmiany wysokości lub prędkości mogą wpływać negatywnie na komfort pasażerów na pokładzie.

Problem rozwiązywania sytuacji konfliktowych w sposób umożliwiający realizację kilku celów był przedmiotem artykułów [170–173].

Autorzy publikacji [170] opracowali model matematyczny wielocelowego wyboru trajektorii pozwalający rozwiązać sytuacje konfliktowe i zaproponowali metodę określania znaczenia wagi w liniowym splataniu kryteriów optymalności. Rozwój tego modelu omówiono w artykule [171].

Z kolei w artykule [172] autorzy omówili metodę wielocelowego wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii lotów z wykorzystaniem wielocelowego programowania dynamicznego, przedstawili równania wielocelowego programowania dynamicznego służące określeniu efektywnych z punktu widzenia analizy Pareto szacunków bezkolizyjnych trajektorii, a także zdefiniowali procedury wyboru optymalnej trajektorii z grupy trajektorii efektywnych z perspektywy analizy Pareto.

Celem niniejszego rozdziału jest omówienie komputerowej symulacji rozwiązywania sytuacji konfliktowych w powietrzu z wykorzystaniem metody wielocelowego sekwencyjnego wyznaczania bezkolizyjnych czasowo-przestrzennych trajektorii, opracowanej w artykule [172].

Metoda rozwiązywania sytuacji konfliktowych w powietrzu

Do rozwiązywania konfliktów pomiędzy dwoma statkami powietrznymi w locie wykorzystuje się metodę sekwencyjnego wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii czasowo-przestrzennych, opartą na dynamicznym programowaniu wielocelowym [172].

W metodzie tej zapobieganie potencjalnym sytuacjom konfliktowym jest sekwencyjnym wieloetapowym procesem podejmowania decyzji w dyskretnych punktach czasowych. Rozwiązywanie konfliktów uznawane jest za proces kontrolowany, jeśli jeden ze statków powietrznych może wykonać kilka manewrów wyznaczonych w dyskretnych punktach czasowych. Statki powietrzne uczestniczące w konflikcie stanowią układ dynamiczny S . Wyznaczenie bezkolizyjnej trajektorii to problem optymalnej kontroli układu dynamicznego S , który można rozwiązać za pomocą programowania dynamicznego.

Metoda opiera się na założeniu, że jeden ze statków powietrznych wykonuje manewry, podczas gdy drugi przez cały czas porusza się po zaplanowanej wcześniej trajektorii.

Wyznaczanie trajektorii odbywa się w przedziale czasowym $[t_0, t_k]$, gdzie t_0 to czas wykrycia potencjalnego konfliktu, a t_k to czas opuszczenia obszaru ATC przez manewrujący statek powietrzny.

Układ dynamiczny S jest dyskretyzowany w czasie (proces rozłożony jest na k etapów) i w przestrzeni stanów. Zasadniczo uznaje się, że manewrujący statek powietrzny może przejść do stanu $\mathbf{X}(j)$ podczas etapu j z kilku stanów $\mathbf{X}(j-1)$, w których znajdował się podczas wcześniejszego etapu $(j-1)$:

$$\mathbf{X}(j) = f(\mathbf{X}(j-1), \mathbf{U}(j-1)),$$

gdzie $f(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ to funkcja zmiany stanu ze stanu \mathbf{X} pod wpływem zjawiska \mathbf{U} .

Wektor stanu \mathbf{X} ma współrzędne, prędkość i kierunek statku powietrznego. Wejściowy wektor sygnałów kontrolnych \mathbf{U} zawiera określone wartości prędkości oraz kąta nachylenia. Stan początkowy \mathbf{X}_0 i końcowy \mathbf{X}_k charakteryzują układ bezkolizyjny. Stan końcowy \mathbf{X}_k wyznaczany jest przez poziome współrzędne punktu wyjścia z obszaru ATC. Zakłada się, że statek powietrzny może przejść do stanu końcowego ze wszystkich stanów, w jakich znajduje się podczas przedostatniego etapu.

Na każdym etapie j tworzy się prognozę możliwości przekroczenia minimów separacyjnych podczas przechodzenia ze stanów $\mathbf{X}(j-1)$ pod wpływem zjawiska $\mathbf{U}(j-1)$ i definiuje się odpowiednie zbiory rozwiązań kontrolnych $\mathbf{D}_v^s(\mathbf{X}(j-1))$, pozwalających zapobiec sytuacji konfliktowej.

Kryteria optymalności decydujące o efektywności rozwiązania konfliktu to odchylenie od planu lotu J_1 , zużycie paliwa J_2 oraz liczba zmian profilu lotu J_3 . Wybrane kryteria optymalności tworzą wektor $\mathbf{J} = \{J_i\}, i = \overline{1,3}$.

Dla dowolnej trajektorii $\mathbf{T} = \{\mathbf{X}_0, \mathbf{X}(1), \dots, \mathbf{X}(m)\}$ wartości kryteriów optymalności J charakteryzujących efektywność lotu definiuje się w następujący sposób:

$$J_i(\mathbf{T}) = \sum_{j=1}^m \Delta J_i(\mathbf{X}(j-1), \mathbf{U}(j-1)),$$

gdzie $\Delta J_i(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ to koszt przejścia ze stanu \mathbf{X} pod wpływem zjawiska \mathbf{U} dla każdego i -tego kryterium optymalności.

By wyznaczyć zbiór $\mathbf{E}(\mathbf{X}(j))$, efektywnych w sensie Pareto szacunkowych bezkolizyjnych trajektorii przejścia do stanu $\mathbf{X}(j)$ ze stanów $\mathbf{X}(j-1)$, wykorzystuje się równanie wielocelowego programowania dynamicznego [172]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}(j)) = \text{eff} \bigcup_{\mathbf{X}(j-1) \in \Pi} \left(\mathbf{E}(\mathbf{X}(j-1)) \oplus \Delta \mathbf{J} \right),$$

$$\Delta \mathbf{J} = \{ \Delta J_i(\mathbf{X}(j-1), \mathbf{U}'(j-1)) \}, i = \overline{1,3},$$

gdzie *eff* to operator efektywnych w sensie Pareto szacunków; \oplus to suma bezpośrednia; Π to zbiór stanów na etapie $(j-1)$, z których możliwe jest przejście do stanu $\mathbf{X}(j)$; a $\mathbf{U}'(j-1) \in \mathbf{D}_U^s(\mathbf{X}(j-1))$ to element kontrolny, który powoduje przejście statku powietrznego ze stanu $\mathbf{X}(j-1) \in \Pi$ do stanu $\mathbf{X}(j)$.

Zbiór \mathbf{P} efektywnych w sensie Pareto bezkolizyjnych trajektorii lotu definiowany jest jako:

$$\mathbf{P} = \{ \mathbf{T} \in \mathbf{K} \mid \mathbf{J}(\mathbf{T}) \in \mathbf{E}(\mathbf{X}_k) \},$$

gdzie \mathbf{K} to zbiór pełnych bezkolizyjnych trajektorii, po których statek powietrzny porusza się ze stanu początkowego \mathbf{X}_0 do stanu końcowego \mathbf{X}_k .

Wybór optymalnej bezkolizyjnej trajektorii \mathbf{T}^* odbywa się przez rozwiązanie problemu optymalizacyjnego [170, 172]:

$$\mathbf{T}^* = \arg \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} \max_{\mathbf{W} \in \mathbf{D}_w} \sum_{i=1}^3 w_i c_i(\mathbf{T}),$$

gdzie c_i to kryterium optymalności z domeną o dopuszczalnej wartości $\mathbf{D}_c = \{c \mid c \in [0,1]\}$; w_i to współczynnik ważenia odzwierciedlający względne znaczenie kryteriów i tworzący wektor $\mathbf{W} = \{w_i\}$ z domeną o dopuszczalnej wartości \mathbf{D}_w :

$$\mathbf{D}_w = \left\{ \mathbf{W} \mid \sum_{i=1}^3 w_i = 1; w_i \geq w_{i+1}, i = \overline{1,2}; w_3 \geq w_0 > 0 \right\}.$$

Wartości kryteriów optymalności \mathbf{T} trajektorii ze zbioru \mathbf{P} są redukowane do wartości dopuszczalnych domeny \mathbf{D}_c za pomocą przekształcenia liniowego:

$$c_i(\mathbf{T}) = \frac{J_i(\mathbf{T}) - \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T})}{\max_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T}) - \min_{\mathbf{T} \in \mathbf{P}} J_i(\mathbf{T})}.$$

Symulacja komputerowa

W ramach badania przeprowadzono symulację sytuacji konfliktowej pomiędzy dwoma samolotami 737-800 lecącymi ze stałą prędkością na przecinających się kursach na poziomie lotu

FL 360. Początkowe parametry lotu i charakterystyka przewidywanej sytuacji konfliktowej przedstawione są w tabeli 2.8.

Wartość poziomego minimum separacyjnego równa jest $d_s = 18,5$ km. Do prognozowania możliwości przekroczenia minimum separacyjnego wykorzystano metodę geometryczną.

Tabela 2.8. Parametry lotu statków powietrznych i charakterystyka przewidywanej sytuacji konfliktowej [174]

Parametr	Samolot 1	Samolot 2
Kurs φ [stopnie]	0	315
Prędkość przelotowa V [m/s]	220	200
Współrzędne początkowe $(x_0; y_0)$ [km]	(35; 0)	(60; 30)
Odległość od punktu kontrolnego L_0 [km]	90	–
Planowany czas przelotu nad punktem kontrolnym t_k [s]	409	–
Czas lotu do punktu największego zbliżenia t_{min0} [s]	225	
Przewidywana najmniejsza odległość pomiędzy samolotami d_{min0} [m]	14081	

Założono, że aby uniknąć konfliktu, pierwszy z samolotów powinien wykonać odpowiednie manewry. Drugi samolot utrzymuje zaplanowaną trajektorię.

Proces został podzielony w czasie na 6 etapów. Czas pierwszych 5 etapów jest równy $\Delta t = 60$ s.

Założono również, że pierwszy samolot może zmienić kurs i prędkość, by uniknąć konfliktu. Kąt nachylenia przy skręcie wynosi $\gamma = 20^\circ$. Czas skrętu ograniczono do 15 s. Zmiana prędkości przy skręcie równa jest $\Delta V = 5$ m/s.

Symulację trajektorii przeprowadzono przy użyciu kinematyczno-energetycznego modelu kontrolowanego ruchu statku powietrznego [4], który uwzględnia dynamiczne właściwości ruchu, a także charakterystykę i osiągi statku powietrznego zaczerpnięte z bazy danych statków powietrznych EUROCONTROL, dzięki czemu pozwala obliczyć zużycie paliwa.

Koszty ΔJ_i oszacowano za pomocą interpolacji metodą „najbliższego sąsiada”. Minimalna wartość współczynników ważenia kryteriów optymalności $w_0 = 0,1$.

W wyniku symulacji wyznaczono zbiór \mathbf{P} 23 bezkolizyjnych, efektywnych w sensie Pareto trajektorii. Zbiór \mathbf{P} charakteryzują następujące parametry: minimalne i maksymalne odchylenie całkowite od planowanego czasu lotu to odpowiednio $\Delta t_{k\ min} = 1$ s i $\Delta t_{k\ max} = 30$ s; maksymalny spadek i maksymalny wzrost zużycia paliwa w porównaniu z lotem na planowanej trajektorii to odpowiednio $\Delta q_{dec} = -2\%$ i $\Delta q_{inc} = 6,4\%$; maksymalna i minimalna liczba zmian profilu lotu to $n_{min} = 3$ i $n_{max} = 9$.

Parametry wybranej optymalnej trajektorii bezkolizyjnej \mathbf{T}^* przedstawione zostały w tabeli 2.9.

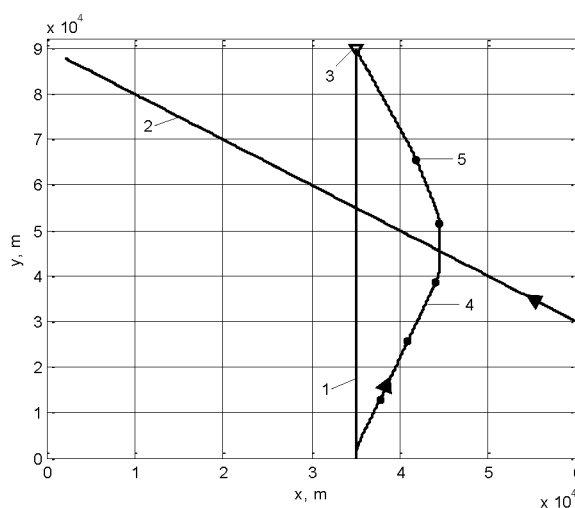
Tabela 2.9. Parametry optymalnej bezkolizyjnej trajektorii lotu [174]

Parametr	Wartość
Odchylenie od planowanego czasu lotu Δt_k [s]	4
Dodatkowe zużycie paliwa Δq [%]	3,9
Liczba zmian profilu lotu n	4

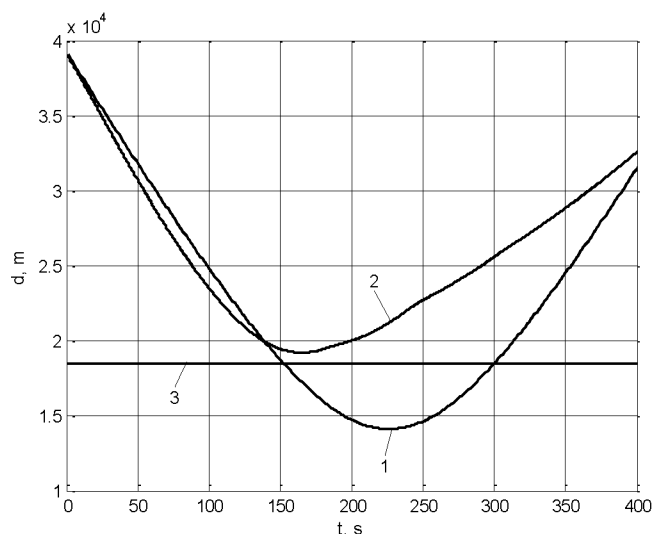
Optymalna bezkolizyjna trajektoria zakłada lot z prędkością przelotową przez pierwsze 4 etapy, przyspieszenie do 225 m/s na etapie 5 i lot z prędkością 225 m/s do punktu kontrolnego na etapie 6. Graficzny obraz optymalnej bezkolizyjnej trajektorii przedstawia ilustracja 2.54. Ilustracja 2.55 pokazuje zależność odległości d pomiędzy statkami powietrznymi od czasu.

Wyniki symulacji komputerowej pokazują, że metoda wielocelowego wyznaczania bezkolizyjnych trajektorii umożliwia rozwiązywanie sytuacji konfliktowych na podstawie wybranych kryteriów optymalności.

Metodę tę można wykorzystać również do stworzenia nowoczesnych algorytmów rozwiązywania sytuacji konfliktowych, które mogą być stosowane w systemach ATC i pokładowych systemach zapobiegania kolizjom [174].



Ilustracja 2.54. Trajektorie statków powietrznych [174]: 1 – planowana trajektoria pierwszego samolotu; 2 – planowana trajektoria drugiego samolotu; 3 – punkt kontrolny na trasie; 4 – optymalna bezkolizyjna trajektoria pierwszego samolotu; 5 – stany na kolejnych etapach



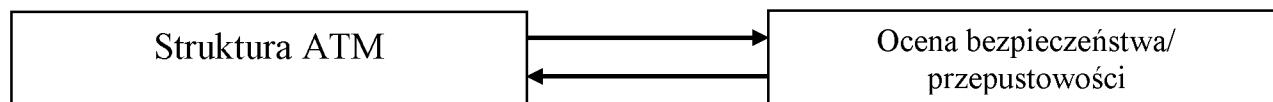
Ilustracja 2.55. Zależność odległości d pomiędzy samolotami od czasu [174]: 1 – odległość podczas lotu planowanymi trajektoriami; 2 – odległość po rozwiązaniu sytuacji konfliktowej; 3 – minimum separacyjne

2.3.5. Prawdopodobieństwo kolizji statków powietrznych lecących trasami równoległymi

Branża lotnictwa komercyjnego stanowi istotny element światowej gospodarki. Ponad 4,5% światowych wyników gospodarczych wiąże się z wykorzystaniem cywilnego transportu lotniczego [57].

Najintensywniej wykorzystywane rejony przestrzeni powietrznej pozostają zatłoczone przez większość czasu. Wynika to z połączenia kilku czynników – dużego natężenia ruchu lotniczego, warunków meteorologicznych oraz obowiązujących w danej przestrzeni restrykcji. Problemem jest osiągnięcie najwyższych możliwych poziomów efektywności i bezpieczeństwa. Istniejące koncepcje zarządzania przestrzenią powietrzną dążą do złagodzenia wymagań dotyczących zarządzania przepływem ruchu lotniczego i zwiększenia elastyczności przepływu. Siedmioletnia prognoza EUROCONTROL przewiduje do 2018 r. 11,1 mln lotów według wskazań przyrządów w Europie. Od 2014 r. liczba tych lotów będzie wzrastać średnio o 1,9% rocznie. Wraz ze zwiększeniem natężenia ruchu wzrośnie również liczba opóźnień, wynikających z niedostatecznej przepustowości przestrzeni powietrznej [176]. Ograniczenia przepustowości są wynikiem wielu czynników, takich jak liczba dróg startowych, minima separacyjne w powietrzu czy obciążenie i możliwości kontrolerów ruchu lotniczego.

Jednocześnie każdej próbie zwiększenia przepustowości musi towarzyszyć pewność, że nie wpłynie ona negatywnie na bezpieczeństwo (ilustracja 2.56).



Ilustracja 2.56. Zależność pomiędzy strukturą przestrzeni powietrznej, przepustowością i bezpieczeństwem

Wraz ze wzrostem przepustowości przestrzeni powietrznej względne bezpieczeństwo musi się zmniejszać, by z czasem osiągnąć ten sam poziom wypadkowości.

Istniejąca struktura tras przygotowana przez służby ruchu lotniczego często określa kary za zbyt duże odstępstwo od najbardziej ekonomicznej trasy, które uwzględniają jednak nie tylko

bezpośrednie różnice, ale również takie czynniki, jak wiatr, temperatura, a także waga statku powietrznego, opłaty oraz bezpieczeństwo [57].

Według wielu podmiotów zaangażowanych w żeglugę powietrzną jednym ze sposobów poprawy przepustowości przestrzeni powietrznej jest zmniejszenie minimów separacyjnych [179].

Standardy dotyczące separacji statków powietrznych określają odległości w czasie i przestrzeni, które pozwalają zapobiec sytuacjom konfliktowym i kolizjom [182]. Z jednej strony zmniejszenie tych minimów separacyjnych pozwoli zwiększyć przepustowość przestrzeni powietrznej, jednak, z drugiej, dalszy wzrost natężenia ruchu lotniczego będzie oznaczać większe ryzyko incydentów i wypadków w powietrzu [180].

Bezpieczeństwo zależy od zagęszczenia i intensywności ruchu lotniczego, a także od ogólnej sytuacji w ruchu lotniczym (zależnej od pory roku, typowych zjawisk pogodowych itd.) [177].

Koncepcje „przepustowości”, „bezpieczeństwa” i „technologii” koncentrują się na geometrii tras lotniczych:

- przepustowość wzrasta dla mniejszej separacji L ;
- technologie wykorzystywane w nawigacji i kontroli lotów powinny umożliwić zmniejszenie wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego pozycjonowania σ ;
- połączenie L i σ powinno być takie, by prawdopodobieństwo kolizji nie przekraczało docelowego poziomu bezpieczeństwa ICAO (ICAO Target Level of Safety, TLS), określonego jako 5×10^{-9} na godzinę [175, 178].

Rzeczywisty ruch statku powietrznego ma w sobie zawsze element niepewności, związanej przede wszystkim z wiatrem, ale również z potencjalnymi błędami w śledzeniu, nawigacji i kontroli [181]. Wszystkie te źródła niepewności wpływające na ruch statku powietrznego powodują zazwyczaj odchylenia od wyznaczonej ścieżki lotu [179].

Celem niniejszego rozdziału jest określenie prawdopodobieństwa kolizji statków powietrznych lecących przeciwległymi trasami o separacji poziomej mniejszej od docelowego poziomu bezpieczeństwa ICAO.

Znaczące odchylenia od wyznaczonej ścieżki lotu zdarzają się rzadko, a pierwiastek błędu średniokwadratowego pozycjonowania to pośredni wskaźnik bezpieczeństwa, ponieważ wskazuje on górną wartość graniczną prawdopodobieństwa kolizji [175]. Jednocześnie pierwiastek błędu średniokwadratowego pozycjonowania możemy stosunkowo prosto wykorzystać jako wskaźnik bezpieczeństwa – wystarczy w tym celu monitorować odchylenie między trajektorią rzeczywistą i planowaną.

$$F_k(x; \sigma) = A \exp(-a|x|^k),$$

gdzie k to waga.

Stała a określana jest z równania całkowitego prawdopodobieństwa jednostki:

$$A = \frac{1}{ka^k \left[2\Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \right]}.$$

Przez pierwiastek błędu średniokwadratowego pozycjonowania σ lub wariancję σ^2 , gdzie:

$$k = 1,$$

$$a = \frac{\sqrt{2}}{\sigma},$$

$$A = \frac{1}{(\sigma\sqrt{2})}.$$

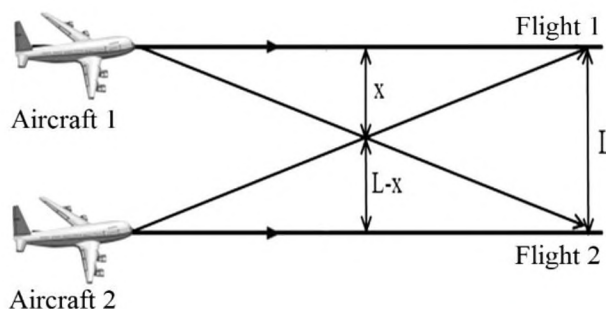
Prowadzi to do:

$$F_1(x; \sigma) = \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \right] \exp\left(-\sqrt{2} \frac{|x|}{\sigma}\right).$$

Dla statystycznie niezależnych odchyłeń statku powietrznego w pozycji x :

$$P_k(x; L, \sigma_1, \sigma_2) = F_k(x; \sigma_1)F_k(L-x; \sigma_2).$$

Przyjrzyjmy się dwóm samolotom lecącym równoległymi ścieżkami lotu o stałej poziomej separacji L (ilustracja 2.57). W scenariuszu tym samoloty mogą się w każdym momencie znaleźć w odległości mniejszej niż wyznaczone minimum separacyjne.



Aircraft	Samolot
Flight	Lot

Ilustracja 2.57. Pozioma separacja pomiędzy statkami powietrznymi [183]

Trasy lotu będą zbieżne, jeśli błędy pozycjonowania wyniosą x (samolot 1) i $L-x$ (samolot 2). Całka dla wszystkich pozycji wzdłuż linii łączącej oba samoloty:

$$\begin{aligned} Q_k(L; \sigma_1, \sigma_2) &= \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} P_k(x; L, \sigma_1, \sigma_2) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} F_k(x; \sigma_1)F_k(L-x; \sigma_2) dx. \end{aligned}$$

Prawdopodobieństwo kolizji ma wymiar odwrotnej długości. Docelowy poziom bezpieczeństwa ICAO (TLS) o wartości 5×10^{-9} na godzinę możemy przekonwertować na maksymalną prędkość lotu $V_0 = 625$ węzłów do ATLS.

Kryterium bezpieczeństwa to $\bar{Q}_0 = 5 \times 10^{-9}$. Górna granica dla $V_0 \leq 625$ węzłów, wynosi $Q \leq Q_0 = \frac{\bar{Q}_0}{V_0}$, co oznacza ATLS $8 \times 10^{-12} \text{ nm}^{-1}$.

Dla dwóch samolotów o różnych pierwiastkach błędu średniokwadratowego pozycjonowania rozkład prawdopodobieństwa kolizji wygląda następująco:

$$\begin{aligned} Q_0 \geq Q_1(L; \sigma_1, \sigma_2) &= \\ &= \left[\frac{1}{2\sigma_1\sigma_2} \right] \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\sqrt{2} \left(\frac{|x|}{\sigma_1} + \frac{|L-x|}{\sigma_2} \right)\right] dx. \end{aligned}$$

Wprowadzenie wartości bezwzględnej w argumencie funkcji wykładniczej wymaga podziału zakresu całkowania $-\infty; +\infty$ na trzy części.

1. Ścieżki lotów pomiędzy dwoma samolotami przy $0 \leq x \leq L$ to:

$$\begin{aligned}
2\sigma_1\sigma_2Q_{11} &= \int_0^L \exp\left[-\sqrt{2}\left(\frac{x}{\sigma_1} + \frac{(L-x)}{\sigma_2}\right)\right] dx = \\
&= \exp\left(\frac{-\sqrt{2}}{\sigma_2}\right) \int_0^L \exp\left[-\sqrt{2}x\left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2}\right)\right] dx
\end{aligned}$$

i obejmuje całkowanie:

$$\begin{aligned}
2\sigma_1\sigma_2Q_{11} &= \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) \times \\
&\times \left\{1 - \exp\left[-\sqrt{2}L\left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2}\right)\right]\right\} \left[\sqrt{2}\left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2}\right)\right]^{-1},
\end{aligned}$$

a upraszcza się do:

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= [2\sqrt{2}(\sigma_2 - \sigma_1)]^{-1} \times \\
&\times \left[\exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) - \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_1}\right) \right].
\end{aligned}$$

2. Pozostałe składniki w punkcie $x \geq L$ poza ścieżką lotu drugiego samolotu:

$$2\sigma_1\sigma_2Q_{12} = \int_L^\infty \exp\left\{-\sqrt{2}\left[\frac{x}{\sigma_1} + \frac{x-L}{\sigma_2}\right]\right\} dx$$

co prowadzi do całki:

$$\begin{aligned}
2\sigma_1\sigma_2Q_{12} &= \\
&= \exp\left(\frac{\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) \int_L^\infty \exp\left\{-\sqrt{2}x\left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)\right\} dx = \\
&= \exp\left(\frac{\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) \left[\sqrt{2}\left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)\right]^{-1} \exp\left[-\sqrt{2}L\left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)\right]
\end{aligned}$$

która upraszcza się do:

$$Q_{12} = [2\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2)]^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_1}\right).$$

3. Zbieżność $-\infty < x < 0$ poza ścieżką lotu pierwszego samolotu:

$$\begin{aligned}
2\sigma_1\sigma_2Q_{13} &= \\
&= \int_{-\infty}^0 \exp\left\{\sqrt{2}\left[\frac{x}{\sigma_1} - \frac{(L-x)}{\sigma_2}\right]\right\} dx = \\
&= \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) \int_0^\infty \exp\left\{-\sqrt{2}x\left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)\right\} dx
\end{aligned}$$

wówczas

$$Q_{13} = [2\sqrt{2}(\sigma_2 + \sigma_1)]^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right).$$

Suma Q_{11}, Q_{12}, Q_{13} , gdzie:

$$\begin{aligned} Q_1(L; \sigma_1, \sigma_2) &= [2\sqrt{2}(\sigma_2 - \sigma_1)]^{-1} \times \\ &\times \left[\exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) - \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_1}\right) \right] + \\ &+ [2\sqrt{2}(\sigma_2 + \sigma_1)]^{-1} \left[\exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_1}\right) + \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma_2}\right) \right] \end{aligned}$$

dla rozkładu:

$$Q_1(L; \sigma_1, \sigma_2) = Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} \leq Q_0 = 8 \times 10^{-12} \text{ nm}.$$

Powyższe kryteria bezpieczeństwa stosowane są dla separacji poziomej w kontrolowanej przestrzeni powietrznej, dopuszczającej standardową i zmniejszoną separację.

Standardowe odchylenie dla VOR/DME wynosi 0,3 NM. Nawigacja satelitarna zapewnia dużą dokładność utrzymania ścieżki poziomej.

Porównajmy prawdopodobieństwo kolizji dla separacji poziomej w 5, 4, 3 nm w kontrolowanej przestrzeni powietrznej, z prawdopodobieństwem kolizji ATLS na milę morską w kontrolowanej przestrzeni powietrznej dla $\sigma_1, \sigma_2 \leq 0,3$ nm.

Pierwiastki średniokwadratowego błędu pozycjonowania dla obu samolotów to $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$.

1. Ścieżki lotu pomiędzy dwoma samolotami, jeśli $0 \leq x \leq L$:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= (2\sigma^2)^{-1} \int_0^L \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right) dx = \\ &= \left[\frac{L}{2\sigma^2} \right] \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right). \end{aligned}$$

2. Pozostałe składniki w punkcie $x \geq L$ poza ścieżką lotu drugiego samolotu:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{12} &= (2\sigma^2)^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right) \int_L^\infty \exp\left(-2\frac{\sqrt{2}x}{\sigma}\right) dx = \\ &= (4\sqrt{2}\sigma)^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right). \end{aligned}$$

3. Zbieżność $-\infty < x < 0$ poza ścieżką lotu pierwszego samolotu

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{13} &= (2\sigma^2)^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right) \int_{-\infty}^0 \exp\left(-2\frac{\sqrt{2}x}{\sigma}\right) dx = \\ &= (4\sqrt{2}\sigma)^{-1} \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right). \end{aligned}$$

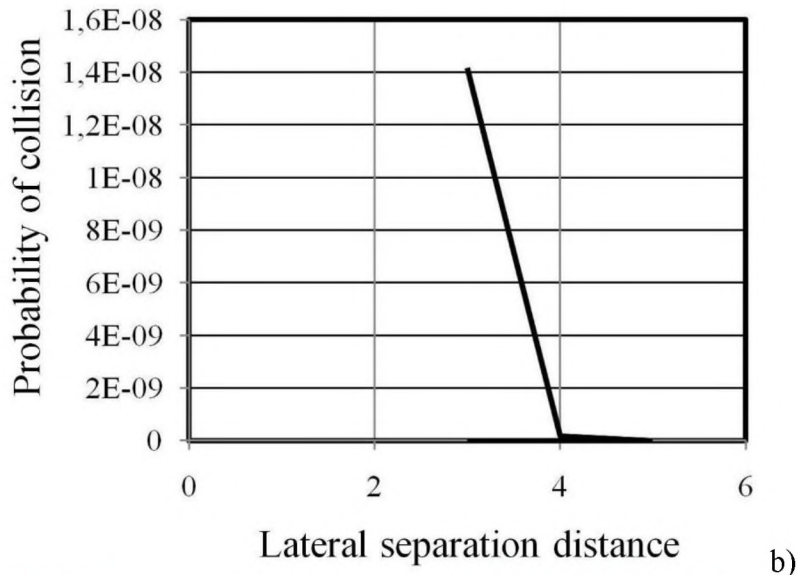
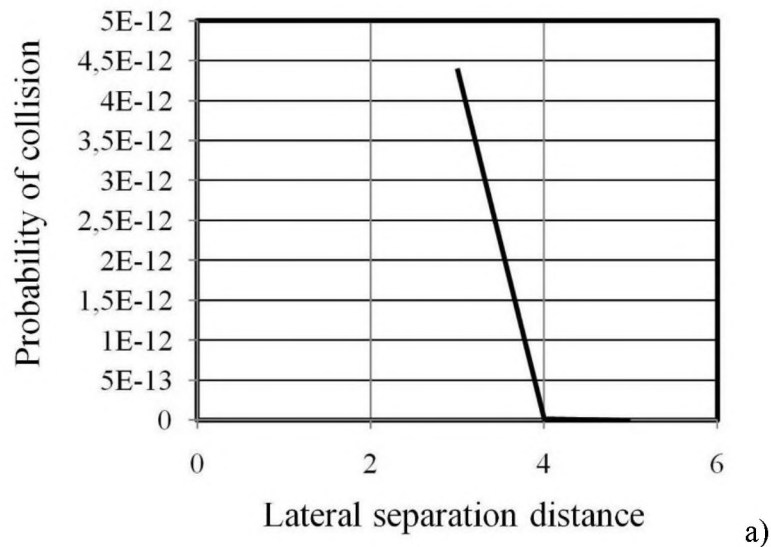
Suma uściśla:

$$Q_1(L; \sigma) = \exp\left(\frac{-\sqrt{2}L}{\sigma}\right) (2\sigma)^{-1} \left(\frac{L}{\sigma} + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$$

kryterium bezpieczeństwa:

$$Q_1(L; \sigma) = \bar{Q}_{11} + \bar{Q}_{12} + \bar{Q}_{13} \leq Q_0 = 8 \times 10^{-12} \text{ nm}^{-1}.$$

Prawdopodobieństwo kolizji dla $L < 4$ nm przekracza docelowy poziom bezpieczeństwa ICAO, zarówno w przypadku różnych (ilustracja 2.58a), jak i równych (ilustracja 2.58b) pierwiastków średniokwadratowego błędu pozycjonowania.



Probability of collision	Prawdopodobieństwo kolizji
Lateral separation distance	Separacja pozioma

Ilustracja 2.58. Separacja pozioma i prawdopodobieństwo kolizji statków powietrznych [183]

Oznacza to, że aby możliwe było zmniejszenie minimum separacyjnego, pomoce nawigacyjne powinny działać z dokładnością zapewniającą pierwiastek średniokwadratowego błędu pozycjonowania odchylenia ścieżki lotu o wartości $\sigma < 0.3$ nm.

Standardy bezpieczeństwa ICAO wymagają, by prawdopodobieństwo kolizji w powietrzu było rzędu 5×10^{-9} na godzinę. W przypadku statków powietrznych lecących trasami równoległymi w przeciwnych kierunkach, jeśli pierwiastek średniokwadratowego błędu pozycjonowania będzie miał wartość mniejszą niż jedna dziesiąta minimum separacyjnego, prawdopodobieństwo kolizji będzie niższe od docelowego poziomu bezpieczeństwa ICAO.

Standardowe odchylenie dla VOR/DME nie pozwoli na utrzymanie bezpiecznej separacji poziomej, jeśli jego wartość będzie niższa niż 5 nm. Największą dokładność utrzymania poziomej ścieżki lotu zapewniają systemy nawigacji satelitarnej. Zatem wdrożenie dokładniejszych procedur nawigacyjnych pozwoli na zmniejszenie minimów separacyjnych i poprawę przepustowości przestrzeni powietrznej [183].

2.3.6. Modelowanie działania pokładowego systemu zapobiegania kolizjom

W styczniu 2005 r. weszły w życie wymogi ICAO dotyczące instalowania pokładowych systemów zapobiegania kolizjom (Airborne Collision Avoidance System) ACAS-II we wszystkich cywilnych statkach powietrznych o nieruchomych płatach nośnych (stałopłatach) o maksymalnej certyfikowanej masie startowej przekraczającej 5700 kg lub z homologacją na przewóz więcej niż 19 pasażerów [186, 189, 190].

W rezultacie liczba statków powietrznych wyposażonych w system ACAS-II znacząco wzrosła. Zestaw urządzeń ACAS-II, znany jako TCAS II (Traffic Alert and Collision Avoidance System) to narzędzie bezpieczeństwa przeznaczone do zapobiegania zderzeniom statków powietrznych. By w pełni wykorzystać możliwości TCAS II, piloci muszą dokładnie i szybko wykonywać rekomendowane przez system propozycje rozwiązania sytuacji (Resolution Advisory, RA), zgodnie z instrukcjami zawartymi w materiałach szkoleniowych ACAS.

Obserwacja i analiza działania pokładowego systemu ostrzegania i zapobiegania kolizjom w czasie rzeczywistym to bardzo istotny element szkolenia kontrolerów ruchu lotniczego i mechaników lotniczych.

TCAS II to autonomiczny pokładowy system zapobiegania kolizjom [191, 192, 193].

System TCAS II powinien pozostawać włączony we wszystkich rejonach przestrzeni powietrznej, w których jego zastosowanie jest obowiązkowe. Aktywny TCAS stanowi dodatkowe narzędzie unikania zderzeń z innymi statkami powietrznymi wyposażonymi w sprawne transpondery działające w trybie S. Nie zapewnia jednak pełnej ochrony, jeśli transpondery nie spełniają standardów ICAO. System utrzymuje bezpieczne separacje statków powietrznych, których trajektorie wskazują prawdopodobieństwo zderzenia, minimalizując jednocześnie odchylenie od kursu proponowanego przez służby kontroli ruchu lotniczego.

TCAS II prowadzi stałą obserwację przestrzeni wokół własnego statku powietrznego, nadając aktywne zapytania i odbierając odpowiedzi od transponderów innych statków powietrznych znajdujących się w pobliżu.

System odczytuje odpowiedzi od transponderów statków powietrznych działających w trybach A,C i S ICAO, i na ich podstawie określa odległość od innych statków powietrznych, ich namiary oraz wysokość. Na podstawie tych informacji TCAS II przewiduje ich trajektorie, szacuje odległość w obszarach największego zbliżenia, a także ustala, czy istnieje zagrożenie zderzenia. W

przypadku wykrycia takiego zagrożenia system wysyła instrukcje optymalnych manewrów w płaszczyźnie pionowej, które pozwolą zapobiec kolizji.

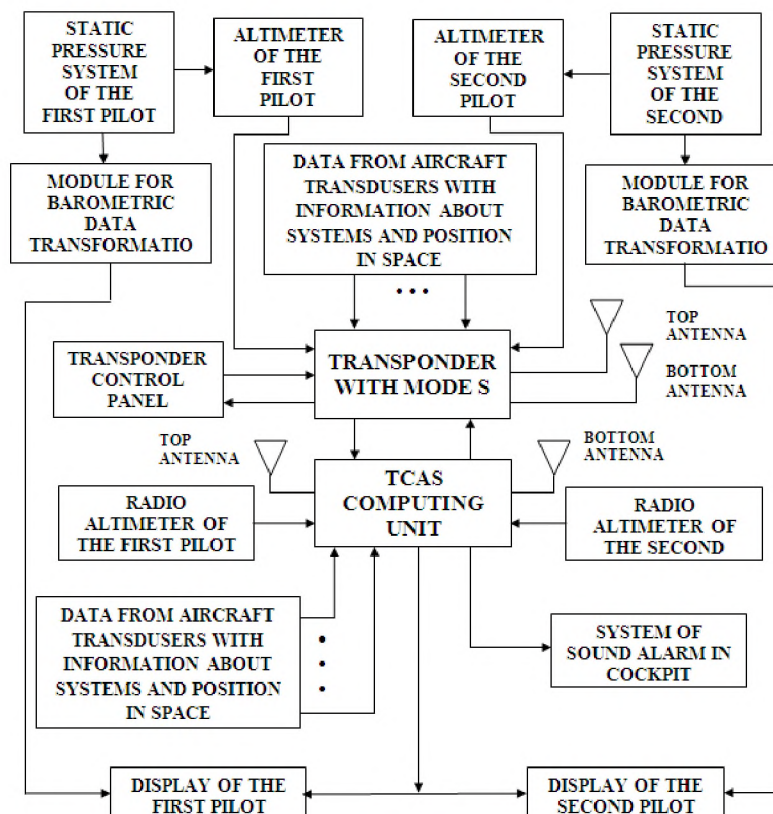
TCAS odbiera również sygnały od innych systemów na pokładzie własnego statku powietrznego i gromadzi informacje na temat ich stanu. Informacje te uwzględniane są podczas analizy sytuacji konfliktowych.

System działa w przestrzeni ochronnej wokół statku powietrznego, nazywanej „strefą kolizji”.

Ponieważ TCAS działa na zasadzie obliczania czasu, jaki pozostał do potencjalnej kolizji, wielkość i kształt strefy kolizji mogą być różne, w zależności od prędkości zbliżania się statku powietrznego na kursie kolizyjnym i jego położenia. Jeśli trajektoria tego statku powietrznego przechodzi przez strefę kolizji statku powietrznego wyposażonego w TCAS II, system informuje pilotów o takim zdarzeniu za pomocą sygnałów wizualnych i dźwiękowych. ACAS II może wysyłać dwa typy sygnałów – ostrzeżenia na temat otoczenia (Traffic Advisory, TA) oraz rekomendacje działań służących wyeliminowaniu zagrożenia (Resolution Advisory, RA). Celem tych komunikatów jest utrzymanie lub zwiększenie separacji koniecznej dla uniknięcia zderzenia z innym statkiem powietrznym.

W celu zapobiegania wypadkom system TCAS II może monitorować ruch nawet 50 statków powietrznych, które mogą się znaleźć w strefie kolizji.

TCAS II składa się z kilku anten umieszczonych na statku powietrznym, jednostki obliczeniowej, transpondera działającego w trybie S, wskaźników oraz panelu sterowania zainstalowanego w kokpicie. Ilustracja 2.59 przedstawia schemat systemu.



SYSTEM CIŚNIENIA STATYCZNEGO PIERWSZEGO PILOTA	WYSOKOŚCIOMIERZ PIERWSZEGO PILOTA	WYSOKOŚCIOMIERZ DRUGIEGO PILOTA	SYSTEM CIŚNIENIA STATYCZNEGO DRUGIEGO PILOTA
MODUŁ DO TRANSFORMACJI DANYCH BAROMETRYCZNYCH	DANE Z PRZETWORNIKÓW POKŁADOWYCH ZAWIERAJĄCE INFORMACJE NA TEMAT SYSTEMÓW I		MODUŁ DO TRANSFORMACJI DANYCH BAROMETRYCZNYCH

	POZYCJI W PRZESTRZENI	
PANEL STEROWANIA TRANSPONDERA	TRANSPONDER W TRYBIE S	ANTENA GÓRNA ANTENA DOLNA
ANTENA GÓRNA	JEDNOSTKA OBLICZENIOWA TCAS	ANTENA DOLNA
WYSOKOŚCIOMIERZ RADIOWY PIERWSZEGO PILOTA		WYSOKOŚCIOMIERZ RADIOWY DRUGIEGO PILOTA
DANE Z PRZETWORNIKÓW POKŁADOWYCH ZAWIERAJĄCE INFORMACJE NA TEMAT SYSTEMÓW I POZYCJI W PRZESTRZENI	SYSTEM ALARMÓW DŹWIĘKOWYCH W KOKPICIE	
MONITOR PIERWSZEGO PILOTA	MONITOR DRUGIEGO PILOTA	

Ilustracja 2.59. System TCAS [195]

Jednostka obliczeniowa TCAS II odbiera dane od instrumentów pokładowych (wysokość radiową i barometryczną; czy statek powietrzny znajduje się na ziemi, czy w powietrzu, a także czy podwozie zostało wysunięte). Jednostka wysyła również zapytania do transponderów innych statków powietrznych, określa ich lokalizację i śledzi ich trajektorie; wyświetla na monitorze ostrzeżenia i rekomendacje, a także nadaje wiadomości dźwiękowe dla pilota przez system komunikacyjny zamontowany w kokpicie. Jednostka obliczeniowa to najważniejszy element systemu TCAS II.

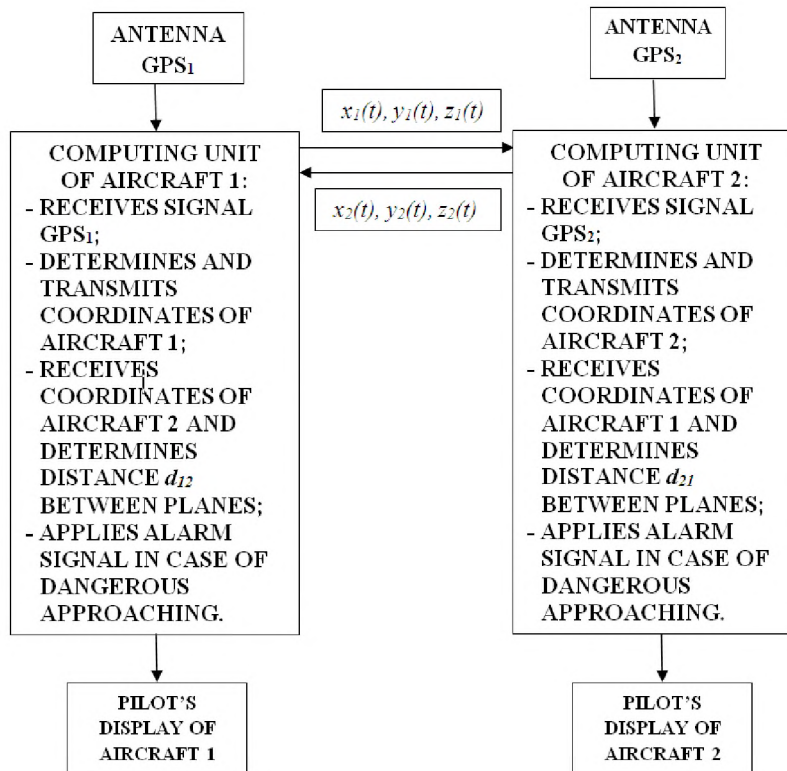
Innym ważnym elementem jest transponder działający w trybie S, który odpowiada na zapytania wysyłane przez radary kontroli lotów w trybie A, C i S, a także przez inne statki powietrzne wyposażone w TCAS. Każdy statek powietrzny dysponujący transponderem w trybie S ma unikalny adres ICAO, umożliwiając bezpośrednią wymianę danych pomiędzy kompatybilnymi systemami. Symulacja działania TCAS II została przedstawiona w pracy [178], wraz z warunkami, w których system gwarantuje odpowiednią separację pionową statków powietrznych w sytuacji zagrożenia kolizją.

Celem niniejszego rozdziału jest stworzenie oprogramowania umożliwiającego modelowanie działania pokładowego systemu zapobiegania kolizjom w czasie rzeczywistym i zbudowanie eksperymentalnego modelu umożliwiającego wymianę danych pomiędzy systemami pokładowymi.

Struktura modelu ACAS II/TCAS II

By przeprowadzić symulację działania pokładowego systemu zapobiegania kolizjom w czasie rzeczywistym, wykorzystano środowisko programowania MATLAB. Model systemu TCAS przedstawiony został na ilustracji 2.60.

ANTENA GPS 1	ANTENA GPS 2
JEDNOSTKA OBLICZENIOWA STATKU POWIETRZNEGO 1: – ODBIERA SYGNAŁ GPS1; – WYZNACZA I NADAJE WSPÓŁRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 1; – ODBIERA WSPÓŁRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 2 I OKREŚLA ODLEGŁOŚĆ d_{12} POMIĘDZY OBIEMA MASZYNAMI; – WYSYŁA SYGNAŁY ALARMOWE WPRZYPADKU NIEBEZPIECZNEGO ZBLIŻENIA	JEDNOSTKA OBLICZENIOWA STATKU POWIETRZNEGO 2: – ODBIERA SYGNAŁ GPS2; – WYZNACZA I NADAJE WSPÓŁRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 2; – ODBIERA WSPÓŁRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 1 I OKREŚLA ODLEGŁOŚĆ d_{21} POMIĘDZY OBOMA MASZYNAMI; – WYSYŁA SYGNAŁY ALARMOWE WPRZYPADKU NIEBEZPIECZNEGO ZBLIŻENIA
MONITOR PILOTA STATKU POWIETRZNEGO 1	MONITOR PILOTA STATKU POWIETRZNEGO 2



Ilustracja 2.60. Model systemu TCAS [195]

Pozycja statku powietrznego wyznaczana jest przez jednostkę obliczeniową na podstawie danych z odbiornika GPS.

Podczas względnego ruchu statków powietrznych ich jednostki obliczeniowe nieprzerwanie w czasie rzeczywistym wyznaczają odległość względną między nimi i porównują ją z dopuszczalną odległością minimalną.

Podstawą algorytmu jednostki obliczeniowej był format danych amerykańskiego Narodowego Stowarzyszenia Przemysłu Elektroniki Morskiej (NMEA). Najważniejszym elementem algorytmu jest informacja na temat pozycji 3D statku powietrznego, zawarta w zdaniu GGA [188]. Przykładowe zdanie GGA to:

\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.000,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,*47

gdzie: GGA Pozycja według systemu GPS

123519 Pozycja zanotowana o 12:35:19 UTC

4807.038,N Szerokość geograficzna 48° 07.038' N

01131.000,E Długość geograficzna 11° 31.000' E 1

Cechy pozycji: 0 = nieważna

1 = pozycja GPS (SPS)

2 = pozycja DGPS

3 = pozycja PPS

4 = kinematyka w czasie rzeczywistym

5 = dryf RTK

6 = pozycja szacunkowa (nawigacja zliczeniowa) (funkcja 2.3)

7 = wprowadzane ręcznie

8 = tryb symulacji

- 08 – Liczba śledzonych satelitów
- 0.9 – Poziome rozmycie pozycji
- 545.4,M – Wysokość, metry nad poziomem morza
- 46.9,M – wysokość geoidy (średni poziom morza) powyżej elipsoidy WGS84
- (puste pole) – czas w sekundach od ostatniej aktualizacji DGPS
- (puste pole) – numer identyfikacyjny stacji DGPS
- *47 – suma kontrolna, zawsze zaczyna się od *.

Odległość między statkami powietrznymi oblicza się z użyciem twierdzenia Pitagorasa, które uwzględnia wysokość każdego ze statków powietrznych oraz odległość między nimi na ziemi. Odległość od powierzchni ziemi została obliczona z wykorzystaniem tzw. formuły haversine [184]:

$$a = \sin^2(\Delta lat/2) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \sin^2(\Delta long/2)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}), d = R \cdot c,$$

gdzie R to promień Ziemi (6,371 km), a eliptyczność Ziemi nie została uwzględniona.

Rezultatem działania pokładowych jednostek obliczeniowych są sygnały ostrzegawcze wyświetlane na monitorach, informujące o sytuacji krytycznej (ilustracja 3), kiedy względna odległość pomiędzy statkami powietrznymi spada poniżej dopuszczalnego minimum.

Symulacja zbliżania się statku powietrznego

Model ACAS / TCAS (ilustracja 2.61) wykorzystano podczas zajęć laboratoryjnych na dwóch komputerach dokonujących wymiany danych w czasie rzeczywistym zgodnie z zaprogramowanymi wcześniej algorytmami w środowisku MATLAB poprzez sieć Wi-Fi [194].

Dla celów symulacji zmodyfikowano ruch względny modelowanych statków powietrznych (ilustracja 2.62).

Do jednego z komputerów podłączono nawigator GPS eTrex poprzez port COM [GARMIN...].

~~~~~  
**WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 1**  
**CZAS ODBIORNIKA GPS**  
**SZEROKOŚĆ GEOGRAFICZNA**  
**DŁUGOŚĆ GEOGRAFICZNA**  
**WYSOKOŚĆ**

~~~~~  
WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 2
CZAS ODBIORNIKA GPS
SZEROKOŚĆ GEOGRAFICZNA
DŁUGOŚĆ GEOGRAFICZNA
WYSOKOŚĆ

~~~~~  
**ODLEGŁOŚĆ POMIĘDZY STATKAMI POWIETRZNYMI**  
 ~~~~~

UWAGA!

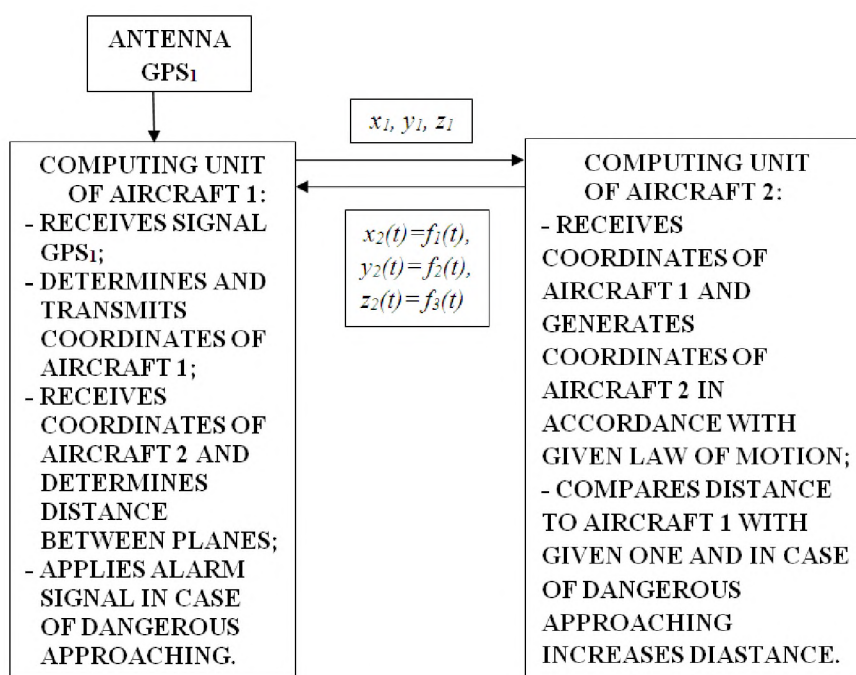
OSIĄGNIĘTO ODLEGŁOŚĆ KRYTYCZNĄ!

Ilustracja 2.61. Interfejs jednostki obliczeniowej [195]

Przez ten port przesłano dane od nawigatora do jednostki obliczeniowej 1, która wyznaczyła swoje współrzędne x_1, y_1, z_1 .

Współrzędne zostały następnie nadane w czasie rzeczywistym do drugiego komputera, w którym jednostka obliczeniowa statku powietrznego 2 określiła własne współrzędne, zgodnie z ustalonymi zasadami, imitując ruch statku powietrznego 2 względem statku powietrznego 1.

<p>ANTENA GPS 1</p> <p>JEDNOSTKA OBLICZENIOWA STATKU POWIETRZNEGO 1:</p> <p>POWIETRZNEGO 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ODBIERA SYGNAŁ GPS 1; - WYZNACZA I NADAJE WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 1; - ODBIERA WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 2 I OKREŚLA ODLEGŁOŚĆ MIĘDZY STATKAMI POWIETRZNYMI; - WYSYŁA OSTRZEŻENIE W PRZYPADKU NIEBEZPIECZNEGO ZBLIŻENIA. 	<p>JEDNOSTKA OBLICZENIOWA STATKU POWIETRZNEGO 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ODBIERA WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 1 I GENERUJE WSPÓLRZĘDNE STATKU POWIETRZNEGO 2 ZGODNIE Z DANymi ZASADAMI RUCHU; - PORÓWNUJE ODLEGŁOŚĆ OD STATKU POWIETRZNEGO 1 Z PODANĄ ODLEGŁOŚCIĄ I W PRZYPADKU NADMIERNEGO ZBLIŻENIA, ZWIĘKSZA ODSTĘP.
---	--



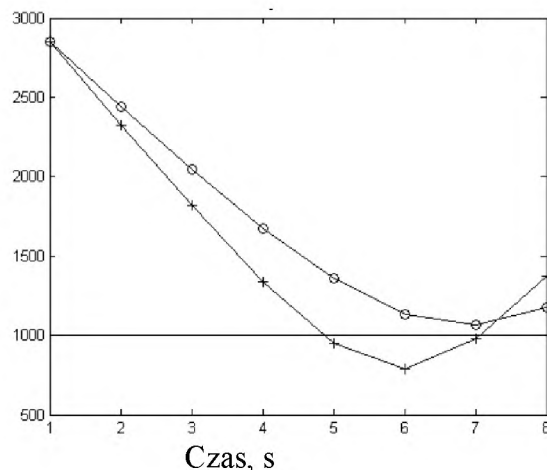
Ilustracja 2.62. Schemat symulacji zbliżania się statku powietrznego [195]

Zmiany współrzędnych statku powietrznego w czasie były na bieżąco transmitowane przez Wi-Fi w jednostce obliczeniowej statku powietrznego 1. Obie jednostki stale analizowały odległość pomiędzy statkami powietrznymi i wysyłały ostrzeżenia w przypadku osiągnięcia ustalonego wcześniej minimum.

Po ostrzeżeniu algorytm jednostki obliczeniowej statku powietrznego 2 zmienił zasady ruchu statku powietrznego 2 i oba statki powietrzne zaczęły oddalać się od siebie, by uniknąć kolizji.

Rezultaty symulacji zbliżania się statków powietrznych przy różnych prędkościach zostały przedstawione na ilustracji 2.63.

Odległość między statkami powietrznymi, m



Ilustracja 2.63. Zależność pomiędzy odległością między dwoma statkami powietrznymi a czasem [195]: krzywa oznaczona kółkami ilustruje prędkość zbliżania 412 m/s (1484 km/h), a oznaczona krzyżykami – 526 m/s (1893 km/h)

Dwa statki powietrzne oddalone od siebie o 2900 m zaczynają się do siebie zbliżać najkrótszą istniejącą ścieżką. Linia pozioma pokazuje, przy jakiej odległości jednostka obliczeniowa wysła ostrzeżenie o zagrożeniu. Przy mniejszej prędkości zbliżania system „rozdziela” statki powietrzne bez wysyłania ostrzeżenia, a przy większej prędkości ostrzega pilotów i statki powietrzne oddalają się od siebie. Jeśli założymy, że współrzędne nie są aktualizowane co sekundę, lecz co dziesięć sekund, krzywe na ilustracji 2.63 będą pokazywać dziesięć razy mniejsze prędkości zbliżania się statków powietrznych. Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku bezzałogowych systemów latających.

Do modelowania działania TCAS w czasie rzeczywistym stworzono oryginalne oprogramowanie w środowisku MATLAB.

Zbudowano eksperymentalny model umożliwiający wymianę danych pomiędzy systemami pokładowymi przez sieć Wi-Fi.

Model wykorzystano do symulacji zbliżania się statków powietrznych.

Model może służyć również jako podstawa podczas tworzenia systemów zapobiegania kolizjom bezzałogowych statków powietrznych [195] (patrz także rozdział 4).

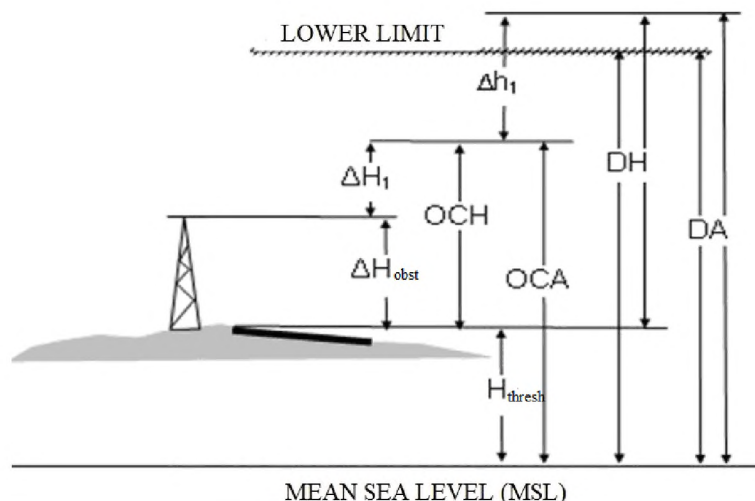
2.3.7. Ocena dopuszczalnego zakresu odchyłek poziomych statku powietrznego podczas fazy podejścia do lądowania

Analiza wypadków lotniczych w skali światowej wskazuje, że 40–50% z nich zdarza się podczas fazy podejścia do lądowania i lądowania. Podejście zajmuje ok. 2–3% czasu całego lotu, a prawdopodobieństwo wypadku w tej fazie jest 15–20 razy wyższe, niż średnie prawdopodobieństwo w czasie całego lotu [197].

Grupa czynników, które mają wpływ na wybór systemu lądowania (warunki meteorologiczne, częstotliwość startów i lądowań, koszt startu i lądowania), decyduje również o tym, na jakiej wysokości pilot musi podjąć decyzję o kontynuacji podejścia do lądowania lub o rozpoczęciu procedury nieudanego podejścia, na przykład jeśli nie widzi drogi startowej lub też nie uda mu się właściwie ustabilizować statku powietrznego na ścieżce podejścia.

Według Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) głównym parametrem fazy podejścia do lądowania jest OCH/A, uwzględniająca wpływ wszystkich czynników operacyjnych. OCH/A definiowana jest jako najniższa wysokość, na której statek powietrzny musi

rozpocząć lądowanie lub procedurę przejścia na drugie okążenie, by zapewnić działanie zgodne z kryteriami przewyższeń nad przeszkodami i utrzymać minimalną wysokość rezerwową (ilustracja 2.64) [200, 201].



LOWER LIMIT	DOLNA GRANICA
MEAN SEA LEVEL	ŚREDNI POZIOM MORZA

Ilustracja 2.64. Relacja między OCA/H i DA/H [202]

Kiedy systemy dokładności lądowania wykorzystują:

ΔH_{obst} – podejście przez strefę najwyższej przeszkody lub odpowiednik najwyższej przeszkody w obszarze nieudanego podejścia;

ΔH_1 – rezerwę wysokości;

Δh_1 – wysokość rezerwową lub dolną granicę lotu.

Rezerwa wysokości ΔH_1 zależy od prędkości, z jaką ląduje statek powietrzny, obniżenia poziomu podczas przejścia na drugie okążenie, a także dokładności pomiaru wysokości oraz korekt wymaganych w przypadku stromej ścieżki zejścia i lotnisk położonych na dużych wysokościach. Z kolei, wysokość rezerwowa Δh_1 ustalana jest na podstawie aspektów operacyjnych, takich jak:

- kategoria statku powietrznego;
 - charakterystyka wyposażenia pokładowego / naziemnego;
 - kwalifikacje załogi;
 - osiągi statku powietrznego;
 - warunki pogodowe;
 - poziom położenia lądowiska w przypadku użycia wysokościomierza radiowego;
- dokładność pomiaru ciśnienia w przypadku użycia wysokościomierza barometrycznego.

Zgodnie z regulacjami ICAO w pewnych warunkach meteorologicznych wprowadza się ograniczenia w ruchu lotniczym, by utrzymać wymagany poziom bezpieczeństwa [198]. Minima operacyjne lotnisk wyrażane są zazwyczaj przez takie wskaźniki jak widzialność wzdłuż drogi startowej (RVR) i minimalna wysokość zniżania (MDA/H), w przypadku podejścia nieprecyzyjnego, lub wysokość decyzji (DA/H), w przypadku podejścia precyzyjnego, oraz próg widzialności i widzialność wzdłuż drogi startowej, jeśli pilot wykorzystuje narzędzia nawigacji pionowej (VNAV).

Minimum meteorologiczne (nieuwzględniające poziomu umiejętności załogi) zależy od dwóch głównych czynników:

- precyzji lotu wzdłuż założonej trajektorii, zapewnianej przez odpowiednie pomoce nawigacyjne;
- elastyczności manewrów służących wyeliminowaniu błędu podczas podejścia po zauważeniu punktu orientacyjnego i drogi startowej [198].

Widzialność to aspekt decydujący o dalszym działaniu, jakie podejmuje pilot na wysokości DA/H lub MDA/H i poniżej, by wykonać lądowanie.

Wysokość decyzji (DH) to wysokość bezwzględna lub względna przy podejściu precyzyjnym, na której pilot musi rozpocząć przejście na drugie okrążenie, jeśli nie ma wymaganego kontaktu wzrokowego z wyznaczonym punktem orientacyjnym, niezbędnego do kontynuacji podejścia do lądowania.

Wymagany kontakt wzrokowy z punktami orientacyjnymi oznacza widoczność wyznaczonych elementów strefy podejścia przez okres wystarczający do oceny położenia statku powietrznego przez pilota i prędkości przemieszczania wzdłuż nominalnej trajektorii [196, 201].

Statki powietrzne zazwyczaj lecą z lekkim odchyleniem od nominalnej trajektorii lądowania w momencie przejścia do lotu z widocznością – ich kurs jest nieco odchyłony względem drogi startowej, a wysokość nie zawsze w pełni zgodna ze ścieżką zejścia. Te odchylenia można skorygować odpowiednimi manewrami nawet po przekroczeniu minimum decyzyjnego [198].

Celem niniejszego rozdziału jest ocena maksymalnych odchyłeń poziomych statku powietrznego od trajektorii lądowania, przy których statek powietrzny może skutecznie i bezpiecznie zakończyć całą procedurę.

Ocena dopuszczalnych odchyłeń poziomych statku powietrznego

Udane lądowanie zależy od zakresu poziomych odchyłeń i dokładności stabilizacji statku powietrznego na trajektorii lądowania. W momencie przejścia do lotu z widocznością statek powietrzny może się znajdować poza wyznaczoną trajektorią lądowania, w związku z czym załoga musi wykonać określone manewry korekcyjne, by wylądować bezpiecznie na drodze startowej. Punkt przejścia do lotu z widocznością to jednocześnie punkt rozpoczęcia manewrów korekcyjnych koniecznych do udanego lądowania, które możemy uznać za operację przemieszczenia statku powietrznego przez określone sektory obszaru M, stanowiącego przestrzeń dopuszczalnych odchyłeń poziomych statku powietrznego.

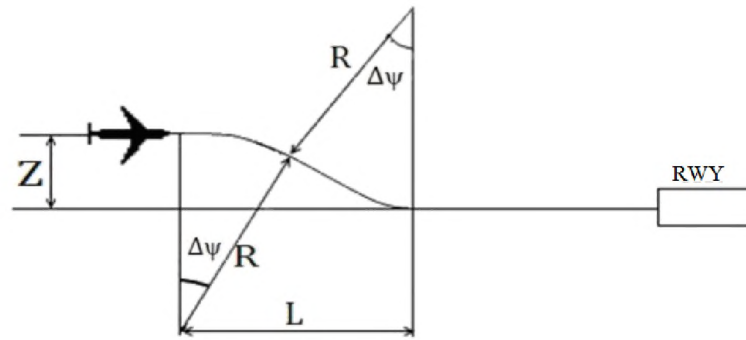
$$M = (\pm z_{\max}, \pm H_{\max}).$$

Granice obszaru M wyznaczone są przez maksymalne dopuszczalne odchylenie poziome – z_{\max} oraz pionowe – H_{\max} statku powietrznego od wyznaczonej trajektorii lądowania.

W płaszczyźnie poziomej odchylenia statku powietrznego od trajektorii lądowania obejmują odchylenia poziome (od wyznaczonego kursu) oraz odchylenia kątowe (odchylenia wektora prędkości względem ziemi od kierunku lądowania).

Odchylenia poziome statku powietrznego od trajektorii lądowania, których skorygowanie wymaga dłuższego czasu, mają znacznie większe znaczenie niż odchylenia pionowe. Manewry poziome wykonywane są podczas zniżania się samolotu wzdłuż wyznaczonej ścieżki schodzenia i muszą zostać zakończone na minimalnej wysokości decyzji dotyczącej ewentualnego przejścia na drugie okrążenie.

Korekta odchyłeń poziomych od wyznaczonej trajektorii oznacza wykonanie manewru złożonego z dwóch połączonych zwrotów. Podczas manewru korygującego odchylenie Z statek powietrzny pokonuje odległość L, wykonując dwa dodatkowe zwroty pod kątem $\Delta\psi$ (ilustracja 2.65).



Ilustracja 2.65. Odchylenie poziome od trajektorii lądowania [202]

Stąd

$$Z = 2R(1 - \cos \Delta\psi) ;$$

$L = 2R \sin \Delta\psi \approx 2R\Delta\psi$, gdzie R to promień zakrętu pokonywanego w ramach skoordynowanego zwrotu:

$$R = \frac{V^2}{g\gamma} .$$

Wartość odchylenia kąтового $\Delta\psi$ wynosi

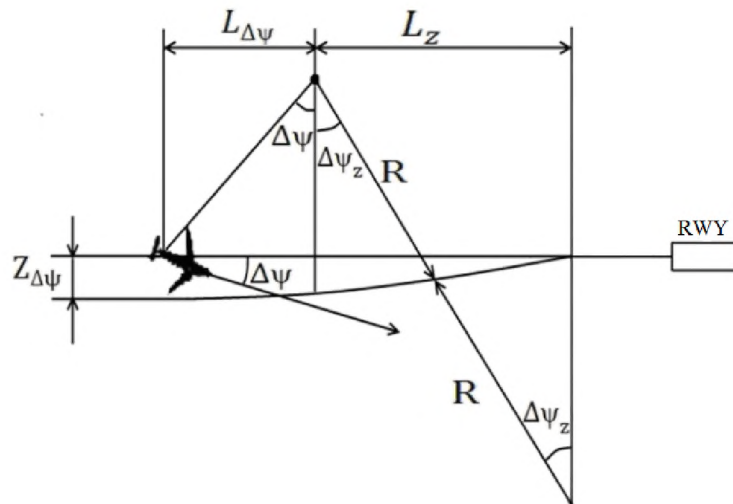
$$\Delta\psi = \frac{L}{2R} .$$

Zatem

$$Z = 2R \left(1 - \cos \frac{L}{2R}\right) ;$$

$$Z = \frac{2V^2}{g\gamma} \left(1 - \cos \frac{Lg\gamma}{2V^2}\right).$$

Najważniejszym zadaniem jest określenie wartości dopuszczalnych odchyżeń poziomych w punkcie minimalnym, które mogą zostać skorygowane przed osiągnięciem przez statek powietrzny punktu zakończenia manewrów. Oczywiście, w najgorszym przypadku statek powietrzny będzie miał odchylenie kątowe i będzie oddalał się od trajektorii lądowania, zwiększając ogólne odchylenie poziome. W takim przypadku trajektorię lotu statku powietrznego możemy przedstawić jako obszar zwrotu pod kątem $\Delta\psi$ i obszar zwrotu dodatkowego (ilustracja 2.66).



Ilustracja 2.66. Odchylenie kątowe od planowanej trajektorii lądowania [202]

W obliczeniach dopuszczalnego odchylenia statku powietrznego od trajektorii lądowania zakładamy, że manewry w płaszczyźnie poziomej wykonywane są podczas zniżania statku powietrznego wzdłuż wyznaczonej ścieżki schodzenia. Manewry muszą się zakończyć przed osiągnięciem przez statek powietrzny progu drogi startowej.

W punkcie zakończenia manewrów statek powietrzny nie powinien mieć żadnych odchyżeń wektora prędkości względem ziemi od trajektorii lądowania. By osiągnąć kurs lądowania, gdzie $\Delta = 0$, $Z = 0$, statek powietrzny powinien wykonać manewr złożony z dwóch elementów: zwrotu pod kątem $\Delta\psi$, po którym $\Delta\psi = 0$, $Z = Z_{\Delta\psi}$, oraz podwójnego zwrotu dodatkowego.

Statek powietrzny porusza się w kierunku lądowania i pokonuje odległość L_{man} , którą dzielimy na dwa odcinki:

$$L_{\text{man}} = L_{\Delta\psi} + L_z.$$

Odległość wykonywania manewrów korygujących odchylenie kątowe pod kątem $L_{\Delta\psi_0}$ definiujemy jako:

$$L_{\Delta\psi_0} = R \times \Delta\psi,$$

a L_z :

$$L_z = 2 R \times \Delta\psi_z.$$

W efekcie odległość potrzebna na wykonanie manewrów korygujących odchylenie kątowe to:

$$L_{\text{man}} = \frac{V^2}{g\gamma} \left[\Delta\psi + 2 \arccos \left(\frac{1 + \cos \Delta\psi}{2} \right) \right],$$

gdzie V to średnia prędkość w obszarze manewrowania;

γ to średni przechył podczas manewrów.

Dla większości samolotów odrzutowych maksymalny przechył podczas manewrów nie powinien przekraczać 15° .

Każde odchylenie statków powietrznych od wyznaczonego kursu wymaga podobnych manewrów, ponieważ „czyste” odchylenie poziome łączy w sobie odchylenie poziome i odchylenie kątowe.

Odległość pokonywaną w kierunku lądowania podczas korygowania „czystego” odchylenia poziomego wyznaczamy jako:

$$L_{\text{man}} = \frac{2V^2}{g\gamma} \left[\arccos\left(\frac{1 - Zg\gamma}{2V^2}\right) \right].$$

Maksymalne dopuszczalne odchylenie statku powietrznego w punkcie przejścia do lotu z widocznością przy różnych $\Delta\psi$ wyznaczamy z zależności $z = f(L, \Delta\psi)$:

$$Z_{\text{max}} = \frac{2V^2}{g \tan \gamma} \left[\frac{1 + \cos \Delta\psi}{2} - \sqrt{1 - \left(\frac{L_{\text{man}} g \tan \gamma}{2V^2} - \frac{\sin \Delta\psi}{2} \right)} \right] + z_0$$

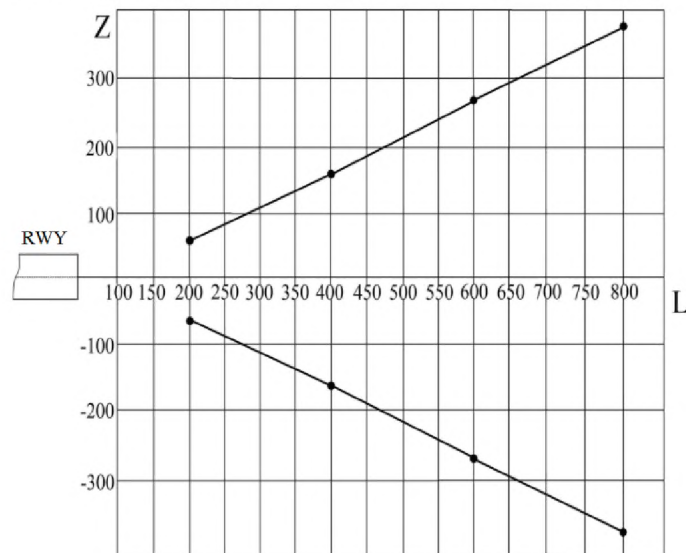
ψ to kąt pomiędzy wektorem prędkości wobec ziemi i wektorem trajektorii lądowania;

z_0 to dopuszczalne odchylenie poziome statku powietrznego od osi drogi startowej w momencie lądowania.

Po przeliczeniu:

$$Z_{\text{max}} = f(L_{\text{man}}, \Delta\psi),$$

możemy narysować wykres dopuszczalnych odchyleń poziomych i symetryczny do niego, a następnie wyznaczyć zakres dopuszczalnych odchyleń statku powietrznego (ilustracja 2.67).



Ilustracja 2.67. Zakres dopuszczalnych odchyleń statku powietrznego [202]

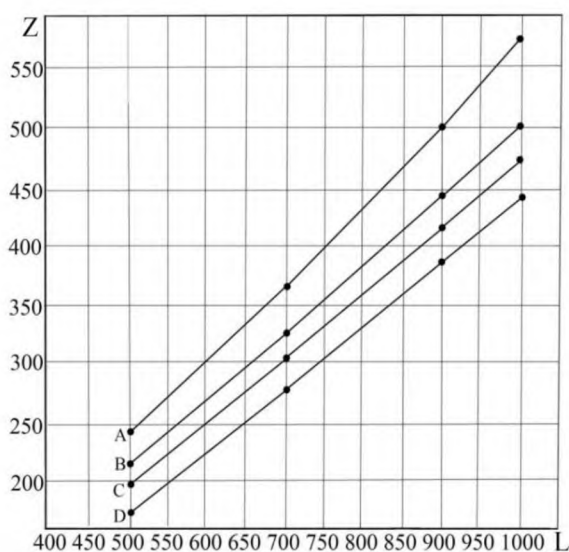
Zgodnie ze standardami ICAO statki powietrzne dzielimy na 5 kategorii, według ich prędkości (ilustracja 2.68). Na podstawie tego podziału określone zostały minima lądowania oraz parametry podejścia statków powietrznych (tabela 2.10).

Tabela 2.10. [202] Klasyfikacja statków powietrznych pod kątem wyznaczania procedur podejścia

Kategoria statku powietrznego	Prędkość	Symbol
1	do 90 km/h	A
2	90 - 120 km/h	B
3	120 - 140 km/h	C
4	140 - 160 km/h	D
5	powyżej 160 km/h	E

		Faza początkowa	Faza końcowa	
A	< 169	165/280	130/185	185
B	169/223	220/280	155/240	250
C	224/260	295/445	215/295	335
D	261/306	345/465	240/345	380
E	307/390	345/465	285/425	445

Uwaga: Kategoria E tylko dla samolotów wojskowych



Ilustracja 2.68. Zależność pomiędzy maksymalnym dopuszczalnym odchyleniem poziomym statku powietrznego a prędkością w punkcie minimum [202]

Im niższa jest prędkość statku powietrznego podczas podejścia do lądowania, tym większa jest jego manewrowość, co oznacza mniejszy promień skrętu oraz niższe dopuszczalne minimum meteorologiczne, jeśli inne warunki są porównywalne. Niższa prędkość zapewnia również większą rezerwę czasu dla pilota po wylocie z chmur, co prowadzi do skrócenia odległości wykonywania manewrów korygujących potencjalne odchylenie poziome.

Udane lądowanie zależy od zakresu dopuszczalnych odchyłeń poziomych statku powietrznego i stabilizacji ruchu wzdłuż trajektorii lądowania. By zapewnić bezpieczeństwo działań w pewnych warunkach meteorologicznych, należy brać pod uwagę odległość potrzebną na wykonanie manewrów korygujących maksymalne dopuszczalne odchylenie poziome statku powietrznego. Od tej odległości zależy wyznaczenie punktu minimum, w którym należy rozpocząć manewry korygujące. Punkt minimum to wysokość, na której pilot podejmuje decyzję o manewrach lub o przejściu na drugie okrążenie, jeśli odchylenie statku powietrznego przekracza dopuszczalny limit [202].

2.3.8. Dokładność metod identyfikacji typów sygnałów za pomocą narzędzi sprzętowych

Do oceny dokładności identyfikacji typów sygnałów wykorzystuje się rozmaite urządzenia elektroniczne tworzące struktury złożone i systemy.

Są one łączone w układy tworzące kanały łączności wspomagające optymalną interakcję między operatorem a obiektem, dlatego niezbędna jest odpowiednia obsługa metrologiczna wszystkich kanałów łączności.

Nowoczesne metody oceny dokładności różnią się znacząco od klasycznych, wykorzystywanych wcześniej zasad metrologicznych i standardów państwowych [203–207].

Różnica ta wynika ze stosowania nowoczesnych technologii informatycznych, które zwiększają funkcjonalność projektowanych urządzeń oraz wygodę i łatwość utrzymania, a także tworzą wirtualną przestrzeń prezentacji informacji. Jednocześnie pojawiają się także nowe źródła błędów, związane z cechami wykorzystywanego medium.

Interpretacja metod oceny dokładności za pomocą wykrywania niepewności stwarza wiele problemów związanych z rozpoznawaniem i późniejszą likwidacją elementów błędu lub redukowaniem ich do nieistotnego poziomu.

Ze względu na cechy oryginalnego procesu pomiarowego szacunki dokładności metod identyfikacji dla wszystkich typów elementów błędu nie są dostępne. Chodzi w szczególności o błędy wynikające z niedokładnej identyfikacji zniekształceń harmonicznych, która skutkuje niemożnością późniejszej eliminacji ich wpływu na sygnał informacyjny; niewyjaśnione błędy, uzależnione od położenia kontrolowanego obiektu w przestrzeni i czasie; a także błędy występujące w określonych środowiskach fizycznych w procesie nadawania i odbioru.

Wszystko to stanowi uzasadnienie i podkreśla znaczenie badań opisanych w niniejszym rozdziale [208, 209].

Analiza elementów błędów podczas identyfikacji typu sygnałów za pomocą narzędzi sprzętowych

Standardowe oprogramowanie (MultiSim, LabView oraz inne specjalnie przygotowane pakiety oprogramowania) wykorzystuje wirtualne spektrografy.

Podczas eksperymentalnej fazy projektowania są one narzędziem ułatwiającym analizę elementów błędów urządzeń elektronicznych działających w warunkach idealnych.

Takie składniki błędu jak błędy losowe δ_r , błędy szumu δ_n , błędy poszczególnych gniazd δ_{ss} , błąd zmian charakterystyki elektrycznej po kalibracji δ_{cc} czy błąd niestabilności ustawień instrumentów δ_{si} mogą być wykryte i skorygowane tylko w czasie rzeczywistym, np. podczas testowania funkcjonalności danego urządzenia.

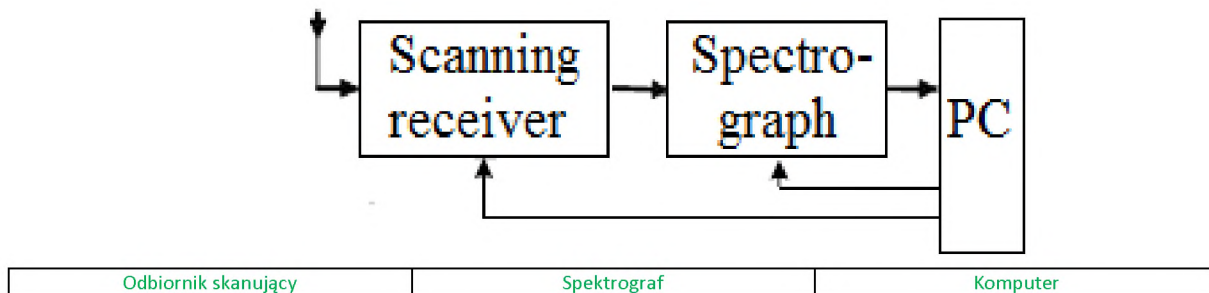
Środowisko przemysłowe w połączeniu z intuicją i doświadczeniem mechaników pozwalają na wykorzystanie narzędzi sprzętowych, np. odbiorników skanujących, takich jak SR2000, czy spektrografów, takich jak GSP-7830.

Wymagany model metrologiczny urządzeń na torze odbiorczym można uzyskać podczas modyfikacji wykresu składników błędu, co pozwala na wybór środków zaradczych lub metod ograniczania wpływu błędów.

Transmisja informacji kanałem łączności odbywa się za pomocą sygnałów radiowych.

Można je kalibrować według: częstotliwości (zakresu częstotliwości), formatu modulacji (manipulacji), szerokości pasma oraz rodzaju sygnału modulującego (dźwięk, wideo).

Tor odbiorczy identyfikuje sygnał radiowy za pomocą odbiornika skanującego, spektrografu oraz centralnej jednostki sterującej (MC) zainstalowanej na komputerze osobistym (PC) (ilustracja 2.69).



Ilustracja 2.69. Tor odbiorczy kanału łączności [213]

Dokładność identyfikacji typów sygnałów radiowych zależy od dokładności: strojenia odbiornika, wielkości zakłóceń transmisji przez odbiorczo-wzmacniające łącze komunikacyjne, pomiaru pasma sygnału, typu sygnału określonego przez system ekspertowy [211, 212].

Uwzględniając cztery powyższe elementy, możemy zdefiniować całkowity błąd identyfikacji typu sygnału (ilustracja 2.70) jako:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{rt} + \delta_{trt} + \delta_{sm} + \delta_{es} \dots$$

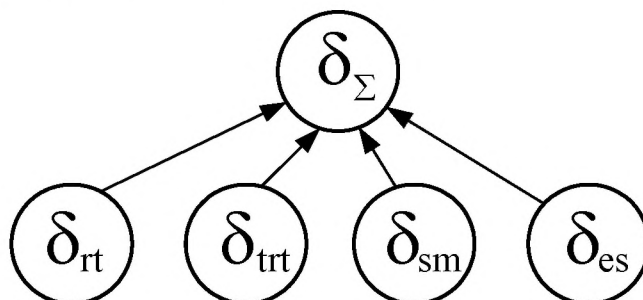
gdzie δ_{Σ} to całkowity błąd identyfikacji,

δ_{rt} to błąd strojenia odbiornika,

δ_{trt} to błąd transmisji sygnału przez odbiorczo-wzmacniające łącze komunikacyjne,

δ_{sm} to błąd pomiaru pasma sygnału,

δ_{es} to błąd definicji typu sygnału przez system ekspertowy.



Ilustracja 2.70. Schemat błędu identyfikacji typu sygnału [213]

Etapy wykrywania składników błędu za pomocą narzędzi sprzętowych w celu zwiększenia dokładności identyfikacji typów sygnałów to:

1. Ocena błędów widma odbiornika skanującego. W tym celu wykorzystano odbiornik SR2000.

Płyta czołowa odbiornika skanującego SR2000 przedstawiona została na ilustracji 2.71.

Charakterystyka odbiornika skanującego: względna niestabilność częstotliwości $\pm 1 \times 10^6$; reakcja na częstotliwość 3db; współczynnik zniekształceń harmoniczných 3%.

Do regulacji częstotliwości wykorzystuje się cyfrowy syntezytor częstotliwości, sterowany przez MC zainstalowaną na komputerze.

Względne odchylenie częstotliwości odbiornika od wartości nominalnej zależy od stopnia niestabilności generatora częstotliwości wzorcowej.

Opisane powyżej parametry mają wpływ na kształt fali wyjściowej, a w konsekwencji również na jej skład widmowy.

Błąd strojenia może doprowadzić do niekontrolowanego rozszerzenia pasma widma sygnału poza pasmo przepustowe.

Częstotliwości progowe mogą się znaleźć poza pasmem przepustowym, co prowadzi do strat sygnału wyjściowego.

Będzie to miało wpływ na identyfikację sygnału – może spowodować błędy lub nawet całkowicie uniemożliwić identyfikację. Jest to błąd losowy, który możemy ograniczyć za pomocą metod statystyki matematycznej.

Reakcja łącza odbiorczo-wzmacniającego na częstotliwość (Frequency Response Ripple, FRR) pozwala zmniejszyć zniekształcenia widma, które mają wpływ na widmo sygnału wyjściowego.

W odróżnieniu od błędu strojenia charakterystykę FRR można zdefiniować i interpolować podczas obliczania korekty sygnału, co znaczy, że wpływ FFR można ograniczyć poprzez strukturę widma.

Czynnik zniekształceń nieliniowych (harmonicznych) – to cecha, która pokazuje zmiany w składzie widma po przejściu sygnału przez łącze odbiorczo-wzmacniające.

Prowadzi to do pojawienia się nowych częstotliwości w widmie sygnału wyjściowego, nieobecnych w widmie sygnału wejściowego, co jest szczególnie istotne w przypadku identyfikacji sygnału na podstawie jego widma, ponieważ nowe składniki sygnału zmieniają je.



Ilustracja 2.71. Odbiornik skanujący SR2000 [213]

Jeśli wartość współczynnika zniekształceń harmonicznych jest niska, nie ma on wpływu na identyfikację typu sygnału.

2. Ocena wielkości błędu pomiarowego analizatora widma (ilustracja 2.72).



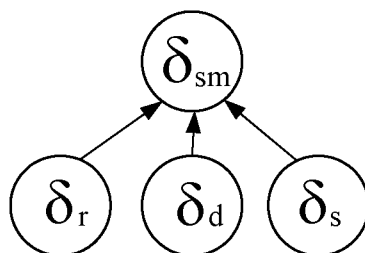
Ilustracja 2.72. Analizator widma GSP-7830 [213]

Charakterystyka analizatora widma:

– błąd źródła częstotliwości wzorcowej $\pm 5 \times 10^{-6}$,

- reakcja na częstotliwość $\pm 1,5\text{db}$;
- błąd pomiaru $\pm 1,5\text{db} / 100\text{ MHz}$.

Poniższy schemat przedstawia trzy składniki błędu pomiaru widma δ_{sm} (ilustracja 2.73).



Ilustracja 2.73. Schemat składników błędu widma [213]:

δ_r – błędy losowe,

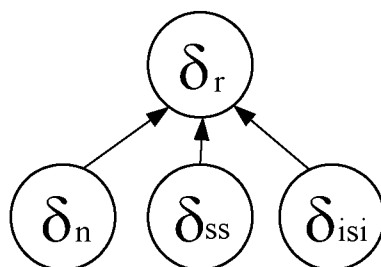
δ_d – błędy pełzania,

δ_s – błędy systemowe

Błędy losowe δ_r są nieregularne i nie da się im zapobiec za pomocą odpowiedniej kalibracji urządzenia.

Schemat na ilustracji 6 pokazuje następujące błędy losowe:

- błąd szumu δ_n ,
- błąd gniazda δ_{ss} ,
- błąd niestabilności ustawień instrumentu δ_{isi} .

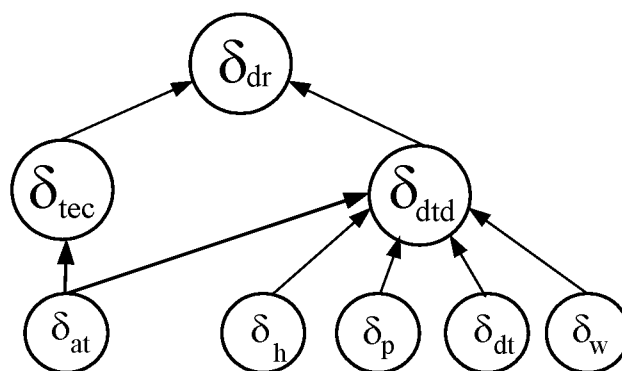


Ilustracja 2.74. Schemat składników błędów losowych δ_r pomiaru widma. Błędy szumu są wynikiem wahań elektrycznych występujących w komponentach elektronicznych wykorzystywanych w instrumentach pomiarowych [213]

By zmniejszyć skalę tych błędów, można wzmocnić siłę mierzonego sygnału, ograniczyć filtrowanie pasma lub uruchomić tryb uśredniania.

Błędy gniazd w urządzeniu są efektem wahań charakterystyki elektrycznej gniazd wynikających ze zużycia. By ograniczyć skalę tych błędów, należy wymienić gniazda lub zachować ostrożność podczas korzystania z nich.

Błąd pełzania jest wynikiem zmian charakterystyki elektrycznej urządzenia, jakie następują jego kalibracji (ilustracja 2.75).



Ilustracja 2.75. Schemat składników błędu pelzania [213]

Główne przyczyny błędu pelzania to rozszerzalność cieplna kabli łączących δ_{tec} spowodowana zmianą temperatury otoczenia δ_{at} oraz zmiany temperatury komponentów elektronicznych wewnątrz urządzenia δ_{dtd} wywołane jego nagrzewaniem δ_w , wilgotnością δ_h , ciśnieniem δ_p , a także porą dnia δ_{dt} .

Skutecznym sposobem na zmniejszenie skali i wpływu tych błędów może być odpowiednie rozgrzanie urządzenia przed jego wykorzystaniem, rekalkibracja, a także zmiany wspomnianych powyżej czynników.

Błędy systemowe wywołane są przez drobne niedoskonałości charakterystyki elektrycznej poszczególnych elementów urządzenia, takich jak kable łączące, gniazda oraz obwód sortowania sygnału.

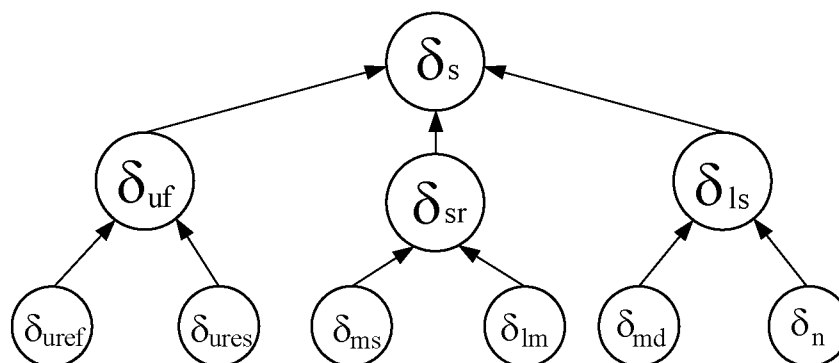
Są to błędy powtarzalne, a ich charakterystyka nie zmienia się wraz z upływem czasu.

Charakterystykę błędów systemowych można określić, wykonując test weryfikacyjny. By zmniejszyć ich skalę i wpływ, wykorzystuje się kalibrację oraz matematyczne podejście do oceny wyników pomiarów (ilustracja 2.76). Podstawą określenia charakterystyki błędów systemowych są pomiary parametrów modeli wzorcowych.

Służą one również jako punkt odniesienia podczas kalibracji urządzeń.

Pomiary wykonywane podczas kalibracji urządzeń elektronicznych to pomiar prądu zwarciovego oraz pomiar skoku jałowego.

Analizator widma wykorzystuje dwie metody kalibracji – kalibrację nierównomiernego rozkładu częstotliwości transmisji oraz zaawansowaną kalibrację nierównomiernego rozkładu częstotliwości transmisji.



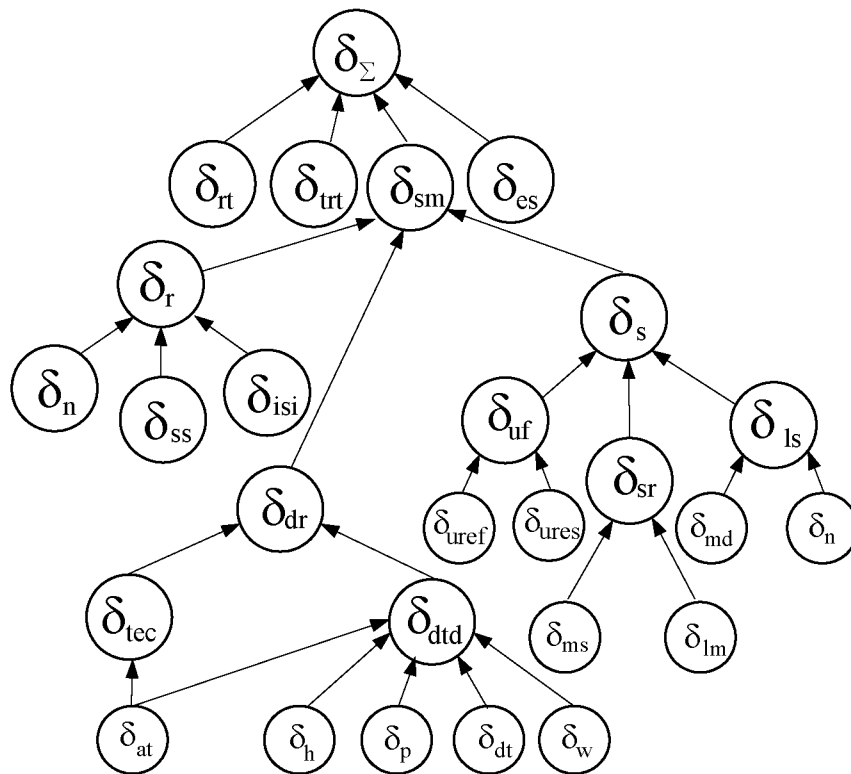
Ilustracja 2.76. Schemat elementów błędów systemowych δ_s [213]:

δ_{uf} – błąd wywołany przez nierówny rozkład częstotliwości urządzenia i ustawienia testowe,

δ_{sr} – błędy spowodowane odbiciem sygnałów w systemie pomiarów,

- δ_{ls} – błędy spowodowane przez sygnał prądu upływu,
- δ_{uref} – nierównomierny rozkład częstotliwości w torze odbicia,
- δ_{ures} – nierównomierny rozkład częstotliwości w torze odbiorczym,
- δ_{ms} – błąd źródła dopasowania,
- δ_{lm} – błąd dopasowania obciążenia,
- δ_{md} – kierunkowość pomiarów,
- δ_n – brak interakcji

Schemat błędu całkowitego, obejmującego składniki błędu pomiaru widma, przedstawiony został na ilustracji 2.77.



Ilustracja 2.77. Schemat błędu całkowitego [213]

System ekspertowy (ES) identyfikuje sygnał.

Modele sieci neuronowych ES są dostrojone do określonego typu widma sygnałów.

Jedną z cech sieci neuronowych jest grupowanie danych.

Odbierając określony wektor wejściowy, sieć „rozpoznaje” sygnał.

Jeśli wektor wejściowy znajduje się w pobliżu granicy pasma rozdzielającej różne grupy, nawet niewielkie błędy strojenia sieci neuronowych mogą wpływać na sygnał wyjściowy. Dlatego sieci należy analizować w warunkach zbliżonych do warunków granicy pasma [8].

Strojenie sieci neuronowych jest dokładne, jeśli spełniony jest następujący warunek: sieć rozpoznaje prawidłowo zarówno wiele różnych wektorów wejściowych, należących do różnych grup, różniących się od siebie w minimalnym stopniu, jak i kilka różniących się od siebie wektorów wejściowych, należących do tej samej grupy.

Kolejnym krokiem jest analiza porównawcza błędów pojawiających się w torze odbiorczym. Pozwala ona uzasadnić wybór struktury i zasad działania kanału łączności.

Dokładność identyfikacji typu sygnału jest tym większa, im skuteczniejsze jest wykrywanie i eliminacja lub ograniczenie wpływu elementów składowych błędów pomiaru.

Analiza dowodzi zasadności wykorzystania narzędzi sprzętowych do wykrywania składników błędów zarówno w powtarzalnych warunkach operacyjnych, jak i w zróżnicowanym środowisku badawczym.

W konsekwencji podział błędu całkowitego pojawiającego się w torze odbiorczym na składniki, przedstawiony na schemacie na ilustracji 2.77, zwiększa dokładność identyfikacji typu odbieranego sygnału [213].

2.3.9. Pomiar dokładności właściwości metrologicznych narzędzi sprzętowych wykorzystywanych w identyfikacji sygnałów na podstawie fragmentów widma

Informacje na temat pomiarów to jeden z najważniejszych elementów w procesie tworzenia jednostek automatycznych systemów kontrolnych.

Ocena dokładności pomiarów to bardzo istotna część doświadczeń i prac badawczych.

Metaheurystyczna kontrola obiektów zapewnia dużą dokładność odtwarzania sygnałów [214, 217, 219, 220, 221].

Informacyjno-pomiarowa część automatycznych systemów kontrolnych ma wiele cech charakterystycznych, z których najważniejsze są cechy informacyjne i metrologiczne.

Głównym elementem informacyjnym są spływające i gromadzone dane. To, czy ich ilość i jakość są wystarczające, zależy od właściwości dynamicznych i wymagań dotyczących dokładności.

Z kolei dwie najważniejsze właściwości metrologiczne to precyzja i prawidłowość pomiarów. Decydują one o dokładności odtwarzania i przetwarzania sygnałów [213, 215, 218].

Głównymi źródłami błędów są elementy składowe medium, przez które przesyłane są informacje.

Celem systemów jest wczesne wykrywanie i analiza błędów, a następnie wykorzystanie narzędzi sprzętowych do precyzyjnej identyfikacji typów przesyłanych sygnałów. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia kontroli całego procesu [221].

Przedmiotem badań jest identyfikacja błędów w procesie nadawczo-odbiorczym, wynikających ze zniekształceń harmonicznym oraz cech fizycznych medium, które mogą mieć znaczący wpływ na proces odtwarzania sygnałów.

Kolejnym elementem będzie omówienie przykładu pomiaru błędów widma za pomocą odbiornika skanującego, obejmującego i pomiarów parametru a .

Niestabilność generatora częstotliwości wzorcowej ma decydujący wpływ na odchylenie względnej częstotliwości strojenia odbiornika skanującego, obliczonej według podanego algorytmu:

1. 20 pomiarów częstotliwości generatora częstotliwości wzorcowej wykonanych w ciągu 24 godzin, w różnych przedziałach czasowych.

2. Precyzja pomiarów zależy od jednej wartości sigma (One-Sigma Value, OSV):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f)^2}{n - 1}},$$

gdzie częstotliwość to f obliczone na podstawie znanego procesu [10]

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n}$$

3. Wyniki pomiarów częstotliwości f i OSV zostały przedstawione w tabeli 2.11.

Tabela 2.11. Wyniki pomiarów częstotliwości generatora częstotliwości wzorcowej odbiornika [223]

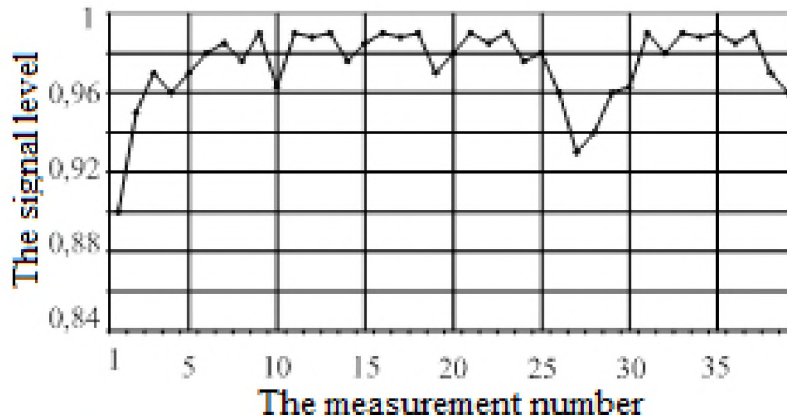
Numer pomiaru	f , Hz	Numer pomiaru	f , Hz
1	5000000	12	5000001
2	5000001	13	4999999
3	5000002	14	5000000
4	4999999	15	4999998
5	4999998	16	4999999
6	4999997	17	5000000
7	5000003	18	5000003
8	5000002	19	5000000
9	4999998	20	4999998
10	4999997	Łącznie	99999995
11	5000000	Średnia	5000000

4. OSV częstotliwości strojenia odbiornika do częstotliwości kanału wynosi 1,849609 Hz, co daje 0,0000037%.

Skala błędu jest znikoma, zatem generator częstotliwości wzorcowej może zostać wykorzystany do zwiększania dokładności identyfikacji typów sygnałów w kanale łączności za pomocą narzędzi sprzętowych.

Algorytm oceniający wektor korygujący reakcję na częstotliwość (FRR) obejmuje:

1. Wyznaczenie rzeczywistej skali FRR kanału zbiorczo-wzmacniającego (ilustracja 2.78).



The signal level	Poziom sygnału
The measurement number	Liczba pomiarów

Ilustracja 2.78. Rzeczywista wielkość FRR kanału odbiorczo-wzmacniającego [223]

Przesłanie sygnałów o normalnym poziomie i kalibrowanej amplitudzie oraz częstotliwości kanałem odbiorczo-wzmacniającym (RAT).

Nominalne częstotliwości podane są w tabeli 2.12.

Pomiar wartości rzeczywistej FRR – poziom sygnałów wyjściowych w kanale odbiorczo-wzmacniającym. Wyniki przedstawia tabela 2.12.

2. uzupełnienie kolumny „idealna FRR” w tabeli 2.12;
3. obliczenie wektora błędu E_i (ilustracja 2.79):

$$E_i = l - a,$$

gdzie l to idealna wartość FRR, a a to rzeczywista wartość FRR.

Tabela 2.12. Zmiany częstotliwości i pomiar wektora błędu [223]

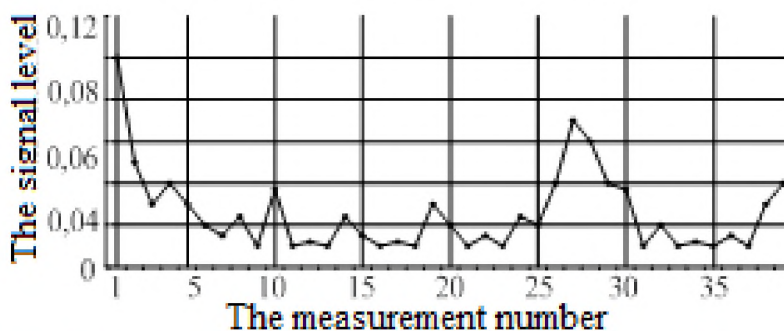
f , Hz	Poziom sygnału przy wyjściu z RAT	Idealna FRR	Wektor błędu
10	0,9	1	0,1
20	0,95	1	0,05
50	0,97	1	0,03
60	0,96	1	0,04
200	0,97	1	0,03
400	0,98	1	0,02
1000	0,985	1	0,015
2000	0,976	1	0,024
5000	0,99	1	0,01
10000	0,963	1	0,037
12500	0,99	1	0,01
15374	0,988	1	0,012
15625	0,99	1	0,01
20000	0,976	1	0,024
22000	0,985	1	0,015
50000	0,99	1	0,01
100000	0,988	1	0,012
200000	0,99	1	0,01
450000	0,97	1	0,03
455000	0,98	1	0,02
465000	0,99	1	0,01
500000	0,985	1	0,015
1000000	0,99	1	0,01
2000000	0,976	1	0,024
3580000	0,98	1	0,02
4250000	0,96	1	0,04
4406000	0,93	1	0,07
4430000	0,94	1	0,06
5000000	0,96	1	0,04
5100000	0,963	1	0,037
5200000	0,99	1	0,01
5300000	0,98	1	0,02
5400000	0,99	1	0,01
5500000	0,988	1	0,012
5742000	0,99	1	0,01
5850000	0,985	1	0,015
6000000	0,99	1	0,01
6258000	0,97	1	0,03
6500000	0,96	1	0,04

4. Zrównoważenie falowania FRR:

$$S_p = S_n + E_i,$$

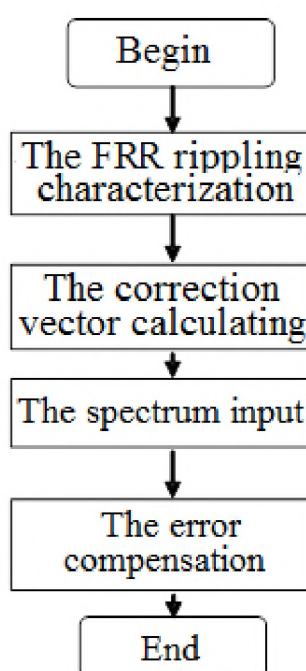
gdzie S_p to widmo zrównoważone, S_n to widmo niezrównoważone.

Ilustracja 2.80 pokazuje algorytm równoważenia falowania FRR.



The signal level	Poziom sygnału
The measurement number	Liczba pomiarów

Ilustracja 2.79. Wektor błędu FRR [223]

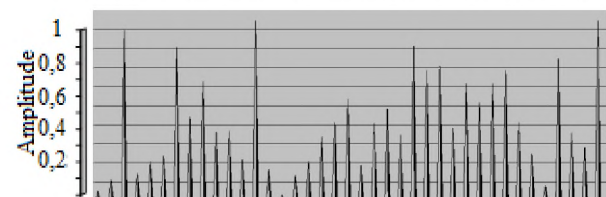
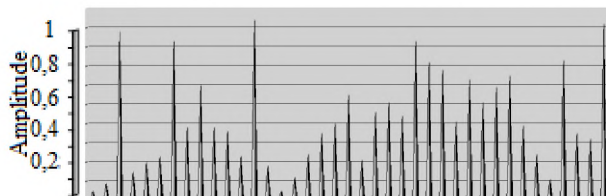
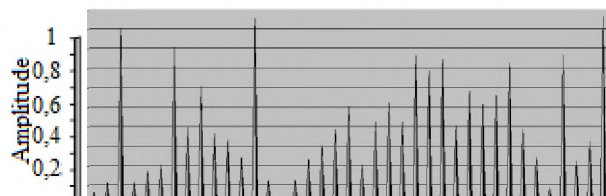
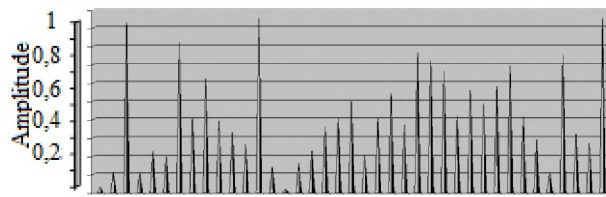
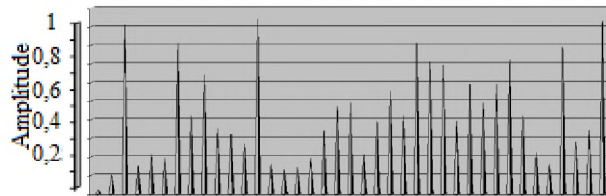
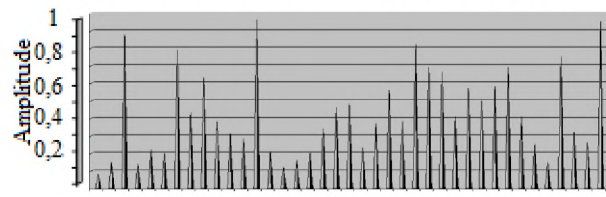
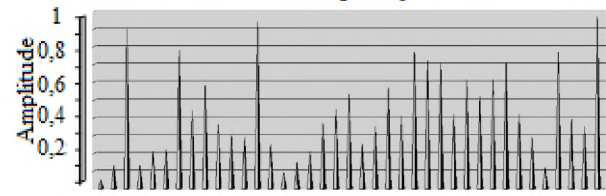
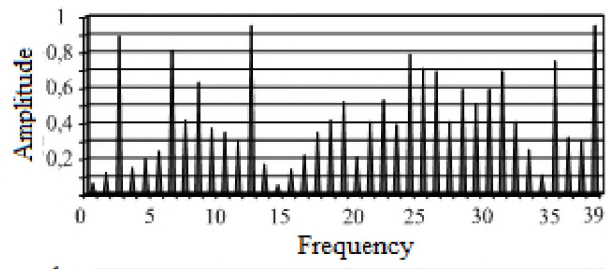


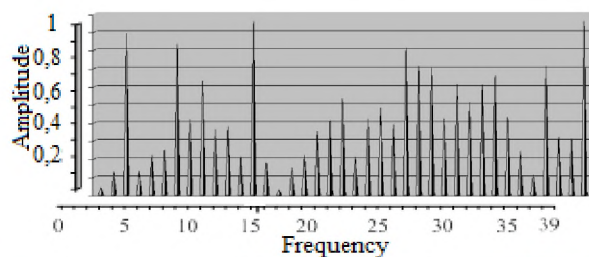
Początek
Określenie właściwości falowania FRR
Obliczenie wektora korygującego
Wykorzystanie widma
Zrównoważenie błędu
Koniec

Ilustracja 2.80. Algorytm równoważenia falowania FRR [223]

Algorytm dokładności sygnałów widmowych obejmuje:

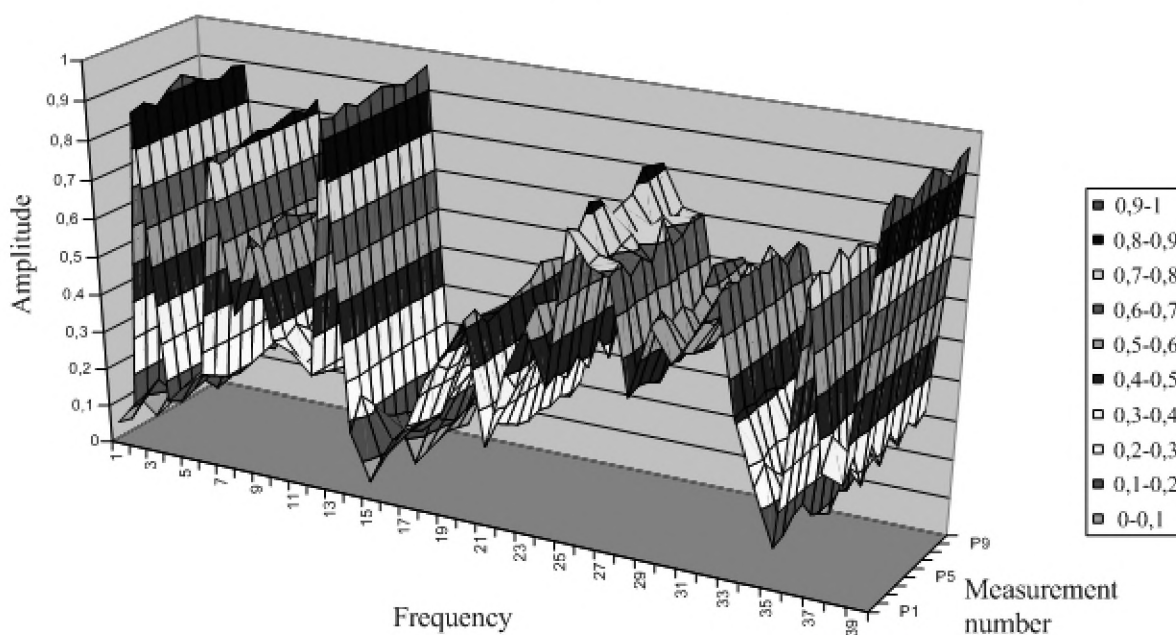
1. Określenie błędu pomiarowego widma.
 - wysłanie sygnałów wideo SECAM do analizatorów widma i wykonanie pomiarów;
 - wybór odpowiednich fragmentów widma sygnałów wideo SECAM;
 - przeprowadzenie pomiarów sygnałów widma w podanym paśmie w przedziałach dwuminutowych (ilustracja 2.81).
2. Wpisanie odczytów z analizatora widma do tabeli 2.13 i obliczenie OSV. Charakter zmian widma sygnałów wideo SECAM przedstawia ilustracja 2.82.





Amplitude	Amplituda
Frequency	Częstotliwość

Ilustracja 2.81. Przykłady pomiarów fragmentów widma sygnałów wideo SECAM [223]



Amplitude	Amplituda
Frequency	Częstotliwość
Measurement number	Liczba pomiarów

Ilustracja 2.82. Charakter zmian widma sygnałów wideo SECAM [223]

Tabela 2.13. Wartości sigma (OSV) dla różnych częstotliwości [223]

Częstotliwość Hz	Numer pomiaru										OSV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	0.06	0.05	0.08	0.02	0.03	0.07	0.04	0.05	0.06	0.04	0.003
20	0.12	0.13	0.15	0.1	0.11	0.12	0.14	0.09	0.12	0.13	0.00289
50	0.89	0.9	0.88	0.91	0.93	0.91	0.89	0.88	0.9	0.89	0.00216
60	0.15	0.13	0.14	0.15	0.11	0.12	0.13	0.15	0.15	0.13	0.00184
200	0.2	0.21	0.22	0.21	0.23	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.00201
400	0.24	0.22	0.2	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.0036
1000	0.81	0.78	0.79	0.81	0.82	0.81	0.82	0.83	0.81	0.83	0.00229
2000	0.42	0.44	0.43	0.42	0.41	0.4	0.39	0.38	0.45	0.42	0.00424
5000	0.63	0.58	0.63	0.64	0.62	0.61	0.6	0.6	0.63	0.63	0.00321
10000	0.37	0.36	0.38	0.35	0.39	0.37	0.35	0.38	0.37	0.36	0.00156
12500	0.35	0.3	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.00609

15374	0.3	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.00825
15625	0.95	0.94	0.96	0.94	0.95	0.96	0.95	0.94	0.95	0.96	0.0006
20000	0.17	0.25	0.21	0.16	0.14	0.13	0.11	0.18	0.17	0.18	0.0144
22000	0.05	0.09	0.12	0.13	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.0138
50000	0.14	0.15	0.16	0.14	0.16	0.13	0.11	0.12	0.14	0.15	0.0024
100000	0.22	0.21	0.2	0.19	0.23	0.24	0.25	0.24	0.21	0.22	0.00329
200000	0.35	0.37	0.34	0.34	0.36	0.31	0.32	0.35	0.34	0.35	0.00281
450000	0.42	0.45	0.46	0.47	0.41	0.39	0.38	0.4	0.42	0.41	0.00809
455000	0.52	0.53	0.48	0.49	0.5	0.51	0.52	0.55	0.54	0.53	0.00441
465000	0.21	0.25	0.23	0.21	0.2	0.21	0.2	0.21	0.19	0.21	0.00256
500000	0.41	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.46	0.41	0.42	0.0102
1000000	0.53	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.49	0.48	0.00756
2000000	0.39	0.41	0.38	0.42	0.37	0.43	0.36	0.44	0.35	0.39	0.00824
3580000	0.79	0.77	0.82	0.81	0.76	0.77	0.78	0.83	0.82	0.81	0.00564
4250000	0.71	0.72	0.69	0.71	0.72	0.69	0.71	0.72	0.69	0.71	0.00141
4406000	0.69	0.71	0.66	0.69	0.66	0.75	0.67	0.68	0.71	0.7	0.00676
4430000	0.41	0.42	0.41	0.39	0.42	0.41	0.42	0.41	0.39	0.42	0.0012
5000000	0.59	0.61	0.57	0.59	0.56	0.59	0.64	0.63	0.62	0.61	0.00589
5100000	0.51	0.52	0.5	0.49	0.48	0.52	0.48	0.51	0.52	0.51	0.00224
5200000	0.59	0.61	0.58	0.59	0.58	0.57	0.57	0.59	0.62	0.61	0.00269
5300000	0.69	0.71	0.69	0.72	0.69	0.73	0.69	0.65	0.69	0.66	0.00536
5400000	0.41	0.42	0.41	0.42	0.41	0.39	0.41	0.39	0.42	0.43	0.00149
5500000	0.25	0.29	0.25	0.22	0.29	0.25	0.23	0.24	0.25	0.24	0.00469
5742000	0.11	0.12	0.15	0.16	0.11	0.09	0.07	0.11	0.09	0.11	0.00656
5850000	0.75	0.77	0.75	0.79	0.75	0.77	0.75	0.73	0.75	0.71	0.00436
6000000	0.32	0.39	0.32	0.28	0.32	0.23	0.32	0.35	0.36	0.32	0.01709
6258000	0.3	0.35	0.26	0.34	0.27	0.33	0.28	0.32	0.29	0.31	0.00825
6500000	0.95	0.97	0.95	0.93	0.95	0.97	0.95	0.92	0.95	0.96	0.0022

Rozdział prezentuje ilościową ocenę dokładności głównych właściwości metrologicznych narzędzi sprzętowych.

Obliczone OSV (odchylenie standardowe) generatora częstotliwości wzorcowej wynosi 0,0000037%, zatem zapewnia on wiarygodną ocenę fragmentów widma w trybie czasu rzeczywistego.

Narzędzia sprzętowe mogą dostarczyć oryginalne materiały (sygnały widmowe) do pomiaru i analizy w warunkach rzeczywistego wykorzystania lub zbliżonych.

Narzędzia sprzętowe umożliwiają automatyczne ograniczanie wpływu fragmentów błędów losowych, związanych z takimi czynnikami jak ciśnienie, wilgotność, temperatura otoczenia, pora dnia czy położenie obiektu, na pomiar widma.

Dalsze badania w warunkach idealnych i analiza porównawcza z materiałem oryginalnym pozwolą określić ilościowe znaczenie fragmentów błędów losowych, wyznaczenie ich zakresu i określenie metod eliminacji [223].

2.4. Czynniki ludzkie w zarządzaniu żeglugą powietrzną

2.4.1. Wpływ obciążeń wynikających z wielojęzyczności na jakość kontroli ruchu lotniczego i monitorowania

Jedną z głównych cech współczesnego systemu ruchu lotniczego jest konsolidacja wszystkich jego uczestników wokół kwestii zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa. Cecha ta jest niezbędna dla stworzenia, utrzymania i funkcjonowania środowiska żeglugi powietrznej, i jest podstawą jednolitych zachowań jego poszczególnych elementów. Najszybsze rozwiązania problemów bezpieczeństwa zawarte są w dokumentach regulacyjnych i wytycznych czołowych organizacji międzynarodowych [224–226], takich jak Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), Europejska Organizacja ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej (EUROCONTROL) czy Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA).

Zwyczajowy problem bezpieczeństwa w lotnictwie nabiera dziś szczególnego znaczenia, ze względu na dynamiczny rozwój ruchu lotniczego, intensywne wykorzystanie statków powietrznych i liczne wynikające z tego wyzwania.

Prognozy przedstawione w pracach [227–229] przewidują coroczny wzrost ruchu lotniczego na poziomie 5–7%. Przekłada się to na zwiększoną liczbę i zróżnicowanie sytuacji konfliktowych w lotnictwie, a w konsekwencji na wzrost wymagań dotyczących jakości kontroli ruchu lotniczego.

Analiza nietypowych sytuacji, incydentów i wypadków wynikających z nieporozumień językowych i zniekształceń semantycznych w interakcjach słownych pomiędzy uczestnikami operacji lotniczych pokazuje istotny wpływ czynników lingwistycznych na komunikację (kanały łączności) pomiędzy załogami samolotów i kontrolerami ruchu lotniczego, prowadzący do spadku efektywności operacji lotniczych i pogorszenia poziomu bezpieczeństwa lotów.

Badania audioakustycznych kanałów radiowej między kontrolerami lotów i pilotami podkreślają przede wszystkim ich monostrukturę [230]. Dlatego ich wyniki zazwyczaj nie zawierają żadnych wniosków na temat wpływu składników lingwistycznych na jakość kontroli ruchu lotniczego (ATC) i monitorowania.

Najnowsze badania [231–233] jednakże wskazują, że interakcja i wymiana danych pomiędzy pilotami i kontrolerami może przebiegać na różnych poziomach, co sprawia, że audioakustyczne kanały łączności różnią się nieco od kanałów monostrukturalnych. Na Ukrainie w łączności między załogami statków powietrznych i kontrolerami ruchu lotniczego wykorzystuje się wielojęzyczne kanały audioakustyczne.

Wielojęzyczna struktura kanałów wynika z kilku czynników: powszechność dwóch języków na Ukrainie (rosyjskiego i ukraińskiego), sąsiedztwo z rozległym kompleksem kontroli lotów, na którym językiem roboczym jest rosyjski (Federacja Rosyjska i kraje WNP), a także przynależność do międzynarodowego systemu ATC (w którym oficjalnym językiem roboczym jest angielski) [231, 234].

Wielojęzyczny audioakustyczny kanał łączności między pilotem i kontrolerem możemy zdefiniować jako audioakustyczny kanał komunikacyjny, w którym występuje kilka składników językowych o wspólnych założeniach i celu – zapewnienia skutecznej i bezpiecznej kontroli ruchu lotniczego.

Analiza najnowszych badań pokazuje brak efektywnych instrumentów naukowych i metodologicznych umożliwiających:

- określenie struktury i właściwości wielojęzycznych audioakustycznych kanałów łączności między pilotami i kontrolerami;

- ocenę wpływu wielojęzyczności kanałów łączności na efektywność kontroli ruchu lotniczego;

- opracowanie skutecznych metod zwiększania możliwości i niezawodności komunikacji między pilotami i kontrolerami, pozwalających ograniczyć wpływ wielojęzyczności.

Celem niniejszego rozdziału jest określenie struktury i cech charakterystycznych wielojęzycznych audioakustycznych kanałów łączności pomiędzy pilotami i kontrolerami, a także propozycja rozwiązań umożliwiających ograniczenie negatywnego wpływu wielojęzyczności na kontrolę ruchu lotniczego.

Określenie struktury i właściwości wielojęzycznego audioakustycznego kanału łączności

Stworzenie wielojęzycznych audio-akustycznych kanałów łączności jest efektem analizy kompetencji kontrolerów w sytuacjach nietypowych [233].

Chcąc określić i zbadać właściwości wielojęzycznego audioakustycznego kanału łączności, zastosowaliśmy następującą metodę: zadaniem egzaminowanego kandydata było dokonanie wyboru i reakcja na dwa spośród trzech przedstawionych bodźców graficznych. Badacze rejestrowali czas dokonywania wyboru, by na tej podstawie ocenić mobilność funkcjonalną kontrolerów w sytuacjach nadzwyczajnych [231–233].

Egzaminowany kandydat rozwiązuje zadania kolejno w trzech programach:

- programie A – w języku ukraińskim;
- programie B – w języku rosyjskim;
- programie C – w języku angielskim.

Prędkość przetwarzania danych mierzona jest na podstawie trzech typów informacji słownych. Następnie oceniający porównują te same parametry każdego programu i decydują, czy kandydat ma kompetencje wystarczające do pracy w charakterze kontrolera ruchu lotniczego międzynarodowych linii lotniczych i potrafi właściwie reagować w nietypowych sytuacjach.

Histogram porównawczy pokazuje, że procent egzaminowanych, którzy potrafią szybko przetwarzać i wykorzystywać dane (stopnie od 8 do 12) w warunkach zwiększonego obciążenia pracą, przekracza procent osób o tych samych umiejętnościach w grupie kontrolnej, a także, że w grupie egzaminowanych kontrolerów nie było nikogo, kto powoli przetwarza i wykorzystuje dane (stopnie od 1 do 3) [235–237].

A zatem, by działać skutecznie w warunkach nietypowych, egzaminowany, kandydat musi osiągnąć stopień między 8 a 12 w zakresie przetwarzania i wykorzystania danych. Kandydaci (osoby) w grupie ocenianej między 4 i 7 dopuszczani są warunkowo, zaś ci, którzy osiągną stopień poniżej 4, są odrzucani (ilustracja 2.83).

Na podstawie statystycznych metod przetwarzania danych wszyscy egzaminowani zostali sklasyfikowani w 12-stopniowej skali, uwzględniającej średnie arytmetyczne wartości i średnie odchylenia kwadratowe σ tych wskaźników

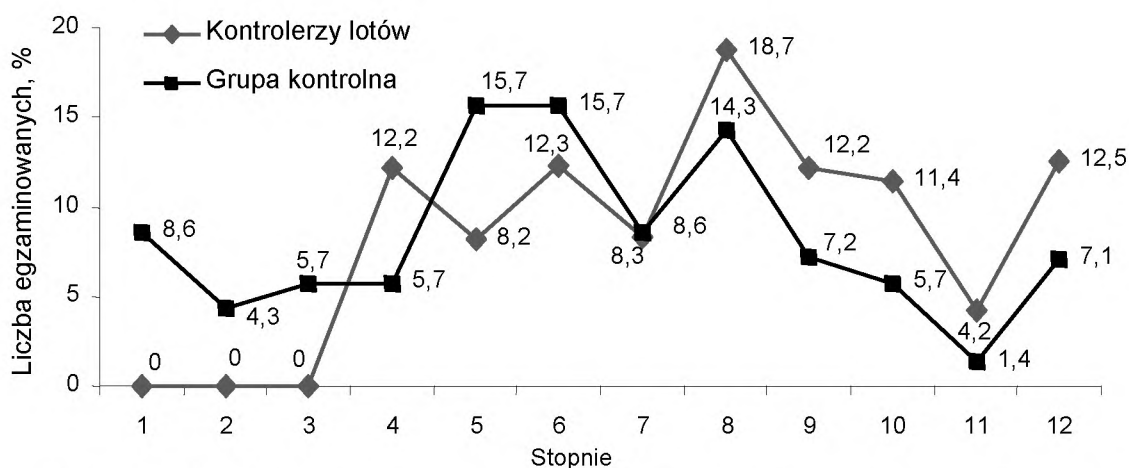
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 P_i}{n-1}},$$

$$\sum_{i=1}^k$$

gdzie \bar{x} jest znakiem potęgi odchylenia iloczynu różnicy między opcją x_i i jej średnią wartością \bar{x} z wagą P_i odchyłeń od klasy 1 do k , a n to ilość.

Jeśli egzaminowany kandydat uzyska wysokie oceny (stopień 8–12) w programach A i B, może pracować jako operator przetwarzający i wykorzystujący dane w nietypowych warunkach (kontroler ruchu lotniczego na Ukrainie i w krajach WNP).

Uzyskanie wysokiego wyniku w programie C oznacza, że kandydat ma umiejętność szybkiego przetwarzania i wykorzystywania danych w języku angielskim, co kwalifikuje go do pracy na stanowisku kontrolera ruchu lotniczego w środowisku międzynarodowym, podczas gdy niskie oceny w programie C (stopień 1 do 3) uniemożliwiają pracę w takim charakterze [231, 233, 236, 238].



Ilustracja 2.83. Histogram porównawczy służący ocenie pracy egzaminowanych w warunkach nietypowych [244]

Niskie oceny w programach A i B oznaczają, że egzaminowany kandydat ma problemy z szybkim przetwarzaniem danych w sytuacjach stresowych i w związku z tym nie może zostać zatrudniony jako kontroler lotów, nawet na połączeniach krajowych.

W warunkach rzeczywistych każdy kontroler na Ukrainie, korzystając z wielojęzycznego kanału łączności, posługuje się językiem angielskim, obsługując loty międzynarodowe, a rosyjskim – w przypadku lotów krajowych. Język ukraiński wykorzystywany jest do weryfikowania tłumaczeń, jeśli jest językiem ojczystym kontrolera.

Struktura wielojęzycznego kanału łączności:

- a) kontroler – język ojczysty ukraiński lub rosyjski, w zależności od miejsca urodzenia i pracy;
- b) język używany na co dzień – ukraiński lub rosyjski (z powyższych powodów);
- c) język zawodowy / roboczy – angielski.

Ramy czasowe odtworzenia bieżącego statusu lotu w ATC.

1. Odtworzenie bieżącego statusu lotu w języku rosyjskim:

- a) językiem ojczystym kontrolera jest rosyjski,
- b) językiem używanym na co dzień jest ukraiński,
- c) językiem roboczym jest angielski:

$$\tau_{DFS} = \sum_{s=1}^N (r_{DFS}^{1,s} + r_{DFS}^{2,s} + r_{DFS}^{3,s}),$$

$$\tau_{DFS_1} = \sum_{s=1}^N k_{DFS}^s (\tau_{DFS_1}^{1,s} + \tau_{DFS_1}^{2,s}), \quad (2.4.1.1)$$

gdzie $r_{DFS}^{1,s}$ to czas wymagany na odtworzenie bieżącego statusu lotu w języku rosyjskim;
 $r_{DFS}^{2,s}$ to czas wymagany na częściową weryfikację służącą odtworzeniu bieżącego statusu lotu (wpływ różnic w wymowie i naleciałości ukraińskich);
 $r_{DFS}^{3,s}$ to czas wymagany na dokładne tłumaczenie na angielski bieżącego statusu lotu, obejmującego s statków powietrznych;
 $s = \overline{1, N}$ to liczba statków powietrznych (jeśli ATC wymaga powielenia, zgodnie ze standardami międzynarodowymi, na wniosek załogi lub z innych powodów);
 k_{DFS}^s to współczynnik czasu wykonywania działań, zależny od kompetencji językowych pilota;
 $\tau_{DFS_1}^{1,s}$ to czas wymagany na odbiór i zrozumienie raportu (potwierdzenie, pytania) przez załogę s ;
 $\tau_{DFS_1}^{2,s}$ to czas wymagany na transmisję danych do załogi s ;

- a) językiem ojczystym kontrolera jest ukraiński,
- b) językiem używanym na co dzień jest rosyjski,
- c) językiem zawodowym / roboczym jest angielski:

$$\tau_{DFS_2} = \sum_{s=1}^N (r_{DFS_2}^{1,s} + r_{DFS_2}^{2,s} + r_{DFS_2}^{3,s}),$$

gdzie $r_{DFS_2}^{1,s}$ to czas wymagany na odtworzenie bieżącego statusu lotu w języku rosyjskim (kontrola ruchu lotniczego zgodnie z regulacjami Federacji Rosyjskiej i krajów WNP);
 $r_{DFS_2}^{2,s}$ to czas wymagany na równoległe odtworzenie bieżącego statusu lotu po ukraińsku (bez przesyłania potwierdzonego tłumaczenia);
 $r_{DFS_2}^{3,s}$ to czas wymagany na dokładne tłumaczenie na angielski statusu lotu obejmującego s statków powietrznych;
 $s = \overline{1, N}$ to liczba statków powietrznych (przeniesienie statków powietrznych do międzynarodowej strefy ATC).
Współczynnik czasu wykonywania działań k_{DFS}^s , zależny od kompetencji językowych pilota, patrz wzór (2.4.1.1);

- a) językiem ojczystym kontrolera jest ukraiński,
- b) językiem używanym na co dzień jest rosyjski,
- c) językiem zawodowym / roboczym jest angielski (lotniczy) [231–234, 236].

Audioakustyczny kanał łączności między kontrolerem i pilotem jest strukturą dwujęzyczną. Jeśli kontroler potrafi przetwarzać i przekazywać dane po angielsku, może wykonywać kontrolę lotu zgodnie z zasadami międzynarodowymi:

$$\tau_{DFS_3} = \sum_{s=1}^N (r_{DFS_3}^{1,s} + r_{DFS_3}^{2,s}),$$

gdzie $r_{DFS_3}^{1,s}$ to czas wymagany na odtworzenie bieżącego statusu lotu w języku angielskim (zgodnie z międzynarodowymi zasadami ATC).

Współczynnik czasu wykonywania działań jest podobny jak we wcześniejszych sytuacjach.

2. Obowiązkowe odtworzenie bieżącego statusu lotu w języku angielskim:

- a) językiem ojczystym kontrolera jest ukraiński lub rosyjski (w zależności od miejsca urodzenia i pracy);
- b) językiem używanym na co dzień jest ukraiński lub rosyjski (z powyższych powodów);
- c) językiem zawodowym/ roboczym jest angielski:

$$\tau_{DFS_4} = \sum_{s=1}^N (r_{DFS_4}^{1,s} + r_{DFS_4}^{2,s} + r_{DFS_4}^{3,s}),$$

gdzie $r_{DFS_4}^{1,s}$ to czas wymagany na odtworzenie bieżącego statusu lotu po rosyjsku (bez komunikacji);

$r_{DFS_4}^{2,s}$ to czas wymagany na odtworzenie bieżącego statusu lotu po ukraińsku (bez komunikacji);

$r_{DFS_4}^{3,s}$ to czas wymagany na dokładne tłumaczenie bieżącego statusu lotu, obejmującego s statków powietrznych, na angielski.

Współczynnik czasu wykonywania działań jest podobny jak we wcześniejszych sytuacjach [233, 236–238].

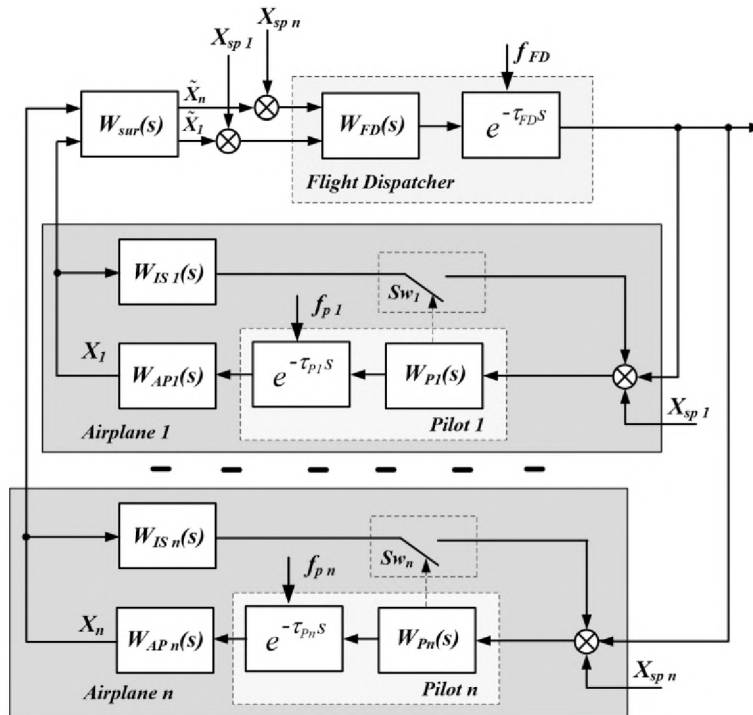
W modelowaniu roboczy język angielski uznawany jest za stałą, ze względu na swój najbardziej uniwersalny charakter i możliwość dokładnej interpretacji bieżącego statusu lotu. Zmiennymi w modelu są kompetencje językowe pilotów i kontrolerów, a także ich cechy psychologiczne i emocjonalne. Język rosyjski uznawany jest za język specjalistyczny tylko na wyznaczonym, ograniczonym obszarze. Jest wykorzystywany w kontroli lotów nad terytorium Federacji Rosyjskiej i krajów WNP. Również podstawowe zasady kontroli ruchu lotniczego obowiązujące w Federacji Rosyjskiej różnią się od zasad międzynarodowych.

Język ukraiński uznawany jest za zmienną wartość językową, praktycznie nieprzydatną w procesach ATC.

Duże opóźnienia wykryte podczas symulacji bieżącego statusu lotu są kluczowe z punktu widzenia kontroli lotów. Istotną cechą audioakustycznego kanału łączności między kontrolerem i pilotem są niepełne odpowiedzi, a także wykorzystanie standardowych, typowych dla danej sytuacji sformułowań. Tego typu komunikacji muszą towarzyszyć precyzyjne informacje na temat czasu potrzebnego na działanie w danych warunkach.

Analiza wpływu wielojęzyczności na efektywność (jakość) kontroli ruchu powietrznego

Wpływ opóźnień operatorów na działanie służb ruchu lotniczego możemy przeanalizować na przykładzie prostej pętli kontroli (ilustracja 2.84).



Flight dispatcher	Dyspozytor lotu
Airplane	Samolot
Pilot	Pilot

Ilustracja 2.84. Wykres prostej pętli kontroli ATC: W_{sur} to funkcja przekazania nadzoru [244]

Mówiąc o prostej pętli kontroli (pętli sterowania), mamy na myśli najmniejszą pętlę istniejącą w systemie kontroli lotów, obejmującą kontrolera, narzędzia łączności i dozoru, pilota oraz samolot. Dalszy podział prostej pętli kontroli na mniejsze elementy nie jest zalecany, ponieważ zakłócałby warunki rozwiązywania zadań funkcjonalnych w ramach działania systemu kontroli ruchu lotniczego [231, 238].

System kontroli współrzędnych fazowych dla każdego statku powietrznego w obszarze kontroli lotów składa się z dwóch prostych pętli kontroli – wewnętrznej i zewnętrznej (ilustracja 2).

Wewnętrzna pętla kontroli obejmuje funkcje transferu, które opisują w sposób formalny:

- dynamikę statku powietrznego i w określonym trybie lotu W_{APi} ;
- sprawność psychofizjologiczną pilota W_{Pi} w ramach pętli kontroli statku powietrznego;
- dynamikę działań pokładowego systemu informacyjnego W_{ISi} , obejmujących odbiór, przetwarzanie i dostarczanie pilotowi danych na temat współrzędnych fazowych statku powietrznego [231, 237, 239].

W sytuacjach nietypowych, spowodowanych awarią sprzętu lub wątpliwościami pilota dotyczącymi prawidłowości danych dostarczanych przez system pokładowy, wewnętrzna pętla otwiera się (symbolem tego procesu jest przełącznik na ilustracji 1). W takich przypadkach nadzór nad systemem kontroli lotu przekazywany jest pętli zewnętrznej, obejmującej kontrolera, pilota i samolot. Na ilustracji 2 psychofizjologiczną sprawność kontrolera przedstawiono jako funkcję transferową W_{FD} .

Do przeprowadzenia analizy wpływu obciążeń wynikających z wielojęzyczności na cechy jakościowe współpracy kontroler-pilot w prostej pętli kontroli możemy wykorzystać modele matematyczne operatora jako elementu systemu kontroli.

Obecnie znamy kilka modeli opisujących ludzkie zachowania w pętlach kontroli (tabela 2.14).

Tabela 2.14. Modele matematyczne pętli kontroli obsługiwanych przez człowieka

Model	Równanie	Wartość parametrów modelu	Dokument referencyjny
1	$W(s) = K$	$K = 5 \dots 100$	[224]
2	$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_1 s + 1}$	$K = 5 \dots 9$ $\tau = 0,1 \dots 0,3$ $T_1 = 0,1 \dots 1$	[224, 225]
3	$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}(T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$	$K = 5 \dots 100$ $\tau = 0,1 \dots 0,3$ $T_1 = 0,1 \dots 1$ $T_2 \geq 0,1$ $T_3 \leq 25$	[224–226]

Uwaga: $s = a \pm jb$ – liczba zespolona transformaty Laplace’a.

Parametry powyższych modeli odzwierciedlają cechy fizjologiczne człowieka-operatora:

K to wzmocnienie systemu operatora, uzależnione od zakresu częstotliwości wejściowej. Im wyższa jest częstotliwość, tym mniejsze wzmocnienie systemu. Zatem człowiek-operator wprowadza sygnały pochodne, utrzymując margines kontroli na poziomie 40–80°;

T_1 to czas opóźnionego działania efektora;

T_2 wskazuje zdolność człowieka do przewidywania zmian sygnałów wejściowych (różnicowania);

T_3 wskazuje zdolności integracyjne człowieka-operatora.

Model 1 nie jest wykorzystywany w praktyce ze względu na surowe ograniczenia obowiązujące w kontroli ruchu lotniczego. Analiza modeli 2 i 3 wskazuje na istnienie w funkcjach transferu linków opóźniających o czasie opóźnienia τ .

Parametr ten decyduje o opóźnieniu reakcji człowieka-operatora na dane wejściowe [241].

Jak pokazano powyżej, opóźnienie to zależy w dużym stopniu od obciążeń wynikających z wielojęzyczności. Możemy zatem stwierdzić, że opóźnienie to cecha odzwierciedlająca ogólnie wpływ obciążeń wynikających z wielojęzyczności na działanie pętli kontroli ruchu powietrznego.

Ogólnie czas opóźnienia w pętli kontroler – pilot to złożona funkcja, zależna od dynamiki rzeczywistych parametrów ruchu statku powietrznego oraz od zakłóceń zewnętrznych.

Zakłócenia zewnętrzne, będące efektem zniekształceń pojawiających się w audioakustycznych kanałach łączności między kontrolerem i pilotem, wynikających z wielojęzyczności, przedstawione zostały na ilustracji 1 jako sygnały f_p i f_{FD} [240, 242, 243].

Jak wiadomo z teorii sterowania, opóźnienia w pętli kontroli nie wpływają na dokładność przetwarzania danych, ale mogą znacznie zmniejszyć zapas stabilności systemu.

Poniżej przedstawiamy szacunkową ocenę wpływu przejściowych opóźnień na cechy jakościowe prostej pętli kontroli w kontekście obciążeń operatora wynikających z wielojęzyczności kanału łączności. Funkcję transferu prostej pętli kontroli możemy przedstawić w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 W(s) &= W_{FD}(s) \cdot e^{-\tau_{FD}s} \cdot W_p(s) \cdot e^{-\tau_p s} \cdot W_{AP}(s) \cdot W_{sur}(s) = \\
 &= W_{FD}(s) \cdot W_p(s) \cdot W_{AP}(s) \cdot W_{sur}(s) \cdot e^{-(\tau_{FD} + \bar{\tau})s}. \quad (2.4.1.2)
 \end{aligned}$$

Funkcję transferu statku powietrznego na wysokości przelotowej, sterowanego autopilotem możemy przedstawić jako [227]:

$$W_{AP}(s) = \frac{K_H \omega_\alpha^2}{t_a s (s + \omega_1) (s^2 + 2\xi \omega_2 s + \omega_2^2)},$$

gdzie $t_a, \omega_1, \omega_2, \omega_\alpha, \xi, K_H$ to parametry modelu.

By opisać charakterystykę psychofizjologiczną układu kontroler – pilot, wykorzystamy model nr 3 z tabeli 2.14.

Dodatkowo zakładamy, że $W_{sur} = 1$.

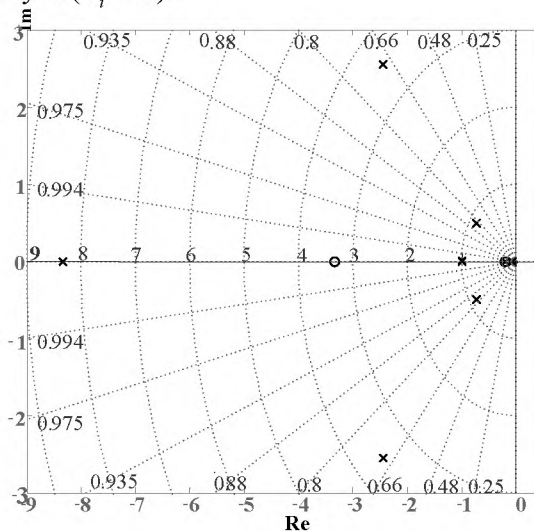
Zastosowanie kryteriów algebraicznych do badania cech stabilności prostych pętli kontroli opisanych w modelu 1 byłoby trudne, ponieważ w przypadku zwiększania wartości składnika opóźnień funkcji transferu w serii potęgowej otrzymalibyśmy wysokiego rzędu równanie cech i wysokiego rzędu wielomian w mianowniku funkcji transferu (2.4.1.2).

Istnieją metody redukcji składników (stron równania) zapewniające odpowiednią dokładność przybliżenia elementów opóźnienia, np. liczba Pada. Jednak znacznie wygodniejszym sposobem badania wpływu opóźnień czasowych na stabilność systemu jest metoda częstotliwości Nyquista [239–241].

W modelowaniu wykorzystano symulację podejścia do lądowania regionalnego samolotu pasażerskiego Boeing 737.

Modelowanie przeprowadzono w środowisku oprogramowania MATLAB, z wykorzystaniem pakietu programów Control System Toolbox [228].

Modelowanie pokazało ujemne wartości wszystkich pierwiastków równań wyników (ilustracja 2.85) w systemie otwartym ($\tau_i = 0$).



Ilustracja 2.85. Położenie pierwiastków równań cech w systemie otwartym (2) [244]

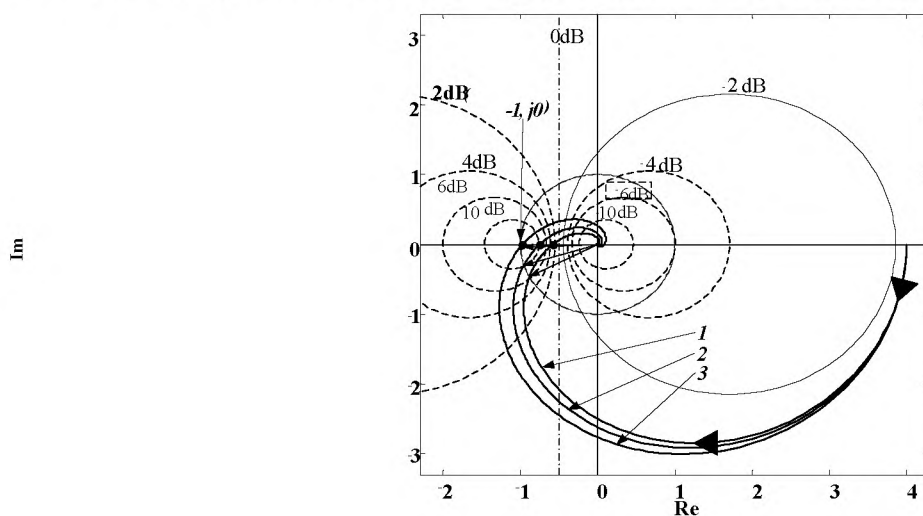
Pozwoliło to wyciągnąć wnioski dotyczące stabilności systemu [17].

Badanie systemów, w których występują opóźnienia, pokazało znaczące zmniejszenie stabilności całego systemu o niestabilnych parametrach kontrolnych.

Wniosek ten dotyczy zarówno systemów ATC charakteryzujących się dużym natężeniem ruchu w strefie kontrolnej, właściwości meteorologicznych środowiska, struktury lotów, jak i innych parametrów urządzeń nadawczych ATC.

Czynniki przedstawione zostały na ilustracji 1, jako połączone modele równoległe do modelu kontrolera, ponieważ każdy z nich obejmuje większą liczbę modeli pilotów i statków powietrznych [239, 241, 243].

Ilustracja 2.86 przedstawia grupę krzywych Nyquista dla systemu (2).



Ilustracja 2.86. Krzywe Nyquista dla wartości opóźnień $\tau_p + \tau_{FD}$ [244]:

- 1 – 0,6 s,
- 2 – 2 s,
- 3 – 4 s

Analiza krzywych wskazuje utratę stabilności systemu przy opóźnieniu 4 s.

Charakterystyka wielojęzycznego kanału łączności oraz jego interakcji z innymi składnikami systemu przynosi rekomendację zmniejszenia krótko- i długoterminowych obciążeń pamięci kontrolerów lotu oraz poprawy efektywności i niezawodności komunikacji między kontrolerami i pilotami.

Analiza istniejących modeli matematycznych systemów, w których człowiek jest operatorem, pokazuje, że jedną ze stałych cech takich systemów jest opóźnienie, odzwierciedlające wpływ obciążeń wynikających z wielojęzyczności na działanie pętli kontroli ruchu lotniczego.

Opóźnienia przejściowe, spowodowane obciążeniami pętli kontroli wynikającymi z wielojęzyczności, w znaczącym stopniu zmniejszają zapas stabilności systemu, co może doprowadzić do nieprzewidzianych krytycznych sytuacji.

By wyeliminować negatywny wpływ opóźnień, należy odpowiednio skorygować charakterystykę fazową składników pętli kontroli [244].

2.4.2. Metodologia analizy procesu decyzyjnego w systemie żeglugi powietrznej

Współcześnie jednym z głównych problemów strategicznych ludzkości na drodze do zrównoważonego rozwoju jest zapewnienie bezpieczeństwa i stabilności produkcji technogenicznej. Produkcja technogeniczna to złożony system, zbudowany z powiązanych ze sobą elementów technicznych, ekonomicznych i społecznych. Charakteryzuje się wielopoziomą hierarchiczną strukturą i wysokim poziomem ryzyka [245]. W ostatnim okresie byliśmy świadkami licznych niespodziewanych i nagłych zdarzeń, takich jak katastrofy, awarie obiektów hydrotechnicznych, chemicznych i wojskowych, rurociągów, elektrowni jądrowych czy wypadki komunikacyjne [246–248].

Również lotnictwo stało się złożonym systemem socjotechnicznym. Interaktywne i współzależne połączenia między ludźmi i technologiami tworzącymi ten system są narażone na te

same zagrożenia środowiskowe. Ogólnie systemy socjotechniczne mają dwie wspólne cechy – nowoczesne technologie i wysoki poziom ryzyka. Jako takie, systemy te wymagają coraz mniej bezpośredniej obsługi (ponieważ technologie zastępują ludzi-operatorów), a coraz więcej zdalnej kontroli (ponieważ operatorzy nadzorują zdalnie działanie technologii); stają się coraz mniej przejrzyste (coraz trudniej jest obserwować dokładnie działanie technologii) i niosą coraz większe zagrożenie oraz ryzyko potencjalnie katastroficznych skutków (np. poważnych wypadków) [249].

Dane statystyczne pokazują, że nawet 80% wypadków w lotnictwie wynika z błędów ludzkich [250]. Dalszy rozwój tradycyjnych metod przeciwdziałania tego typu zdarzeniom, takich jak dodatkowe szkolenia czy zwiększenie dyscypliny pracy, nie przynoszą spodziewanych efektów, ponieważ poziom przygotowania zawodowego personelu lotniczego już dziś jest wystarczający [251]. Coraz częściej przyczyn wypadków lotniczych należy szukać w psychologicznych cechach członków załogi i to im należy poświęcić więcej uwagi.

Współczesne podejście do kontroli niektórych aspektów sytuacji (psychofizjologicznych, behawioralnych, ergonomicznych, zawodowych itd.) rzadko uwzględnia kwestię funkcjonowania człowieka-operatora (human-operator, H-O) w warunkach dynamicznych zmian czynników zewnętrznych i wewnętrznych [250]. Środowisko wpływa znacząco na zachowania H-O i jego reakcję na zmiany warunków otoczenia. Jednym z możliwych sposobów rozwiązania tego typu problemów może być formalizacja i matematyczny opis operatorów systemów żeglugi powietrznej (Air Navigation Systems, ANS) jako złożonych systemów socjotechnicznych, dokonany na podstawie analizy systemowej.

Zapewnienie bezpieczeństwa w złożonych systemach socjotechnicznych, jakim jest lotnictwo, oznacza przede wszystkim zapobieganie zagrożeniom na poziomie operacyjnym, takim jak awarie sprzętu lub błędy personelu [248].

Znajomość wpływu indywidualnych czynników psychologicznych, fizjologicznych, a także społeczno-psychologicznych czynników środowiskowych na człowieka-operatora systemów żeglugi powietrznej (H-O ANS) pozwala przewidzieć jego działania w nagłych, nietypowych sytuacjach. Przewidywania te opierają się na ogólnych wnioskach, wyciągniętych na podstawie indywidualnych działań ludzkich, z wykorzystaniem teorii refleksji [9].

Narzędziami, które mogą ułatwić formalizację zachowań H-O ANS w rozmaitych sytuacjach związanych z lotem, są diagramy ilustrujące modele relacji przyczynowo-skutkowych – wykresy, drzewa oraz funkcjonalne sieci struktur stochastycznych [254]. Do badania procesu podejmowania decyzji przez H-O podczas sytuacji związanych z lotem wykorzystaliśmy sieć stochastyczną typu GERT (Graphical Evaluation and Review Technique). Technika GERT umożliwia modelowanie zarówno bardziej złożonych, jak i prostszych sytuacji związanych z lotem. Jest to alternatywna metoda probabilistyczna planowania sieci, którą można stosować w sytuacjach, w których dane działanie może się rozpocząć dopiero po zakończeniu wcześniejszego działania, obejmująca cykle i pętle [254].

Celem niniejszego rozdziału jest:

- opracowanie metodologii analizy podejmowania decyzji przez H-O ANS;
- zbadanie i formalizacja czynników wpływających na podejmowanie decyzji przez H-O ANS jako złożonego systemu socjotechnicznego;
- stworzenie modelu odzwierciedlającego wybór jednej z dwóch opcji przez H-O ANS w sytuacjach związanych z lotem;
- przeprowadzenie analizy sieci stochastycznej sytuacji związanych z lotem.

Do analizy procesu decyzyjnego H-O ANS w sytuacjach nadzwyczajnych podczas lotu wykorzystaliśmy metodologię przedstawioną w tabeli 2.15.

Tabela 2.15. Metody analizy procesu decyzyjnego H-O ANS w sytuacjach nadzwyczajnych podczas lotu (flight emergencies, FE) [259]

Lp.	Faza analizy	Wynik
1	Wstępna analiza problemu	Wybór sytuacji nadzwyczajnych (FE) do analizy – FE wybrane do analizy (selected for analysis, FE SfA).
		Analiza statystyczna wypadków lotniczych, badanie wybranych FE.
		Analiza literatury i sformułowanie próbki złożonej z 5-7 FE SfA.
2	Technologia pracy H-O (kontrolera, pilota) w FE	Algorytm działań załogi statku powietrznego w FE SfA (według typów samolotów w sformułowanej próbce).
		Algorytm działań kontrolera w FE SfA.
		Schemat algorytmu działań załogi statku powietrznego w FE SfA.
		Schemat algorytmu działań kontrolera w in FE SfA.
3	Wyznaczenie parametrów modelu	Wyznaczenie czasu t_i (t_i'), wymaganego na wykonanie procedury i według algorytmu działań załogi statku powietrznego w FE SfA metodą eksperymentalną (ekspercką).
		Wyznaczenie czasu t_j (t_j'), wymaganego na wykonanie procedury j według algorytmu działań kontrolera w FE SfA metodą eksperymentalną (ekspercką).
		Analiza porównawcza danych z metody eksperymentalnej (t_i, t_i') i eksperckiej (t_j, t_j').
4	Stworzenie graficznych modeli analitycznych (GAM)	GAM sytuacji nadzwyczajnej (FE).
		GAM podejmowania decyzji przez H-O w sytuacji nadzwyczajnej.
		GAM sytuacji podczas lotu.
4.1	Stworzenie deterministycznych modeli procesu decyzyjnego H-O w sytuacjach nadzwyczajnych	Planowanie sieciowe działań załogi statku powietrznego (aircraft crew, AC) w FE SfA: Strukturalny harmonogram działań AC w FE SfA. Wykres sieciowy działań AC w in FE SfA. Czas krytyczny działań AC w FE SfA. Ścieżka krytyczna działań AC w FE SfA. Etapy procesu decyzyjnego H-O służącego rozwiązaniu FE SfA.
		Planowanie sieciowe działań kontrolera w FE SfA: Strukturalny harmonogram działań kontrolera w FE SfA. Wykres sieciowy działań kontrolera w FE SfA. Czas krytyczny działań kontrolera w FE SfA. Ścieżka krytyczna działań kontrolera w FE SfA. Etapy procesu decyzyjnego H-O służącego rozwiązaniu FE SfA.
4.2	Stworzenie modeli stochastycznych procesu decyzyjnego H-O w FE	Analiza strukturalna przebiegu FE SfA. Analiza niepewności modeli. Analiza wpływu przebiegu sytuacji związanych z lotem. Analiza procesu decyzyjnego H-O z wykorzystaniem drzew decyzyjnych. Analiza procesu decyzyjnego H-O z wykorzystaniem sieci stochastycznych. Określenie najmniej ryzykownych przebiegów sytuacji.
4.3	Stworzenie modeli odzwierciedlających wybór jednej z dwóch opcji w procesie decyzyjnym H-O w FE	Analiza systemowa i formalizacja czynników wpływających na proces podejmowania decyzji przez H-O (indywidualnych – psychologicznych, psychofizjologicznych, socjopsychologicznych) podczas sytuacji związanych z lotem, których przebieg grozi zdarzeniem katastroficznym: modele preferencji i znaczenia indywidualnych psychologicznych czynników H-O; modele czynników psychofizjologicznych; modele preferencji i wpływu czynników socjopsychologicznych na H-O. Określenie przewidywanych zagrożeń wynikających z decyzji podjętych przez H-O, na podstawie refleksyjnej teorii wyboru.

Analiza czynników wpływających na proces podejmowania decyzji przez operatora w systemie nawigacji powietrznej

W wyniku wcześniejszych badań wyodrębniliśmy czynniki, które mają wpływ na proces podejmowania decyzji przez H-O ANS: czynniki zawodowe (wiedza, umiejętności, kwalifikacje, doświadczenie) oraz pozazawodowe (indywidualne – psychologiczne, psychofizjologiczne i socjopsychologiczne). Zbadaliśmy również wpływ indywidualnych czynników psychologicznych na działania H-O (pilotów cywilnych i kontrolerów lotniczych) [252].

Nasi respondenci – piloci wojskowi i nawigatorzy w różnym wieku, o różnym doświadczeniu zawodowym – ocenili znaczenie indywidualnych cech psychologicznych (tabela 2.16, ilustracje 2.87–2.88) oraz wpływ czynników socjopsychologicznych na sytuacje decyzyjne w ramach ich działalności zawodowej (tabela 2.17, ilustracja 2.89).

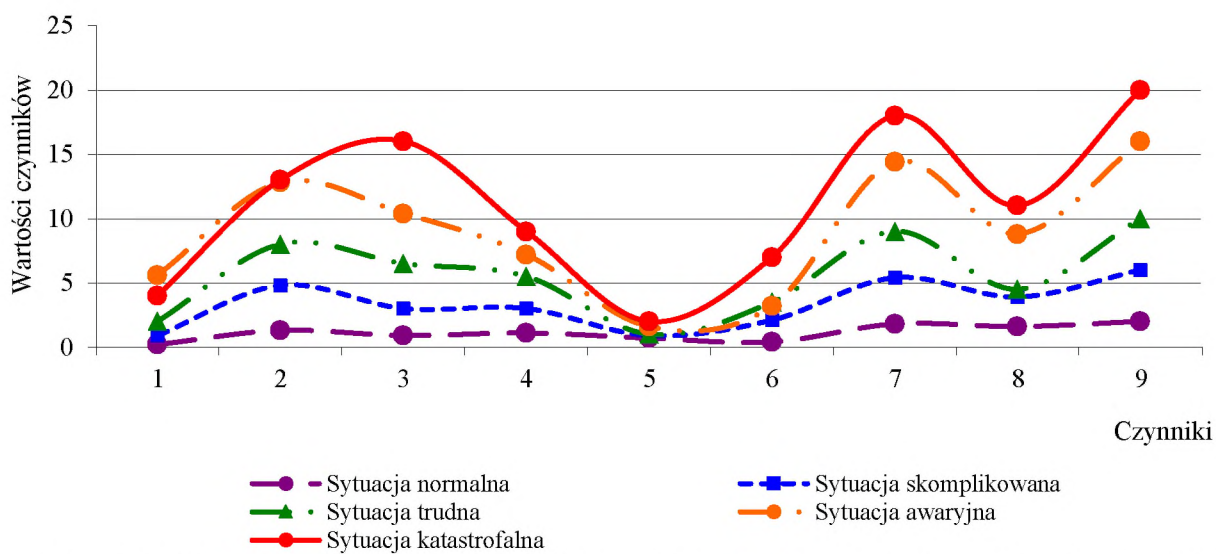
Do analizy indywidualnych czynników psychologicznych wykorzystaliśmy ich zmodyfikowane współczynniki oraz wskaźniki liczbowe, określające cechy jakościowe poziomu zagrożenia w danej sytuacji związanej z lotem, w zależności od jej stopnia skomplikowania [255].

Porównując ich wagę, określiliśmy systemy preferencji czynników pozazawodowych specjalistów w dziedzinie lotnictwa wojskowego.

Dzięki badaniu wpływu indywidualnych czynników psychologicznych oraz czynników socjopsychologicznych na działania H-O ANS uzyskaliśmy również cenne informacje na temat takich elementów osobowości ekspertów lotniczych, jak motywacja zachowań, wartości i priorytety, a także zmiany znaczenia tych dynamicznych składników w poszczególnych fazach procesu decyzyjnego H-O: odbierania informacji, oceny sytuacji, podejmowania decyzji oraz działania.

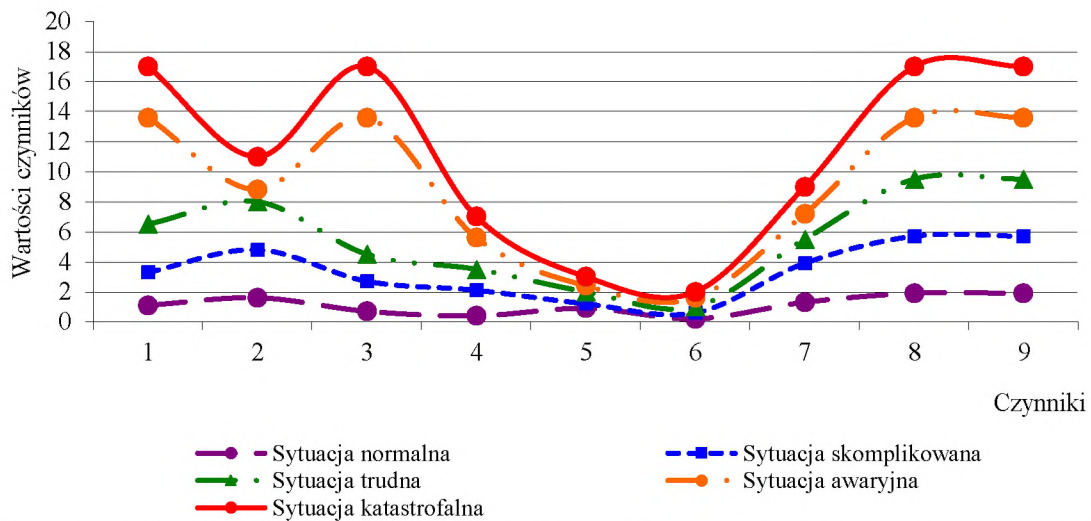
Tabela 2.16. Znaczenie indywidualnych czynników psychologicznych pilotów i nawigatorów wojskowych w różnego rodzaju sytuacjach podczas lotu [259]

Lp.	Indywidualne czynniki psychologiczne	Zmodyfikowane wartości czynników									
		Sytuacja normalna		Sytuacja skomplikowana		Sytuacja trudna		Sytuacja awaryjna		Sytuacja katastrofalna	
		Nawigator	Pilot	Nawigator	Pilot	Nawigator	Pilot	Nawigator	Pilot	Nawigator	Pilot
1	Temperament	0,2	1,1	0,9	3,3	2	6,5	5,6	13,6	4	17
2	Uwaga	1,3	1,6	4,8	4,8	8	8	12,8	8,8	13	11
3	Spostrzegawczość	0,9	0,7	3	2,7	6,5	4,5	10,4	13,6	16	17
4	Sposób myślenia	1,1	0,4	3	2,1	5,5	3,5	7,2	5,6	9	7
5	Wyobraźnia	0,7	0,9	0,9	1,2	1	2	1,6	2,4	2	3
6	Uspokojenie	0,4	0,2	2,1	0,6	3,5	1	3,2	1,6	7	2
7	Intencje	1,8	1,3	5,4	3,9	9	5,5	14,4	7,2	18	9
8	Stan zdrowia	1,6	1,9	3,9	5,7	4,5	9,5	8,8	13,6	11	17
9	Doświadczenie	2	1,9	6	5,7	10	9,5	16	13,6	20	17
	Poziom ryzyka, w jednostkach	10	10	30	30	50	50	80	80	100	100



Ilustracja 2.87. Znaczenie indywidualnych czynników psychologicznych nawigatorów wojskowych w warunkach różnych sytuacji związanych z lotem [259]:

- 1 – temperament,
- 2 – uwaga,
- 3 – spostrzegawczość,
- 4 – sposób myślenia,
- 5 – wyobraźnia,
- 6 – osobowość,
- 7 – intencja,
- 8 – stan zdrowia,
- 9 – doświadczenie

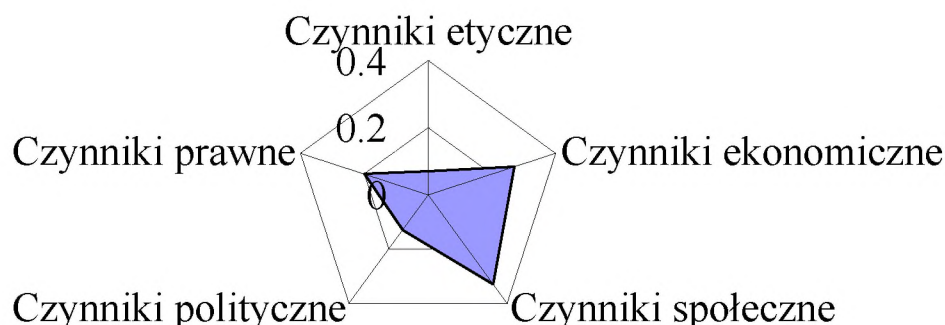


Ilustracja 2.88. Znaczenie indywidualnych czynników psychologicznych pilotów wojskowych w warunkach różnych sytuacji związanych z lotem [259]:

- 1 – temperament,
- 2 – uwaga,
- 3 – spostrzegawczość,
- 4 – sposób myślenia,
- 5 – wyobraźnia,
- 6 – osobowość,
- 7 – intencje,
- 8 – stan zdrowia,
- 9 – doświadczenie

Tabela 2.17. Systemy preferencji według pilotów i nawigatorów wojskowych [259]

Lp.	Czynniki socjopsychologiczne	Piloci			Nawigatorzy		
		Średnia wartość	Waga	Pozycja	Średnia wartość	Waga	Pozycja
1	Czynniki etyczne	4,67	0,07	5	4,75	0,07	5
2	Czynniki ekonomiczne	2,00	0,27	2	2,20	0,27	2
3	Czynniki społeczne	1,00	0,33	1	1,60	0,33	1
4	Czynniki polityczne	4,33	0,13	4	4,20	0,13	4
5	Czynniki prawne	3,00	0,20	3	2,30	0,20	3



Ilustracja 2.89. Wpływ czynników socjopsychologicznych na działania pilotów i nawigatorów wojskowych [259]

Refleksyjny model dwubiegunowego wyboru operatora systemu żeglugi powietrznej w sytuacjach związanych z lotem

W refleksyjnym modelu wyboru dwubiegunowego dokonywanego przez H-O w sytuacjach ekstremalnych [253] otrzymujemy W funkcji pozytywnego i negatywnego wyboru. Model przedstawia podmiot (człowieka-operatora, H-O), który dokonuje wyboru jednej z dwóch alternatywnych opcji: A (opcja pozytywna) lub B (opcja negatywna).

Wybór dokonywany przez H-O ANS możemy przedstawić za pomocą funkcji (2.4.2.1):

$$X = f(x_1, x_2, x_3), \quad (2.4.2.1)$$

gdzie X to prawdopodobieństwo, z jakim H-O jest gotów wybrać pozytywną opcję A w rzeczywistości;

x_1 to presja środowiskowa na H-O, skłaniająca do wyboru opcji pozytywnej, $x_1 \in [0, 1]$;

x_2 to presja wynikająca z wcześniejszych doświadczeń H-O, skłaniająca do wyboru opcji pozytywnej, $x_2 \in [0, 1]$;

x_3 to intencja H-O, by wybrać opcję pozytywną, $x_3 \in [0, 1]$.

Wybór jednej z opcji alternatywnych dokonywany przez H-O jest wynikiem procesu decyzyjnego w sytuacji ryzyka (niepewności stochastycznej). Rozwiązaniem optymalnym jest spełnienie kryterium spodziewanej wartości przy zachowaniu zasady minimalizacji ryzyka (2.4.2.2):

$$A_{opt} = \min \{R_{ij}\}, \quad (2.4.2.2)$$

gdzie R_{ij} to przewidywane ryzyko wyboru rozwiązania A_{ij} , określane za pomocą równania (2.4.2.3):

$$R_{ij} = \sum_{j=1}^m p_{ij} u_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2.4.2.3)$$

gdzie p_{ij} to prawdopodobieństwo wpływu czynnika j w przypadku wyboru alternatywnego rozwiązania i ,

$$\sum_{j=1}^m p_j = 1;$$

ujj to strata, jaka może wynikać z wyboru alternatywnego rozwiązania i pod wpływem czynnika j .

Rozwiązanie alternatywne B to wybór H-O dokonany na podstawie własnego systemu preferencji, który rozumiemy jako określony układ czynników ze zbioru F , tzn. wyeliminowanie niepewności co do wyboru elementu $f^* \in F$, na podstawie reguły wyboru K . Reguła wyboru K opiera się na koncepcji racjonalności zachowania osoby γ i jej systemu preferencji ρ w określonej sytuacji wyboru: $\{\gamma, \rho\} \rightarrow K$.

Czynniki zawodowe \bar{F}_p i pozazawodowe \bar{F}_{np} (2.4.2.4) i (2.4.2.5) mają wpływ na system preferencji H-O ANS:

$$\bar{F}_p = \{\bar{F}_{ed}, \bar{F}_{exp}\}, \quad (2.4.2.4)$$

$$\bar{F}_{np} = \{\bar{F}_{ip}, \bar{F}_{pf}, \bar{F}_{sp}\}, \quad (2.4.2.5)$$

gdzie \bar{F}_{ed} to wiedza, kwalifikacje i umiejętności zdobyte przez H-O podczas szkoleń;

a \bar{F}_{exp} to wiedza, kwalifikacje i umiejętności zdobyte przez H-O podczas kariery zawodowej (doświadczenie);

$\bar{F}_{ip} = \{f_{ipt}, f_{ipa}, f_{ipp}, f_{ipth}, f_{ipi}, f_{ipn}, f_{ipw}, f_{iph}, f_{exp}\}$ to zbiór indywidualnych czynników psychologicznych H-O (temperament, uwaga, spostrzegawczość, sposób myślenia, wyobraźnia, osobowość, intencje, stan zdrowia, doświadczenie);

\bar{F}_{pf} to zbiór psychofizjologicznych czynników H-O (cechy układu nerwowego, typ emocjonalny, socjotyp);

zaś $\bar{F}_{sp} = \{f_{spm}, f_{spe}, f_{sps}, f_{spp}, f_{spl}\}$ to zbiór czynników socjopsychologicznych H-O (czynniki etyczne, ekonomiczne, społeczne, polityczne i prawne).

Na przykład system preferencji pilota o zbiorze indywidualnych czynników psychologicznych \bar{F}_{ip} (ilustracja 2.87), który odzwierciedla obiektywne właściwości decyzji oraz psychologię myślenia H-O podejmującego racjonalne [256] działania w sytuacjach normalnych (2.4.2.6) i katastrofalnych, to (2.4.2.7):

$$\begin{aligned} (f_{iph}, f_{exp}) \succ f_{ipa} \succ f_{ipw} \succ f_{ipt} \succ \\ \succ f_{ipi} \succ f_{ipp} \succ f_{ipth} \succ f_{ipn} \end{aligned}, \quad (2.4.2.6)$$

$$\begin{aligned} (f_{iph}, f_{exp}) \succ (f_{ipt}, f_{ipp}) \succ f_{ipa} \succ \\ \succ f_{ipw} \succ f_{ipth} \succ f_{ipi} \succ f_{ipn} \end{aligned}, \quad (2.4.2.7)$$

gdzie f_{iph} to stan zdrowia,

f_{ipexp} to doświadczenie,

f_{ipa} to uwaga,

f_{ipw} to intencje,

f_{ipt} to temperament,

f_{ipi} to wyobraźnia,

f_{ipp} to spostrzegawczość,

f_{ipth} to sposób myślenia,

a f_{ipn} to osobowość.

W obu przypadkach najważniejszymi czynnikami są stan zdrowia i doświadczenie. Podczas sytuacji związanych z lotem, których przebieg może doprowadzić do katastrofy, rośnie znaczenie takich czynników, jak temperament i umiejętność dostrzegania najważniejszych informacji. Pozostałe indywidualne czynniki psychologiczne pozostają bez zmian.

Otrzymane modele preferencji (ilustracja 2.88) wskazują priorytety pilotów i navigatorów wojskowych w zakresie czynników socjopsychologicznych \bar{F}_{sp} (2.4.2.8):

$$f_{sps} \succ f_{spe} \succ f_{spl} \succ f_{spp} \succ f_{spm} \quad (2.4.2.8)$$

gdzie f_{sps} to czynniki społeczne,

f_{spe} to czynniki ekonomiczne,

f_{spl} to czynniki prawne,

f_{spp} to czynniki polityczne,

a f_{spm} to czynniki etyczne.

Podobnie jak wcześniejsze badania modeli preferencji kontrolerów lotów i pilotów cywilnych [252] również te obejmujące wojskowych pilotów oraz navigatorów wskazują na dominujące znaczenie czynników socjopsychologicznych. Szczegółowa analiza 13 czynników socjopsychologicznych (przekonań religijnych, poglądów filozoficznych, rozwoju zawodowego, reputacji, interesów grup zawodowych, interesów ekonomicznych przedsiębiorstwa, prywatnych korzyści ekonomicznych, interesów rodziny, interesów współpracowników, interesów kierownictwa firmy, wizerunku, poglądów politycznych i reguł prawnych) pokazała, że największy wpływ na zawodową działalność pilotów mają ich własny wizerunek, wizerunek ich przedsiębiorstw oraz interesy ich rodzin. Z kolei ankietowani kontrolerzy wskazywali najczęściej na interesy rodziny, własną sytuację ekonomiczną oraz możliwości rozwoju zawodowego [252].

Analiza sieci stochastycznych przebiegu sytuacji podczas lotu

W sieciach stochastycznych przebiegu sytuacji podczas lotu poszczególne wierzchołki sieci GERT odpowiadają kolejnym stanom w przebiegu sytuacji (normalna, skomplikowana, trudna, awaryjna lub katastrofalna), zaś łuki – procesowi przechodzenia od jednego stanu do drugiego.

Przyjrzyjmy się modelowi sieci stochastycznej przebiegu sytuacji podczas lotu, czyli modelowi GERT $G = (N;A)$ o zbiorze wierzchołków N i zbiorze łuków A . Czas t_{ij} przejścia od sytuacji i do sytuacji j jest zmienną losową. Przejście $(i:j)$ jest możliwe tylko pod warunkiem osiągnięcia wierzchołka i . By obliczyć długość czasu t_{ij} przejścia od sytuacji i do sytuacji j , musimy znać prawdopodobieństwo warunkowe (w przypadkach dyskretnych) lub gęstość rozkładu (w przypadkach ciągłych) zmiennej losowej Y_{ij} . Pozwala to na ocenę działania całej sieci $G = (N;A)$ oraz identyfikację momentów rozkładu czasu t_{ij} w sieci G , obliczenie wartości oczekiwanej μ_{jE} i wariancji czasów realizacji δ^2 w sieci G w przypadku sytuacji skomplikowanych, złożonych, katastrofalnych lub awaryjnych.

Załóżmy, że f_{ij} to prawdopodobieństwo warunkowe (gęstość rozkładu) czasu przejścia od sytuacji G_i do sytuacji G_j . Warunkowa funkcja tworząca momenty zmiennej losowej Y_{ij} definiowana jest wzorem (9):

$$M_{ij}(s) = E \left[e^{sY_{ij}} \right]. \quad (2.4.2.9)$$

W przypadku zmiennych losowych ciągłych i dyskretnych wzór (2.4.2.9) przekształcany jest odpowiednio we wzory (2.4.2.10) i (2.4.2.11):

$$M_{ij}(s) = \int e^{sy_{ij}} f(y_{ij}) dy_{ij}; \quad (2.4.2.10)$$

$$M_{ij}(s) = \sum e^{sy_{ij}} f(y_{ij}). \quad (2.4.2.11)$$

$$\text{Jeśli } y_{ij} = a = \text{const, to } M_{ij}(s) = E \left[e^{sa} \right] = e^{sa}.$$

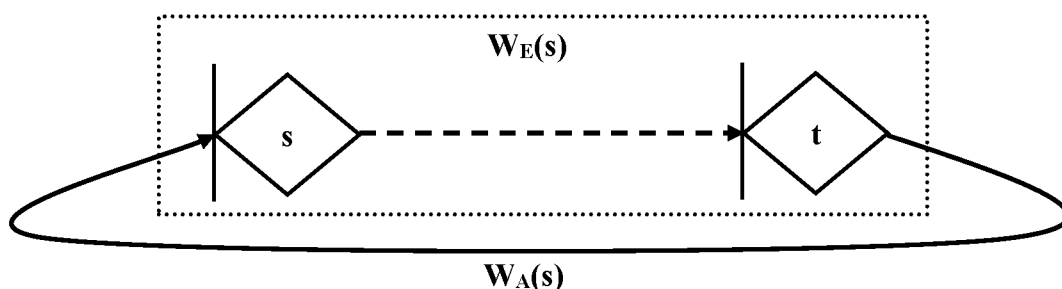
Wprowadźmy funkcję W dla zmiennej losowej Y_{ij} jako współczynnik transmisji sieci GERT (2.4.2.12):

$$W_{ij}(s) = p_{ij}M_{ij}(s), \quad (2.4.2.12)$$

gdzie p_{ij} to prawdopodobieństwo wystąpienia związanej z lotem sytuacji j i przejścia (i,j) ; $M_{ij}(s)$ to warunkowa funkcja tworząca momenty zmiennej losowej Y_{ij} .

Algorytm analizy sieci stochastycznej na przykładzie sieci GERT:

1. Aby otrzymać zamkniętą sieć stochastyczną G , musimy wprowadzić do otwartej sieci stochastycznej $W_E(s)$ fikcyjny łuk o współczynniku transmisji $W_A(s)$, który łączy ujście t otwartej sieci z jej źródłem s (ilustracja 2.90).



Ilustracja 2.90. Sieć GERT [259]:

$W_E(s)$ – współczynnik transmisji otwartej sieci,
 $W_A(s)$ – współczynnik transmisji fikcyjnego łuku,
 s – źródło sieci,
 t – ujście sieci

2. By zmodyfikować sieć G , musimy wyznaczyć wszystkie pętle k , $k = \overline{1, n}$.

3. Obliczamy zastępczy współczynnik transmisji dla wszystkich pętli k sieci G , $k = \overline{1, n}$ (2.4.2.13):

$$T(L_n) = \prod_{k=1}^n T_k = \prod_{k=1}^n \left[\prod_{(i,j) \in L_{k1}} t_{ij} \right], \quad (2.4.2.13)$$

gdzie $T_k = \prod_{(i,j) \in L_{k1}} t_{ij}$ to zastępczy współczynnik transmisji pętli 1 L_{k1} ;

t_{ij} to czas przejścia od związanej z lotem sytuacji i do sytuacji j .

4. Stosujemy regułę Masona do równania topologicznego zamkniętej sieci stochastycznej G (2.4.2.14):

$$H = 1 - \sum T(L_1) + \sum T(L_2) - \sum T(L_3) + \dots + (-1)^k \sum T(L_k) + \dots = 0, \quad (2.4.2.14)$$

gdzie $\sum T(L_k)$ to suma zastępczych wskaźników transmisji dla wszystkich możliwych pętli k .

5. Z topologicznego równania zamkniętej sieci stochastycznej G (14) obliczamy współczynnik transmisji otwartej sieci $W_E(s)$.

6. Wyznaczamy pierwszy i drugi moment zmiennej losowej Y_{ij} (2.4.2.15):

$$\mu_{jE} = \frac{\partial^j}{\partial s^j} [M_E(s)], \quad (2.4.2.15)$$

gdzie μ_{1E} to wartość oczekiwana czasu wykonania w sieci G ,

a μ_{2E} to standardowe odchylenie czasu wykonania w sieci G.

Stąd, za pomocą analizy sieci stochastycznych przebiegu sytuacji związanych z lotem, otrzymujemy:

- oczekiwaną wartość czasu t_{ij} rozwoju sytuacji związanych z lotem;
- wariancję czasu t_{ij} rozwoju sytuacji związanych z lotem;
- prawdopodobieństwo p_{ij} rozwinięcia się sytuacji związanej z lotem.

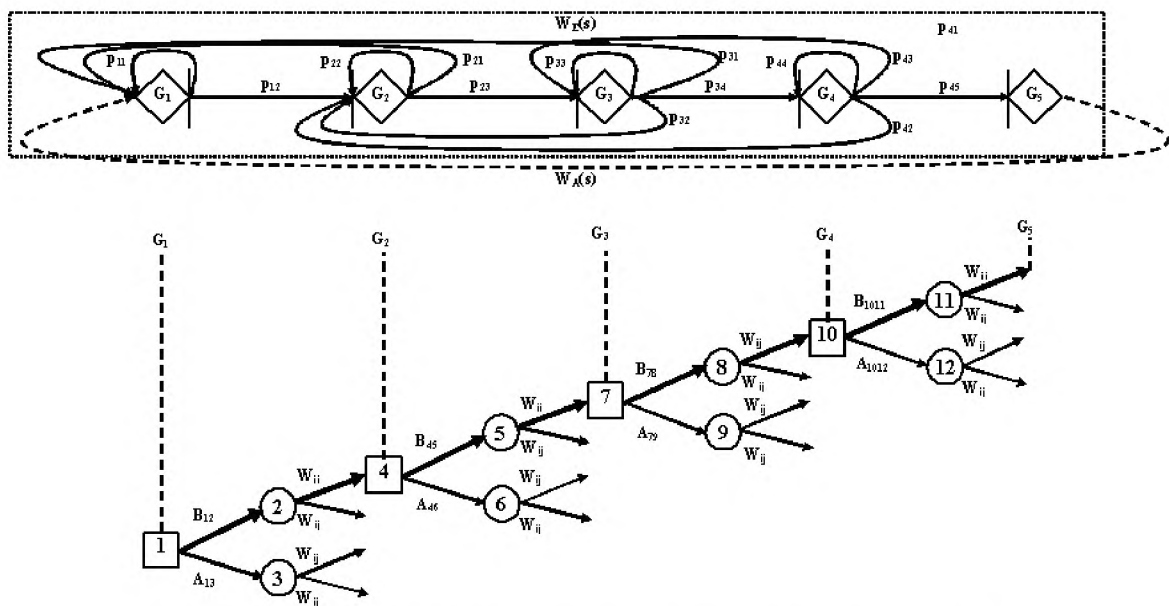
Jako przykład przeprowadzimy analizę rozwoju sytuacji katastrofalnej w niekorzystnych warunkach pogodowych, wykorzystując drzewo decyzji i sieć stochastyczną GERT (ilustracja 2.91). Według danych amerykańskiej Narodowej Rady Bezpieczeństwa Transportu [257] w ciągu ostatnich 10 lat 21,3% wypadków lotniczych było wynikiem warunków meteorologicznych, z czego 39,1% wydarzyło się w złych warunkach pogodowych. Główną przyczyną bezpośrednią wypadków lotniczych w złych warunkach pogodowych (68%) był niewłaściwy i spóźniony proces podejmowania decyzji przez załogi statków powietrznych.

Na podstawie funkcji W, wyboru pozytywnych lub negatywnych opcji przez H-O, stworzono sieć Markowa, rozwoju sytuacji związanych z lotem od normalnych do katastrofalnych (ilustracja 2.92). Proces Markowa obejmujący stany dyskretne W_{ij} nazywany jest procesem śmierci i narodzin [258].

Otrzymało oczekiwane ryzyko R_A, R_B procesu podejmowania decyzji przez H-O podczas podejścia do lądowania w niekorzystnych warunkach pogodowych, pod wpływem środowiska zewnętrznego x_1 , wcześniejszych doświadczeń H-O x_2 oraz intencji H-O x_3 . Oczekiwane ryzyko procesu podejmowania decyzji przez H-O to (2.4.2.16):

$$R_{HP} = \begin{cases} R_A = \min \{R_{ij}\} \\ R_B = \{y, p\} \end{cases} \quad (2.4.2.16)$$

gdzie R_A to oczekiwane ryzyko podejmowania decyzji przez H-O uwzględniające kryterium minimalizacji oczekiwanej wartości, zaś R_B to oczekiwane ryzyko podejmowania decyzji przez H-O uwzględniające jego model preferencji.



Ilustracja 2.91. Graficzny analityczny model rozwoju sytuacji podczas lotu [259]:

□ – wierzchołki decyzyjne,

○ – wierzchołki losowe,

A – wybór opcji pozytywnej,

B – wybór opcji negatywnej,

W_{ij} – funkcja W , współczynnik transmisji łuku (i,j) ,

$W_E(s)$ – współczynnik transmisji otwartej sieci,

$W_A(s)$ – współczynnik transmisji fikcyjnego łuku,

G_1 – sytuacja normalna,

G_2 – sytuacja skomplikowana,

G_3 – sytuacja trudna,

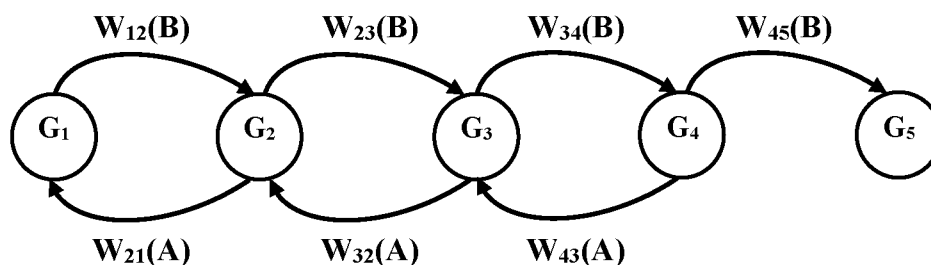
G_4 – sytuacja awaryjna,

G_5 – sytuacja katastrofalna,

p_{ii} ($p_{11}, p_{22}, p_{33}, p_{44}$) – prawdopodobieństwo stabilizacji sytuacji i podczas lotu, $i = \overline{1; n-1}$,

$p_{i(i+1)}$ ($p_{12}, p_{23}, p_{34}, p_{45}$) – prawdopodobieństwo pojawienia się komplikacji w sytuacji i , $i = \overline{1; n-1}$,

$p_{i(i-k)}$ (p_{21}, p_{32}, p_{43} – pętla 1; p_{31}, p_{42} – pętla 2; p_{41} – pętla 3) – prawdopodobieństwo rozwiązania sytuacji awaryjnej, $k = \overline{1;3}$



Ilustracja 2.92. Sieć Markowa rozwoju sytuacji podczas lotu [259]:

G_1 – sytuacja normalna,

G_2 – sytuacja skomplikowana,

G_3 – sytuacja trudna,

G_4 – sytuacja awaryjna,

G_5 – sytuacja katastrofalna,

$W_{ij}(A)$ – współczynnik transmisji łuku (i,j) w przypadku pozytywnego wyboru,

$W_{ij}(B)$ – współczynnik transmisji łuku (i,j) w przypadku negatywnego wyboru

Podczas badań systemu żeglugi powietrznej jako złożonego systemu socjotechnicznego określono metodologię analizy procesu podejmowania decyzji przez człowieka-operatora.

Przeanalizowano znaczenie indywidualnego profilu psychologicznego oraz wpływ czynników socjopsychologicznych na działanie człowieka-operatora podczas rozwoju sytuacji w locie od normalnej do katastrofalnej.

Na podstawie refleksyjnej teorii wyboru dwubiegunowego określono szacowane ryzyko związane z podejmowaniem decyzji przez operatora systemu żeglugi powietrznej pod wpływem warunków zewnętrznych, wcześniejszych doświadczeń oraz własnych intencji.

Opracowano metody analizy procesu decyzyjnego człowieka-operatora systemu żeglugi powietrznej, z wykorzystaniem sieci stochastycznych [259].

2.4.3. Modelowanie zachowań operatorów systemów żeglugi powietrznej podczas sytuacji awaryjnych

Analizując systemy żeglugi powietrznej (Air Navigation System, ANS) z perspektywy zasad ich funkcjonowania, możemy określić je jako systemy socjotechniczne, w których zachodzi bliska

współpraca pomiędzy elementami ludzkimi i technologicznymi [260]. Ważnymi cechami charakteryzującymi systemy socjotechniczne jest obecność różnego rodzaju zagrożeń oraz wykorzystanie zaawansowanych technologii. Ponieważ działania o wysokim poziomie ryzyka / zagrożenia są stosunkowo częste w systemach tego typu, skutki potencjalnych awarii i naruszeń bezpieczeństwa mogą być katastrofalne, prowadząc do utraty majątku, a nawet życia [260]. Im bardziej człowiek-operator (human-operator, H-O) wykorzystuje zaawansowane technologie do kontroli procesów produkcyjnych, szczególnie zdalnej, tym mniej przejrzyste stają się wyniki działania systemu, co wiąże się z podwyższonym ryzykiem wystąpienia potencjalnie katastrofalnych skutków [261].

Systemy wykorzystujące technologie w ogromnej skali, takie jak produkcja energii jądrowej czy lotnictwo, nazywane są często systemami socjotechnicznymi, ponieważ obejmują one skomplikowane sieci połączeń i interakcji pomiędzy składnikami ludzkimi oraz technologicznymi [260]. Większość badań na temat bezpieczeństwa takich systemów dotyczy działania elektrowni jądrowych [262, 263]. W przypadku systemów żeglugi powietrznej zapewnienie bezpieczeństwa łączy się zazwyczaj z realizacją celu zapobiegania zagrożeniom na poziomie operacyjnym, np. takim jak uszkodzenia sprzętu lub błędy personelu technicznego [264]. Utrzymanie bezpieczeństwa lotu w ANS za pomocą zaawansowanych procesów technologicznych zależy przede wszystkim od kompetencji człowieka-operatora (H-O) i jego umiejętności podejmowania właściwych decyzji w odpowiednim czasie.

Jak pokazują dane statystyczne, błędy ludzkie są przyczyną nawet 80% wypadków w lotnictwie [265]. Stosowane obecnie metody analizy poszczególnych aspektów procesu (psychofizjologicznych, behawioralnych, ergonomicznych, zawodowych itd.) nie poświęcają odpowiednio wiele uwagi stanowi funkcjonalnemu H-O w warunkach dynamicznych zmian czynników wewnętrznych i zewnętrznych [251]. Warunki otoczenia z jednej strony często determinują reakcję H-O, a z drugiej strony reakcja ta wpływa na zmianę warunków otoczenia. Przedstawienie ANS jako systemu socjotechnicznego umożliwia przede wszystkim uwzględnienie wpływu środowiska społecznego i kulturowego na podejmujących decyzje operatorów. Kultura otacza nas wszystkich i decyduje o naszych wartościach, przekonaniach i zachowaniach, często wspólnych dla wszystkich członków poszczególnych grup społecznych. Kultura łączy nas w te grupy i podpowiada, w jaki sposób powinniśmy się zachowywać, zarówno w typowych, jak i nietypowych sytuacjach. Psycholog Geert Hofstede uważał, że kultura to „zbiorowe programowanie umysłu” [260]. Dlatego nawet normalni, zdrowi, wysoko zmotywowani i dobrze wyposażeni pracownicy mogą popełniać krytyczne błędy [260, 266]. Rosyjscy naukowcy analizujący zdarzenia lotnicze użyli niedawno sformułowania „brak sumienia”, mówiąc o przyczynach sytuacji niebezpiecznych spowodowanych brakiem dostatecznie rozwiniętych wartości kulturowych u osób podejmujących decyzję [265].

Jedną z możliwych metod rozwiązania tego typu problemów jest formalizacja i matematyczne przedstawienie działań operatorów ANS, w formie złożonych systemów socjotechnicznych, na podstawie analizy systemowej. Uwzględnienie w procesie podejmowania decyzji (decision making, DM) przez H-O w ANS nie tylko czynników zawodowych (takich jak wiedza, nawyki, umiejętności czy doświadczenie), ale także aspektów pozazawodowych (takich jak indywidualne cechy psychologiczne, a także elementy psychofizjologiczne i socjopsychologiczne) [267, 268, 279] pozwala przewidzieć działania H-O na podstawie przeprowadzonego modelowania prognozowanych „wielkoskalowych” efektów indywidualnych działań [260] za pomocą teorii refleksyjnej [270].

Podejście systemowe wymaga zbadania wszystkich współzależnych składników systemu żeglugi i uznania, że zmiany w jednej sferze mogą wpływać na funkcjonowanie w innej (trudnej do przewidzenia) sferze [260 261].

Do formalizacji zachowań H-O ANS w sytuacjach związanych z lotem najbardziej odpowiednie są modele prezentujące proces pojawiania się kolejnych okoliczności i ich rozwoju w przyczynowo-skutkowym łańcuchu zdarzeń w formie odpowiednich diagramów relacji przyczynowo-skutkowych.

Najczęściej stosowane obecnie rodzaje diagramów to różnego rodzaju wykresy (stanów obecnych i przejściowych), drzewa zdarzeń, a także funkcjonalne sieci o strukturze stochastycznej [271–273].

Celem niniejszego rozdziału jest:

- zbadanie procesu podejmowania decyzji przez operatora systemu żeglugi powietrznej oraz analiza systemowa i formalizacja wpływu poszczególnych czynników na proces decyzyjny w ANS, traktowanym jako złożony system socjotechniczny;
- opracowanie modeli procesu podejmowania decyzji (DM) przez operatora w socjotechnicznym systemie żeglugi powietrznej (DM w warunkach pewności, DM w warunkach ryzyka i DM w warunkach niepewności, modele sieci neuronowych);
- stworzenie programu komputerowego ułatwiającego wybór optymalnych rozwiązań umożliwiających kontynuację i bezpieczne zakończenie lotu statku powietrznego w nietypowych sytuacjach.

Badanie procesu podejmowania decyzji przez operatora systemu żeglugi powietrznej i analiza systemowa czynników

Aby uwzględnić całą grupę czynników, które wpływają na decyzje operatora (H-O) systemu żeglugi powietrznej (ANS) w przewidywanych i nieprzewidywanych warunkach działania statku powietrznego (AC), opracowano model procesu podejmowania decyzji (DM) przez H-O (ilustracja 2.83). W ramach wcześniejszych badań wyodrębniono czynniki, które mają największy wpływ na proces decyzyjny operatora systemu żeglugi powietrznej, takie jak poziom wiedzy, umiejętności, zdolności oraz doświadczenie, a także czynniki pozazawodowe (psychofizjologiczne, indywidualne psychologiczne oraz społeczno-psychologiczne) [269].

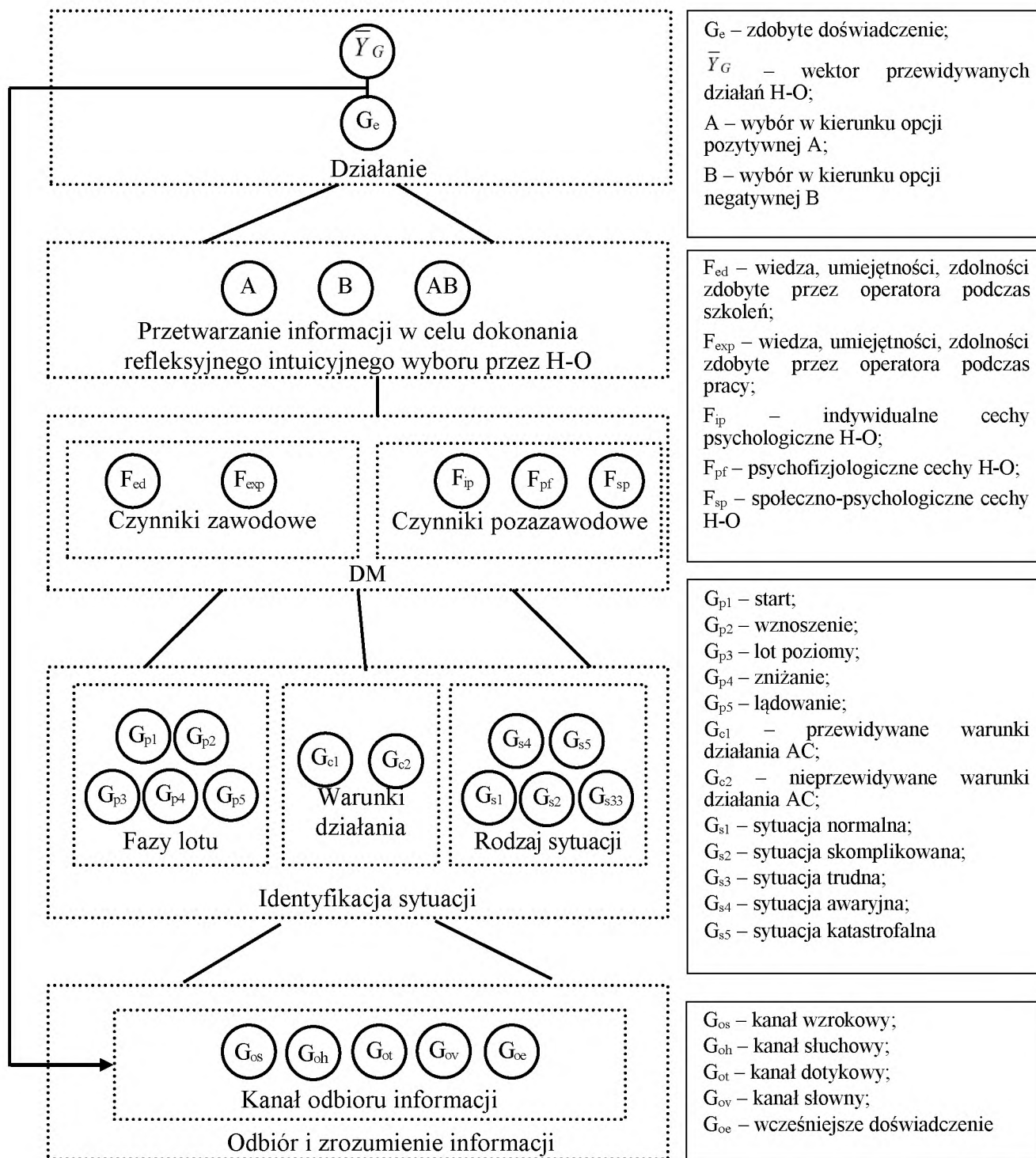
Autorzy przeprowadzili również analizę systemową oraz dokonali formalizacji czynników wpływających na DM przez H-O (indywidualnych psychologicznych, psychofizjologicznych oraz społeczno-psychologicznych) w warunkach zmiany sytuacji podczas lotu z normalnej na katastrofalną, by opracować [269]:

- modele preferencji H-O pod wpływem czynników społeczno-psychologicznych;
- modele preferencji H-O w zależności od znaczenia indywidualnych czynników psychologicznych, w warunkach zmiany sytuacji podczas lotu z normalnej na katastrofalną;
- modele diagnostyczne czynników psychofizjologicznych umożliwiające monitorowanie stanu emocjonalnego H-O.

W wyniku wykonanej analizy czynników społeczno-psychologicznych autorzy wyciągnęli wniosek, iż największy wpływ na działania pilotów mają takie aspekty, jak własny wizerunek,

wizerunek przedsiębiorstwa, a także interes własnej rodziny.

Druga grupa badanych – kontrolerzy ruchu lotniczego – zwraca szczególną uwagę na interes własnej rodziny, swój status ekonomiczny oraz rozwój zawodowy. Analiza priorytetów w sytuacjach, w których piloci i dyspozytorzy podejmują decyzje wspólnie, pozwoliła opracować model obejmujący następujące czynniki: społeczne i ekonomiczne priorytety każdej z osób; ich poglądy polityczne i normy prawne; zaplecze duchowe i kulturalne, wpływające na indywidualne czynniki psychologiczne; oraz najważniejsze – zdrowie i doświadczenie. W warunkach sytuacji związanych z lotem, których przebieg może doprowadzić do katastrofy, rośnie znaczenie takich czynników, jak temperament i umiejętność zrozumienia informacji [268, 269]. Badanie wpływu indywidualnych czynników psychologicznych oraz czynników społeczno-psychologicznych na działania H-O ANS pozwoliło zgromadzić dane na temat takich aspektów osobowości ekspertów lotniczych, jak motywacja zachowań, wartości i priorytety, a także zmiany znaczenia tych dynamicznych składników w poszczególnych fazach procesu decyzyjnego H-O.



Ilustracja 2.83. Model procesu podejmowania decyzji przez H-O ANS [274]

Modelowanie procesu podejmowania decyzji przez operatora systemu żeglugi powietrznej w warunkach pewności, ryzyka i niepewności

Prześledzenie metod modelowania procesów decyzyjnych specjalistów w dziedzinie lotnictwa w typowych i nietypowych sytuacjach pozwoliło autorom stworzyć następujące modele:

1. Procesu podejmowania decyzji (DM) przez operatora (H-O) systemu żeglugi powietrznej (ANS)

w sytuacji awaryjnej podczas lotu (FE), w warunkach pewności. Analiza sieciowa działań załóg statków powietrznych (AC) i kontrolerów ruchu lotniczego w sytuacjach awaryjnych, przeprowadzona przy użyciu metod planowania sieciowego, przyniosła następujące efekty [271]:

- tabelę ilustrującą strukturę i czasy działań H-O (kontrolera, pilota) w FE;
- wykres sieciowy działań podejmowanych przez H-O (kontrolera, pilota) w FE;
- krytyczne czasy podejmowania działań przez H-O (kontrolera, pilota) w FE;
- uzyskane modele działań H-O (kontrolera) przedstawione zostały w tabeli 2.18 i na ilustracji 2.84; opracowano je na podstawie przyjętych technologii działania kontrolerów w FE [259, 272].

Podczas analizy określono również krytyczne czasy wykonywania kolejnych działań przez kontrolera w takich sytuacjach awaryjnych, jak: awaria silnika podczas startu, spadek ciśnienia w kabinie samolotu, defekty układu hydraulicznego czy awaria układu zasilania; a także krytyczne czasy wykonywania działań przez załogę samolotu w przypadku awarii silnika podczas startu i podejścia do lądowania w niekorzystnych warunkach meteorologicznych.

2. Procesu podejmowania decyzji przez H-O w FE w warunkach ryzyka. Analiza strukturalna rozwoju FE oraz procesu DM przez załogę samolotu i kontrolera ruchu lotniczego, wykonana z wykorzystaniem drzewa decyzji przyniosła następujące rezultaty:

- graficzno-analityczne modele rozwoju FE i procesu podejmowania decyzji przez H-O (kontrolera, pilota) w FE [267, 17];
- stochastyczne modele sieci typu GERT, drzew decyzji oraz łańcuchów Markowa [268, 269, 273];
- refleksyjne modele wyboru dwubiegunowego w sytuacji awaryjnej pod wpływem warunków zewnętrznych, wcześniejszych doświadczeń oraz intencji H-O.

Za pomocą dwubiegunowego refleksyjnego modelu zachowań H-O w sytuacjach ekstremalnych [270] badacze wyznaczyli funkcję W wyboru pozytywnego i negatywnego. Model reprezentuje podmiot (H-O) tuż przed wyborem jednej z alternatywnych opcji: A (pozytywnej) lub B (negatywnej).

Wybór H-O ANS opisuje funkcja:

$$X = f(x_1, x_2, x_3),$$

gdzie X to prawdopodobieństwo, z jakim H-O jest gotów do wyboru pozytywnej opcji A w rzeczywistości;

x_1 to występująca w momencie podejmowania decyzji przez H-O presja ze strony zewnętrznego środowiska na wybór pozytywnej opcji:

$$x_1 \in [0, 1];$$

x_2 to występująca w momencie podejmowania decyzji przez H-O presja na wybór pozytywnej opcji, wynikająca z wcześniejszych doświadczeń:

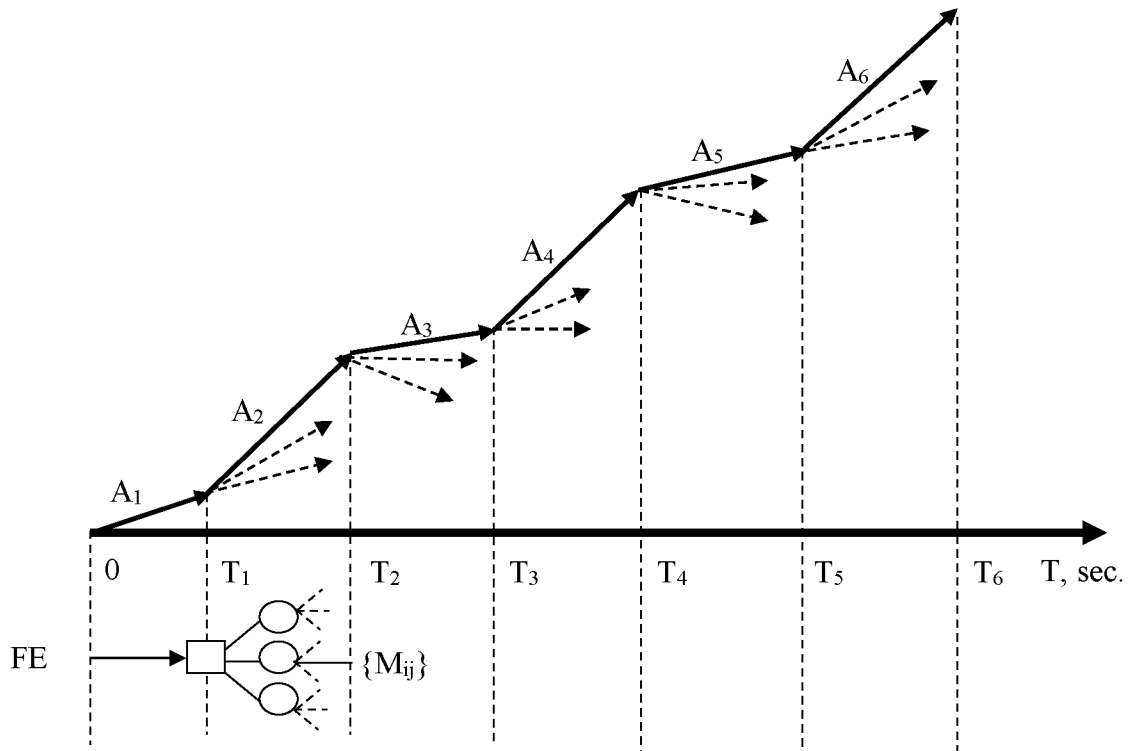
$$x_2 \in [0, 1];$$

x_3 to występująca w momencie podejmowania decyzji intencja H-O, by wybrać opcję pozytywną (wybór intencjonalny):

$$x_3 \in [0, 1].$$

Tabela 2.18. Ogólna struktura, czasy i technologie działania kontrolera ruchu lotniczego w FE [274]

Rodzaj działania	Symbol działania	Zestaw operacji	Wykorzystuje działania	Czas wykonania działania
Odbiór informacji od załogi AC o wystąpieniu FE	A_1	$\{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}\}$	–	$\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$
Wysłanie potwierdzenia odbioru informacji do załogi AC	A_2	$\{a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}\}$	A_1	$\{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2n}\}$
Przesłanie informacji do odpowiednich służb	A_3	$\{a_{31}, a_{32}, \dots, a_{3n}\}$	$A_1 \cap A_2$	$\{t_{31}, t_{32}, \dots, t_{3n}\}$
Odbiór decyzji od kapitana AC	A_4	$\{a_{41}, a_{42}, \dots, a_{4n}\}$	$A_1 \cup A_2 \cup A_3$	$\{t_{41}, t_{42}, \dots, t_{4n}\}$
Zapewnienie warunków do bezpiecznego zakończenia lotu	A_5	$\{a_{51}, a_{52}, \dots, a_{5n}\}$	$A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4$	$\{t_{51}, t_{52}, \dots, t_{5n}\}$
Odbiór informacji o wyniku lądowania od załogi AC	A_6	$\{a_{61}, a_{62}, \dots, a_{6n}\}$	$A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4 \cap A_5$	$\{t_{61}, t_{62}, \dots, t_{6n}\}$



Ilustracja 2.84. Wykres sieciowy pokazujący działania kontrolera ruchu lotniczego w ANS [274]:
 A_1 – A_6 – operacje wykonywane przez kontrolera według sprawdzonych metod;
 $\{M_{ij}\}$ – zbiór scenariuszy rozwoju sytuacji podczas lotu, zgodnie z modelem stochastycznym

Podczas analizy określono również przewidywane ryzyko (R_A , R_B) procesu decyzyjnego w systemie żeglugi powietrznej, wynikające z wpływu środowiska zewnętrznego (x_1), wcześniejszych doświadczeń H-O (x_2) oraz intencji H-O (x_3). Przewidywane ryzyko procesu podejmowania decyzji przez H-O jest równe:

$$R_{DM} = \begin{cases} R_A = \min \{R_{ij}\} \\ R_B = \{\gamma, \rho\} \\ R_{AB} = \{X(x_1, x_2, x_3), \gamma, \rho\} \end{cases}$$

gdzie R_A to przewidywane ryzyko procesu decyzyjnego H-O, uwzględniające kryterium przewidywanej minimalizacji wartości;

R_{ij} to przewidywane ryzyko podjęcia decyzji A_{ij} ;

R_B to przewidywane ryzyko procesu decyzyjnego H-O uwzględniające jego model preferencji;

γ to koncepcja racjonalnego zachowania jednostki podejmującej decyzję;

ρ to system preferencji jednostki w konkretnej sytuacji wyboru;

R_{AB} to wybór mieszany dokonany przez H-O.

System preferencji H-O ANS jest wynikiem wpływu czynników zawodowych \bar{F}_p i pozazawodowych \bar{F}_{np} [11]:

$$\bar{F}_p = \{\bar{F}_{ed}, \bar{F}_{exp}\};$$

$$\bar{F}_{np} = \{\bar{F}_{ip}, \bar{F}_{pf}, \bar{F}_{sp}\},$$

gdzie \bar{F}_{ed} to wiedza, umiejętności i zdolności zdobyte przez H-O w ramach szkoleń;

\bar{F}_{exp} to wiedza, umiejętności i zdolności zdobyte przez H-O podczas pracy;

$\bar{F}_{ip} = \{f_{ipt}, f_{ipa}, f_{ipp}, f_{ipth}, f_{ipim}, f_{ipn}, f_{ipin}, f_{iph}, f_{exp}\}$ to zbiór indywidualnych cech psychologicznych H-O (temperament, uwaga, spostrzegawczość, sposób myślenia, osobowość, intencje, stan zdrowia, doświadczenie);

\bar{F}_{pf} to zbiór psychofizjologicznych cech H-O (cechy systemu nerwowego, typ emocjonalny, socjotyp);

$\bar{F}_{sp} = \{f_{spm}, f_{spe}, f_{sps}, f_{spp}, f_{spl}\}$ to zbiór społeczno-psychologicznych cech H-O (poglądów etycznych, ekonomicznych, społecznych, politycznych, prawnych).

Obliczenie jednego ze scenariuszy sytuacji podczas lotu przedstawia ilustracja 3 (np. podejścia wykonywanego w niekorzystnych warunkach pogodowych) [10, 11].

Wyniki obliczeń dotyczących przewidywanego ryzyka podczas przejścia od jednej sytuacji w locie do innej oraz kryterium przewidywanej wartości, wykonanych z wykorzystaniem metody programowania dynamicznego prezentuje tabela 2.19.

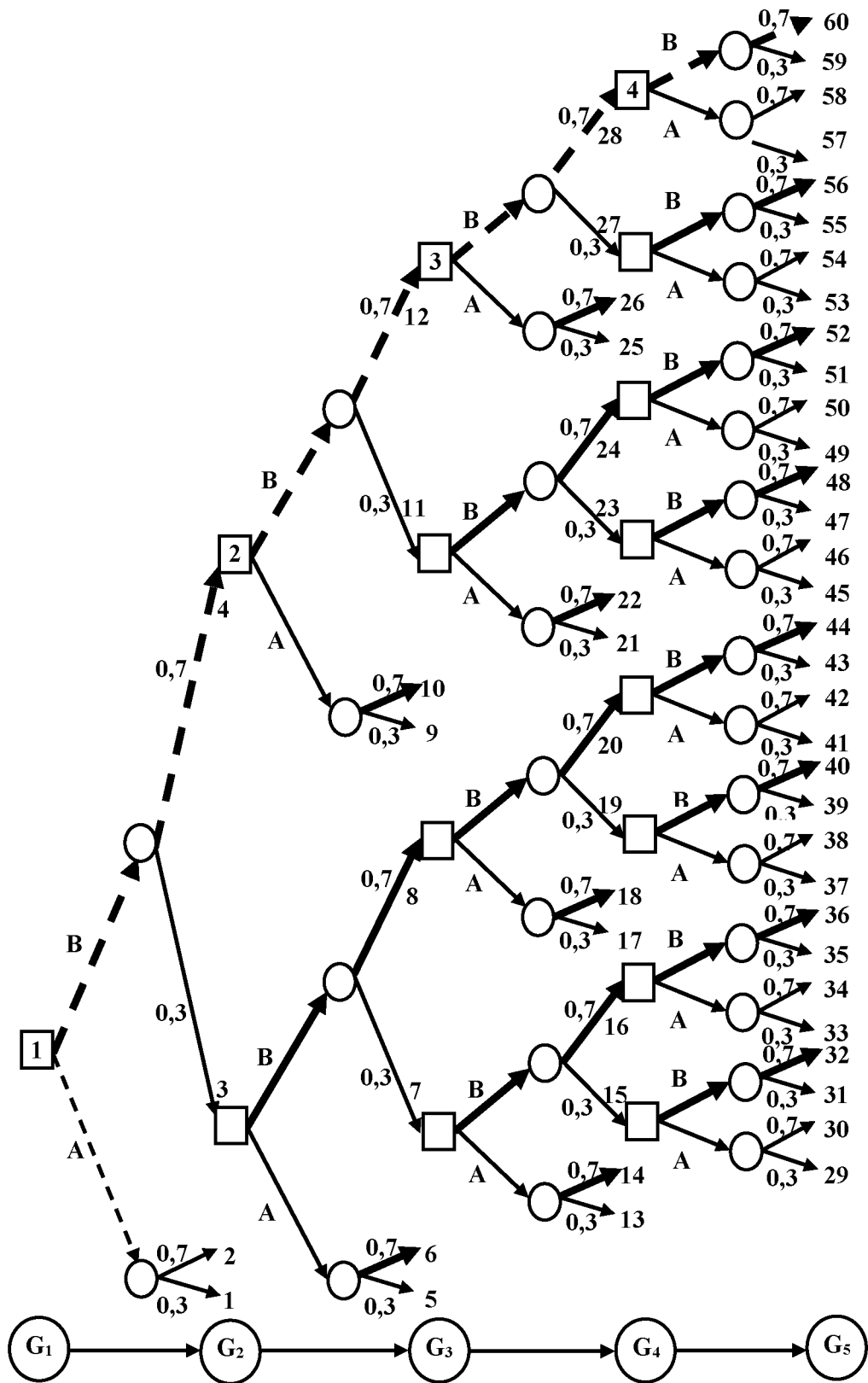
Z kolei ilustracja 2.85 pokazuje przykład obliczeń przewidywanego ryzyka podczas przejścia od jednej sytuacji w locie do innej.

Wybór negatywnej opcji zgodnie ze scenariuszem $S_{1-2-3-4B}$ prowadzi do maksymalnego przewidywanego ryzyka $R = 1028$ jednostek konwencjonalnych (conventional units, c.u.). Za to wybór pozytywnej opcji przez H-O ANS już w pierwszej fazie procesu decyzyjnego w sytuacji awaryjnej (np. skierowanie samolotu na lotnisko rezerwowe w przypadku trudnych warunków

meteorologicznych) oznacza ryzyko 60,5 razy mniejsze: $R = 17$ c.u.

Tabela 2.19. Rezultaty obliczeń poszczególnych scenariuszy rozwoju sytuacji podczas lotu [274]

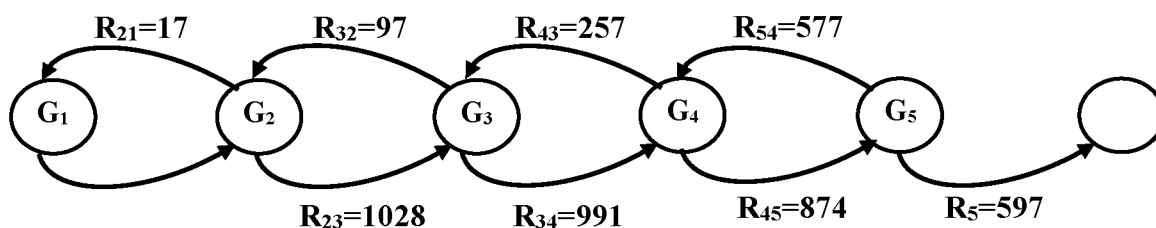
Scenariusze, S	Prawdopodobieństwo, p	Skutki, U	Przewidywane ryzyko, R, c.u.
S _{4B}	0,7	60	597
	0,3	59	
S _{3-4B}	0,7	28	874
	0,3	27	
S _{2-3-4B}	0,7	12	991
	0,3	11	
S _{1-2-3-4B}	0,7	4	1 028
	0,3	3	
S _{1A}	0,7	2	17
	0,3	1	



Ilustracja 2.85. Przykład obliczeń w przypadku jednego ze scenariuszy rozwoju sytuacji podczas lotu [274]:

A, B – wybór odpowiednio pozytywnej lub negatywnej opcji,

G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – kolejno sytuacja normalna, skomplikowana, trudna, awaryjna i katastrofalna



Ilustracja 2.86. Łańcuch Markowa pokazujący rozwój sytuacji podczas lotu [274]:

G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – kolejno sytuacja normalna, skomplikowana, trudna, awaryjna i katastrofalna,
 R_{ij} – wielkość ryzyka podczas zmiany sytuacji lotu

3. Procesu podejmowania decyzji przez H-O w FE w warunkach niepewności. Badacze przeprowadzili analizę rozwoju FE oraz procesu decyzyjnego załogi AC i kontrolera ruchu lotniczego, wykorzystując kryteria Minimax, Laplace's, Savage'a i Hurwicza. Dzięki tej analizie opracowali modele procesu decyzyjnego H-O w FE w warunkach niepewności.

Macierz możliwych wyników procesu podejmowania decyzji przez H-O ANS w FE została przedstawiona w tabeli 2.20. Określając skutki rozwoju sytuacji podczas lotu u_{ij} , badacze wykorzystali teorię refleksyjną.

Modele rozwoju różnych sytuacji podczas lotu mogą służyć jako narzędzie wsparcia procesów decyzyjnych, ponieważ pozwalają one operatorom systemów żeglugi powietrznej oszacować numerycznie możliwe wersje rozwoju FE i odpowiednio wcześniej wybrać strategię działania minimalizującą potencjalne straty, w warunkach niepewności lub ograniczonego dostępu do informacji.

Oprogramowanie komputerowe do optymalizacji wyboru alternatywnych wariantów

Model sieci neuronowej służący ocenie efektywności potencjalnych alternatywnych możliwości zakończenia lotu stworzony przez nas na bazie dwuwarstwowej sieci perceptronowej (ilustracja 2.87) różni się od wykorzystywanych najczęściej, ponieważ umożliwia określenie z dużą dokładnością poziomu potencjalnych strat, dzięki temu, iż uwzględnia wpływ rozmaitych czynników, o różnym znaczeniu z punktu widzenia wyboru miejsca przymusowego lądowania.

Parametry wejściowe modelu w formie sztucznej sieci neuronowej to czynniki charakteryzujące potencjalne alternatywne opcje zakończenia lotu (tabela 2.21).

Każdy z parametrów wejściowych posiada odpowiadający mu wektor binarny, odzwierciedlający istnienie (1) lub brak (0) danego czynnika.

Wielkość potencjalnej straty, wynikającej z wyboru określonej opcji w warunkach ograniczonych możliwości kontynuacji lotu, służy jako kryterium efektywności alternatywnych opcji zakończenia lotu:

$$Y_{Gaer} = f_G([\bar{B} \cup \bar{C}]W_{BC,G});$$

$$Y_{Glf} = f_G([\bar{D} \cup \bar{E} \cup \bar{F}]W_{DEF,G}),$$

gdzie f_G to funkcja aktywująca stosowana elementarnie do poszczególnych składników rzędu wektorów znajdującego się w nawiasie.

Efektywność zależęć będzie od rodzaju potencjalnego miejsca lądowania, a także od charakteryzujących go czynników. Optymalny wariant zakończenia lotu przy minimalnym poziomie ryzyka określany jest za pomocą minimalizowania potencjalnych strat, według wzoru:

$$Y_{Gopt} = \min f_G(\bar{G}).$$

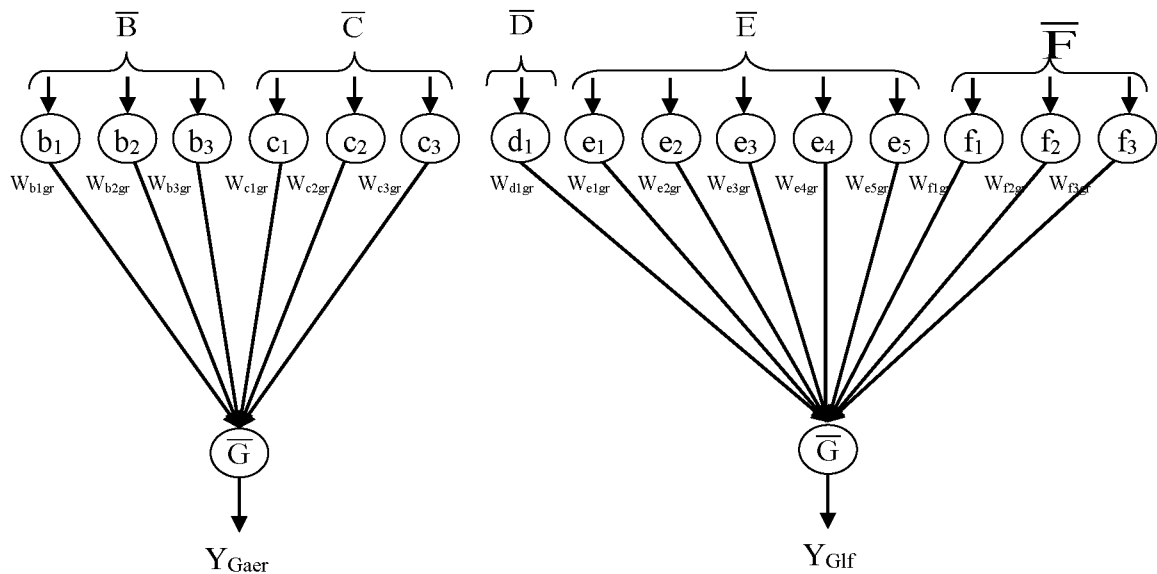
Tabela 2.20. Macierz potencjalnych wyników procesu podejmowania decyzji przez H-O ANS w FE [274]

Wybór alternatywnych opcji	Czynniki		
	Presja ze strony	Presja wynikająca	Wybór

	zewnątrznego środowiska H-O	z wcześniejszych doświadczeń H-O	intencjonalny (intencja) H-O
A – wybór opcji pozytywnej	u_{11}	u_{12}	u_{13}
B – wybór opcji negatywnej	u_{21}	u_{22}	u_{23}

Tabela 2.21. Parametry sztucznej sieci neuronowej (ANW) [274]

Parametry wejściowe ANW – cechy potencjalnego miejsca lądowania (lotnisko, lądowisko)			
Lotnisko	\bar{B}	$\bar{B} = \{b_i\}, i = \overline{1,3}$	Poziom techniczny lotniska
	\bar{C}	$\bar{C} = \{c_j\}, j = \overline{1,3}$	Możliwość lądowania w danych warunkach meteorologicznych
Lądowisko	\bar{D}	$\bar{D} = \{d_k\}, k = \overline{1,1}$	Typ lądowiska
	\bar{E}	$\bar{E} = \{e_l\}, l = \overline{1,5}$	Rodzaj podłoża
	\bar{F}	$\bar{F} = \{f_m\}, m = \overline{1,3}$	Możliwość lądowania w danych warunkach meteorologicznych
Kryterium efektywności – wielkość potencjalnych strat			
$\bar{G} = \{g_r\}, r = \overline{1,5}$	g_1	Zużycie paliwa – 10 jednostek	Bardzo mała strata
	g_2	Incydent – 30 jednostek	Mała strata
	g_3	Awaria – 50 jednostek	Średnia strata
	g_4	Wypadek – 80 jednostek	Duża strata
	g_5	Katastrofa – 100 jednostek	Bardzo duża strata
Efekty ANW – alternatywne opcje zakończenia lotu Y_G			
Lotnisko	Y_{Gaer}	$f_G([\bar{B} \cup \bar{C}]W_{BC,G})$	Efektywność zakończenia lotu na lotnisku
Lądowisko	Y_{Glf}	$f_G([\bar{D} \cup \bar{E} \cup \bar{F}]W_{DEF,G})$	Efektywność zakończenia lotu na lądowisku



a

b

Ilustracja 2.87. Model sieci neuronowej sytuacji, w których potencjalnymi alternatywnymi opcjami miejsca zakończenia lotu są lotnisko (a) lub lądowisko (b) [274]:

\bar{B} , \bar{C} , \bar{D} , \bar{E} , \bar{F} – cechy charakterystyczne potencjalnych miejsc lądowania,

\bar{G} – potencjalna strata,

W – współczynniki wagi sieci neuronowej,

Y_G – efektywność zakończenia lotu

Model sieci neuronowej został wykorzystany do stworzenia specjalistycznego oprogramowania „Prompt” [273], którego zadaniem jest wspieranie systemu nawigacji powietrznej i ułatwienie podejmowania w odpowiednim czasie decyzji operacyjnych dotyczących wyboru optymalnej strategii zakończenia lotu w nietypowych sytuacjach, wymagających lądowania awaryjnego.

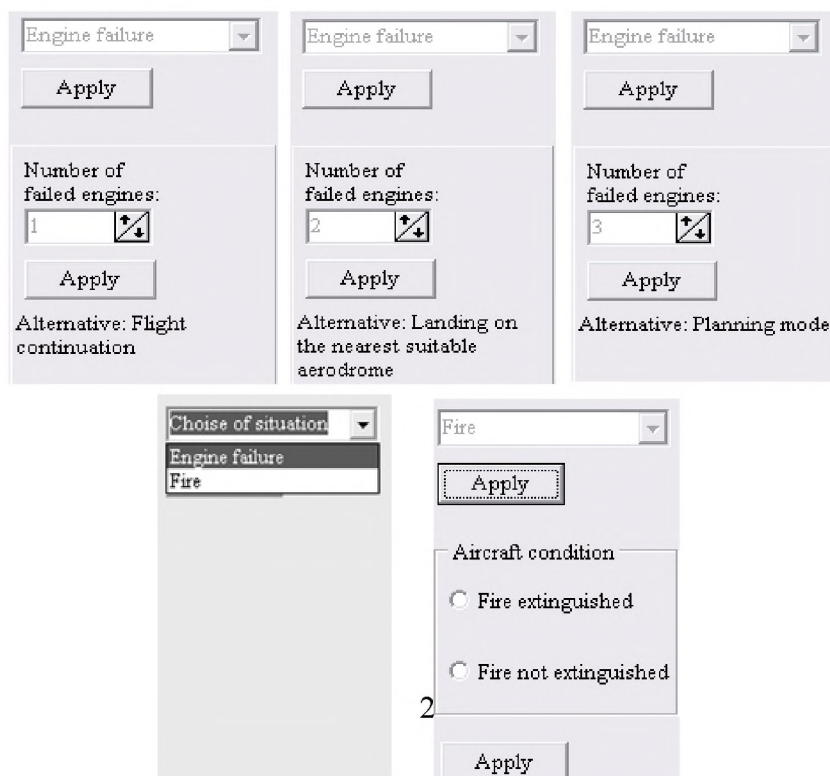
Program „Prompt” powstał z użyciem systemu graficznego ze środowiska Delphi 5, wykorzystywanego do tworzenia oprogramowania, opartego na specjalnej wersji języka Pascal – Object Pascal i spełniającego wszystkie zasady programowania obiektowego.

Oprogramowanie „Prompt” dzieli się na podsystemy służące formułowaniu strategii działań, przewidywaniu rozwoju sytuacji, definiowaniu właściwości alternatywnych wariantów zakończenia lotu, ocenie efektywności poszczególnych opcji i identyfikowaniu optymalnych decyzji.

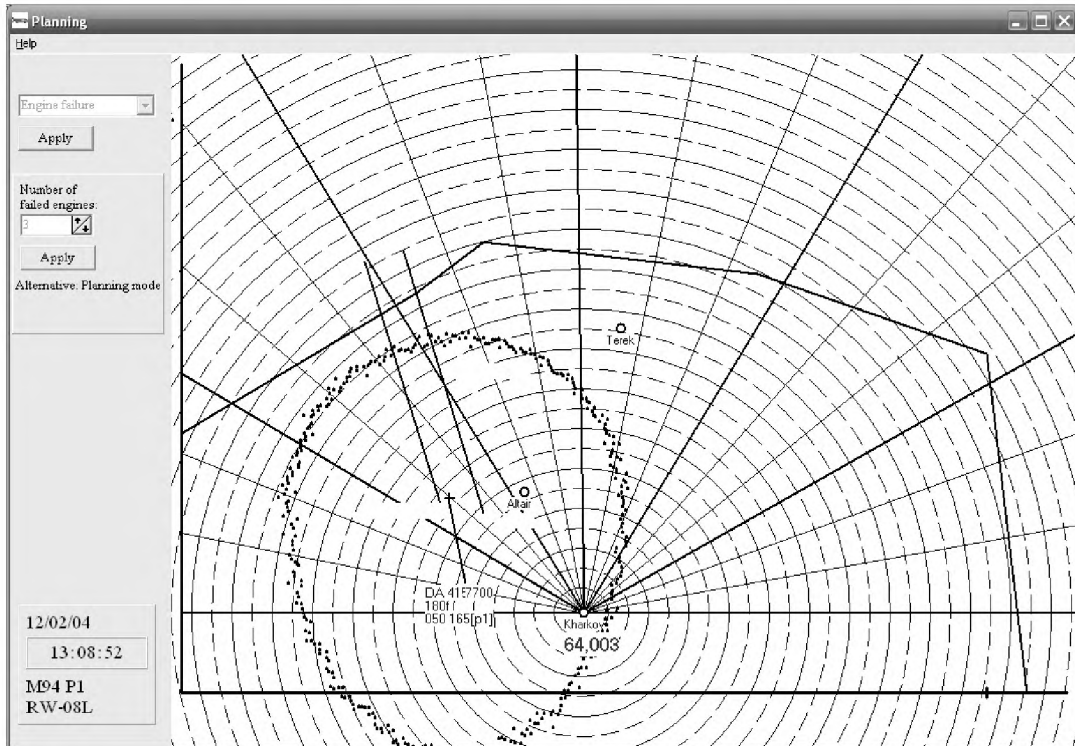
Program „Prompt” umożliwia obsługę dwóch rodzajów nietypowych sytuacji – awarii silnika i pożaru na pokładzie statku powietrznego.

Kiedy system odbiera komunikat o wystąpieniu nietypowej sytuacji, na monitorze operatora pojawia się dodatkowy panel, prezentujący rekomendacje dotyczące możliwości kontynuacji lotu lub konieczności wykonania lądowania awaryjnego. Aby uzyskać rekomendacje w przypadku awarii silnika, operator musi wprowadzić do systemu informację o liczbie uszkodzonych silników, zaś w przypadku pożaru – o ogólnym stanie statku powietrznego (ilustracja 2.88).

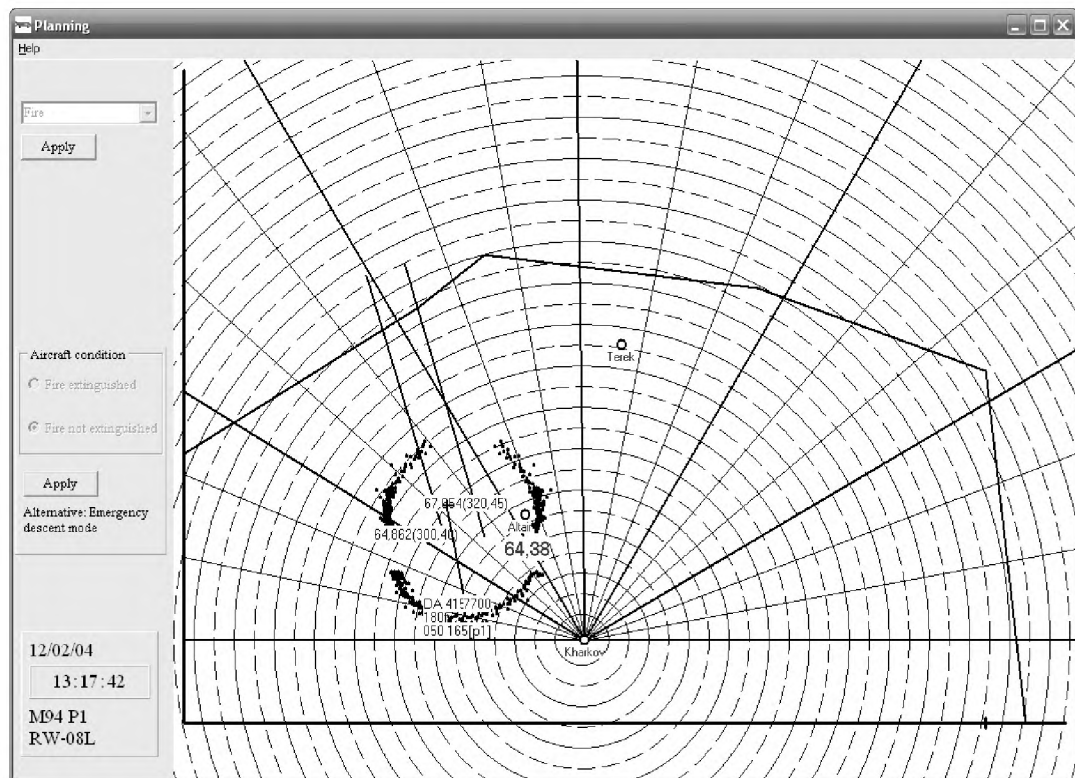
Jeśli system wydaje rekomendację o konieczności awaryjnego lądowania, na monitorze pojawia się mapa obszaru dostępnego do lądowania dla statku powietrznego, informacja o wielkości potencjalnych strat związanych z wyborem poszczególnych alternatywnych sposobów zakończenia lotu, a także współrzędne potencjalnych miejsc lądowania (azymut, odległość). Program prezentuje obszar dostępny do lądowania w dwóch skrajnych przypadkach – szybowania i natychmiastowego rozpoczęcia podejścia do lądowania (ilustracja 2.89).



Ilustracja 2.88. Interfejsy podsystemów formułujących strategię działania [274]



a



b

Ilustracja 2.89. Obszar dostępny do lądowania oraz szacowane potencjalne straty dla kilku wariantów zakończenia lotu w przypadku awarii wszystkich silników samolotu (a) oraz w przypadku nieugaszonego pożaru na pokładzie samolotu (b) [274]

Oprogramowanie „Prompt” pozwala na:

- uzyskanie rekomendacji dotyczących możliwości kontynuacji lotu lub konieczności awaryjnego lądowania statku powietrznego, za pomocą interfejsu dopasowanego do potrzeb użytkownika;
- wyznaczenie obszaru dostępnego do lądowania dla statku powietrznego w przypadku konieczności awaryjnego lądowania;
- ocenę alternatywnych możliwości zakończenia lotu i określenie optymalnej opcji za pomocą kryterium minimalizacji potencjalnych strat.

W doświadczeniu przedstawiono system żeglugi powietrznej jako złożony system socjotechniczny. Na jego przykładzie określono wpływ czynników zawodowych (wiedza, umiejętności, zdolności, doświadczenie) oraz pozazawodowych (indywidualnych psychologicznych, psychofizjologicznych oraz społeczno-psychologicznych) na proces podejmowania decyzji (DM) przez operatora (H-O) systemu żeglugi powietrznej (ANS).

Przeprowadzono analizę sieciową działań załogi statku powietrznego i kontrolera ruchu lotniczego w sytuacjach nagłych w trakcie lotu (FE) za pomocą metod planowania sieciowego; opracowano także modele logiczne procesu DM przez H-O ANS podczas FE.

Określono wskaźniki liczbowe przewidywanego ryzyka w modelach stochastycznych procesu DM przez H-O ANS w warunkach niepewności i ryzyka.

Opracowano scenariusze rozwoju sytuacji w trakcie lotu w przypadku wyboru opcji pozytywnej i negatywnej pod wpływem presji zewnętrznego środowiska, wcześniejszych doświadczeń H-O oraz jego intencji, zgodnie z regułami teorii refleksyjnej.

By zapewnić wsparcie informacyjne operatorów systemu nawigacji lotniczej i umożliwić im podejmowanie we właściwym czasie decyzji operacyjnych dotyczących wyboru optymalnej strategii zakończenia lotu w nietypowych sytuacjach, wymagających awaryjnego lądowania samolotu, stworzono kompleksowe oprogramowanie „Prompt”.

Model sieci neuronowej, zbudowanej na bazie dwuwarstwowego perceptronu, pozwala na określenie, z dużą dokładnością i w czasie rzeczywistym, wielkości możliwych strat, z uwzględnieniem rozmaitych czynników o różnym znaczeniu charakteryzujących potencjalne miejsce awaryjnego lądowania statku powietrznego [274].

3. Efektywność i rozwój ekonomiczny transportu lotniczego

Trzecim kompleksowym Celem Strategicznym ICAO na lata 2014-2016 jest rozwój ekonomiczny transportu lotniczego. Jego istotą jest wspieranie rozwoju silnego i ekonomicznie opłacalnego systemu lotnictwa cywilnego. Cel ten odzwierciedla dążenie ICAO do objęcia wiodącej roli w zakresie harmonizowania systemu transportu lotniczego, na podstawie zdrowych zasad ekonomicznych i działań wspierających [3].

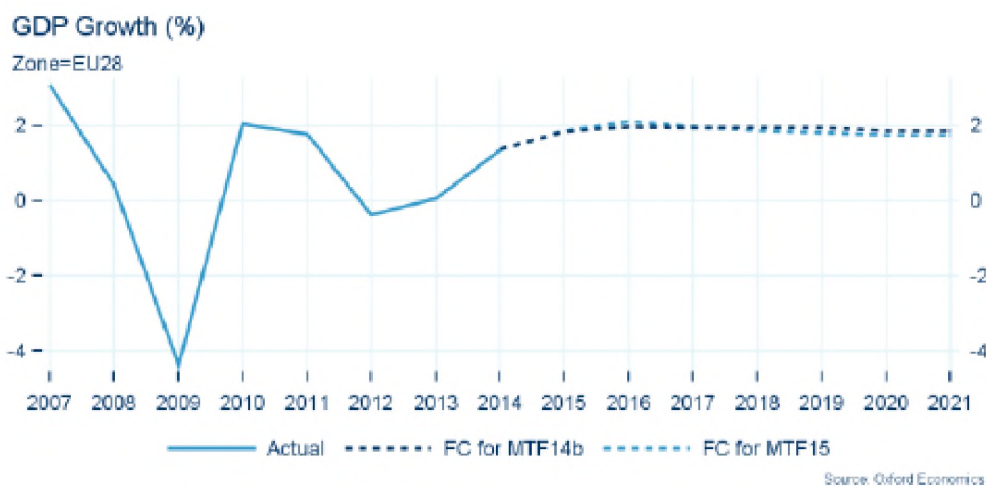
Biorąc pod uwagę znaczenie badań naukowych w rozwiązywaniu problemów związanych z efektywnością i regularnością światowego lotnictwa cywilnego, w niniejszym rozdziale autorzy prezentują materiały analityczne i prognozy dotyczące rozwoju zarządzania transportem lotniczym w warunkach globalizacji, a także podejścia teoretyczne i modele matematyczne rozmaitych aspektów zwiększania przepustowości portów lotniczych. Rozdział omawia następujące kwestie:

- *Wyzwania wynikające z globalizacji rynku usług lotniczych;*
- *Międzynarodowe regulacje w zakresie taryf lotniczych w kontekście globalizacji i liberalizacji rynku lotniczego;*
- *Analizę opóźnień statków powietrznych w fazie przylotu do portu lotniczego;*
- *Analizę opóźnień w ruchu naziemnym w porcie lotniczym.*

3.1. Wyzwania wynikające z globalizacji rynku usług lotniczych

Obecny system regulacyjny międzynarodowego lotnictwa cywilnego oparty jest na konwencji chicagowskiej, która nakłada na umawiające się państwa odpowiedzialność za przestrzeganie norm, metod postępowania oraz procedur przyjętych przez Organizację Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), chyba że poinformują o różnicach. System ten ustanawia jasny związek pomiędzy operatorem i państwem, w którym ma on swoją siedzibę, a także wskazuje wyraźne linie odpowiedzialności różnych podmiotów nadzorujących i regulujących międzynarodowe przewozy lotnicze. Mechanizm ten działał bardzo skutecznie przez ostatnie 50 lat i w ogromnym stopniu przyczynił się do bezpiecznego i uporządkowanego rozwoju lotnictwa cywilnego [275].

Jednakże globalizacja i liberalizacja gospodarcza widoczna w ciągu ostatnich dekad przyniosły fundamentalne zmiany w strukturze i środowisku działania branży transportu lotniczego. Powszechna globalizacja prowadzi do połączenia odrębnych gospodarek krajowych w jedną wielką ogólnoswiatową gospodarkę, poprzez handel, bezpośrednie inwestycje międzynarodowe, przepływy kapitału, postęp technologiczny i, oczywiście, międzynarodowe przewozy lotnicze. Wszystko to sprawia, że branża lotnicza funkcjonuje w coraz bardziej zliberalizowanych warunkach rynkowych. Rozwój światowego transportu lotniczego zależy bezpośrednio od dynamiki zmian PKB w poszczególnych krajach. Prognozy PKB dla Europy przedstawione zostały na ilustracji 3.1, zaś tabela 3.1 pokazuje prognozowane zmiany PKB w poszczególnych strefach ruchu lotniczego w Europie.



GDP Growth (%)	Wzrost PKB (%)
Zone	Strefa=UE28
Actual	Rzeczywisty
FC for MTF14b	Prognoza dla MTF14b
FC for MTF15	Prognoza dla MTF15

Ilustracja 3.1. [59] Prognozy PKB UE na lata 2015–2021

Tabela 3.1. Wzrost PKB w strefach ruchu lotniczego [59]

	Rzeczywisty			Prognozowany bazowy						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Albania	1,3%	0,4%	1,4%	2,4%	3,1%	3,3%	3,4%	3,4%	3,2%	3,2%
Algieria	2,6%	2,8%	3,5%	3,5%	3,8%	3,9%	3,8%	3,8%	3,2%	3,2%
Armenia	7,1%	3,5%	3,4%	3,8%	4,7%	5,0%	5,0%	5,0%	4,7%	4,7%
Austria	1,0%	0,1%	0,4%	1,3%	2,1%	2,1%	1,9%	1,7%	1,5%	1,5%
Azerbejdżan	2,2%	5,8%	2,7%	3,2%	4,2%	4,5%	4,5%	4,5%	4,9%	4,9%
Białoruś	1,5%	1,1%	0,8%	1,3%	3,5%	4,3%	4,3%	4,3%	4,2%	4,2%
Belgia / Luksemburg	0,1%	0,3%	1,1%	1,4%	1,7%	1,8%	1,8%	1,8%	1,6%	1,6%
Bośnia-Hercegowina	-1,2%	2,5%	0,2%	2,6%	3,5%	3,9%	3,7%	3,5%	3,3%	3,3%
Bulgaria	0,4%	0,9%	1,5%	2,1%	3,1%	3,4%	3,6%	3,3%	3,3%	3,3%
Wyspy Kanaryjskie	-2,1%	-1,2%	1,3%	2,4%	2,5%	2,4%	2,4%	2,3%	2,0%	2,0%
Chorwacja	-2,4%	-0,6%	-0,6%	0,8%	1,8%	2,2%	2,1%	1,8%	1,6%	1,6%
Cypr	-2,4%	-5,4%	-2,9%	0,3%	1,4%	1,0%	1,8%	2,5%	3,8%	3,8%
Czechy	-0,7%	-0,7%	2,3%	2,8%	2,9%	2,8%	2,7%	2,7%	2,5%	2,5%
Dania	-0,7%	-0,5%	0,8%	1,7%	2,3%	2,2%	1,9%	1,8%	1,7%	1,7%
Egipt	2,2%	2,1%	2,2%	3,5%	4,0%	4,5%	5,4%	5,2%	5,0%	5,0%
Estonia	4,5%	2,2%	1,8%	2,7%	3,8%	3,9%	4,0%	4,0%	3,8%	3,8%
Macedonia Pn	-0,4%	2,0%	3,5%	3,4%	3,9%	3,7%	3,5%	3,0%	2,9%	2,9%
Finlandia	-1,5%	-1,2%	0,0%	0,5%	1,2%	1,8%	2,1%	2,2%	2,1%	2,1%
Francja	0,4%	0,4%	0,4%	1,2%	1,7%	1,5%	1,6%	1,6%	1,7%	1,7%
Gruzja	6,2%	3,2%	4,7%	5,1%	5,3%	5,4%	5,1%	4,9%	4,4%	4,4%
Niemcy	0,6%	0,2%	1,5%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%
Grecja	-6,6%	-4,0%	1,1%	2,6%	2,4%	2,3%	2,4%	2,5%	2,7%	2,7%
Węgry	-1,5%	1,6%	3,2%	2,5%	2,6%	1,9%	1,8%	1,8%	2,0%	2,0%
Islandia	1,1%	3,5%	2,0%	2,5%	3,0%	2,8%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
Irlandia	-0,3%	0,2%	4,7%	3,3%	3,0%	3,1%	3,2%	3,6%	3,2%	3,2%
Włochy	-2,3%	-1,9%	-0,4%	0,2%	0,9%	1,0%	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%
Łotwa	4,8%	4,2%	2,6%	3,1%	4,0%	4,6%	4,5%	4,5%	4,0%	4,0%
FIR Lizbona	-3,3%	-1,4%	0,8%	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%	1,3%	1,0%	1,0%
Litwa	3,8%	3,3%	2,9%	3,6%	4,6%	4,8%	4,8%	4,6%	3,3%	3,3%

Malta	2,0%	2,5%	2,7%	2,5%	2,2%	2,0%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%
Moldawia	-0,7%	8,9%	1,6%	3,7%	4,3%	4,3%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
Maroko	2,7%	4,4%	2,3%	4,3%	5,0%	5,3%	5,5%	5,4%	5,3%	5,3%
Niderlandy	-1,6%	-0,7%	0,7%	1,4%	1,4%	1,6%	1,7%	1,6%	1,8%	1,8%
Norwegia	2,5%	0,8%	2,1%	0,6%	1,5%	2,1%	2,1%	2,1%	2,0%	2,0%
Polska	1,8%	1,5%	3,4%	3,7%	3,8%	3,5%	3,4%	3,2%	2,7%	2,7%
Rumunia	0,6%	3,1%	3,0%	3,2%	3,4%	3,4%	3,4%	3,4%	3,5%	3,5%
Rosja	3,4%	1,3%	0,6%	-6,3%	0,0%	3,7%	3,7%	3,2%	2,6%	2,6%
FIR Santa Maria	-3,3%	-1,4%	0,8%	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%	1,3%	1,0%	1,0%
Serbia i Czarnogóra	-1,7%	2,5%	-2,0%	-0,5%	2,8%	3,7%	3,8%	3,6%	3,2%	3,2%
Słowacja	1,8%	0,9%	2,4%	2,8%	3,3%	3,5%	3,5%	3,4%	2,7%	2,7%
Słowenia	-2,5%	-1,0%	2,0%	2,2%	2,4%	2,8%	3,3%	3,1%	3,1%	3,1%
Hiszpania	-2,1%	-1,2%	1,3%	2,4%	2,5%	2,4%	2,4%	2,3%	2,0%	2,0%
Szwecja	0,0%	1,3%	1,9%	2,1%	3,0%	2,3%	1,9%	1,8%	1,8%	1,8%
Szwajcaria	1,1%	1,9%	1,9%	1,9%	2,1%	1,7%	1,7%	1,6%	1,5%	1,5%
Tunezja	3,7%	2,3%	2,3%	3,5%	4,5%	5,0%	4,8%	4,7%	4,4%	4,4%
Turcja	2,1%	4,1%	2,7%	3,9%	5,0%	4,9%	4,7%	4,6%	4,2%	4,2%
Wielka Brytania	0,7%	1,7%	2,6%	3,0%	2,8%	2,7%	2,5%	2,3%	2,5%	2,5%
Ukraina	0,2%	0,2%	-7,6%	-3,5%	5,0%	5,3%	5,3%	5,0%	4,7%	4,7%
ESRA08	-0,1%	0,3%	1,4%	1,9%	2,2%	2,1%	2,0%	1,9%	1,8%	1,8%

Źródło: 2005-2021 Oxford Economics Ltd (styczeń 2015). Uwagi: Rzeczywisty wzrost PKB w euro.
Jednostki: Wzrost PKB rocznie. Data ostatniej aktualizacji: 16/01/2015.

Prognozy wskazują utrzymywanie się wzrostu PKB w Europie na poziomie ok. 2% rocznie [59]. Trend ten jest warunkiem dalszego rozwoju europejskiego lotnictwa cywilnego. Równocześnie rozwój ten zależy od wielu aspektów, które omówimy poniżej. Najważniejsze trendy globalizacji i liberalizacji gospodarczej, które mają wpływ na bezpieczeństwo, ochronę i efektywność lotnictwa, to:

- zmiany w podejściu do regulacji wielostronnych i dwustronnych;
- liberalizacja procesu rejestracji linii lotniczych, a także podejścia do kwestii własności i kontroli;
- rozwój sojuszy przewoźników lotniczych, umowy o lotach łączonych i franszyza;
- rozwój nowoczesnych modeli biznesowych linii lotniczych;
- outsourcing usług obsługi naziemnej, a także obsługi technicznej i napraw statków powietrznych;
- globalizacja i komercjalizacja portów lotniczych oraz służb żeglugi powietrznej;
- znaczący wzrost w obszarze przewozów towarowych i logistyki lotniczej.

Zmiany w podejściu do regulacji wielostronnych i dwustronnych

Historia wielostronnych i dwustronnych regulacji branży międzynarodowego transportu lotniczego to historia ścierania się dwóch przeciwstawnych koncepcji – wprowadzenia ścisłych regulacji działalności i dążenia do deregulacji branży. Główną zaletą ścisłych regulacji jest zapewnienie ochrony regulacyjnej rynków wewnętrznych w poszczególnych państwach i wsparcie własnych linii lotniczych w konkurencji z zagranicznymi przewoźnikami. Za to wadą tego rozwiązania jest ograniczenie dostępu do zagranicznych rynków transportowych. Najważniejsze zalety deregulacji to wzmocnienie wolnej konkurencji i, w konsekwencji, rozwój elastycznej, zorientowanej na klienta branży lotniczej. Głównym zagrożeniem związanym z tą koncepcją jest utrata ochrony przewoźników ze strony państwa, a w niektórych przypadkach wręcz zakaz jakiegokolwiek wsparcia dla nich. Przez ponad 50 lat w relacjach międzyrządowych dominowała filozofia ścisłych regulacji. Większość umów międzynarodowych opierała się na modelu Bermuda I lub Bermuda II. Ścisłe regulacje działalności obejmują z zasady opłaty za przewóz pasażerów i towarów, maksymalne wielkości przewozów czy zapewnienie najwyżej 4 wolności lotniczych. Stosowanie tego podejścia do regulacji zapewniało utrzymanie status quo. Jednakże proces globalizacji światowej gospodarki z jednej strony i ciągle rosnące koszty operacyjne linii lotniczych z drugiej wywołały zmiany nie tylko polityki handlowej branży lotniczej, ale również ogólnych ram

regulacyjnych międzynarodowego lotnictwa cywilnego. Kluczowym instrumentem deregulacji są wielostronne i dwustronne umowy „o otwartych przestworzach”, dopuszczające brak lub tylko częściową kontrolę i ochronę ze strony państwa. W takich warunkach linie lotnicze muszą się mierzyć z ciągłym wzrostem bezpośrednich i pośrednich kosztów operacyjnych związanych z eksploatacją statków powietrznych, spowodowanym przede wszystkim rosnącymi cenami paliw; a także ze zwiększającymi się stale opłatami za korzystanie z lotnisk czy infrastruktury i usług nawigacyjnych, podatkami oraz innymi obciążeniami. Jednocześnie przewoźnicy nie mogą proporcjonalnie podnosić cen swoich usług, ze względu na silną konkurencję. Samo wprowadzanie dodatkowych opłat paliwowych nie wystarcza. Dlatego w ostatnim okresie byliśmy świadkami bankructw wielu linii lotniczych. Pamiętać też należy, że proces ciągłego obniżania kosztów operacyjnych może stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa i ochrony przewozów lotniczych [276].

Jednak przyjęcie polityki „otwartych przestworzy” może przynieść światowej gospodarce dodatkowy bilion dolarów i przyczynić się do stworzenia 22 mln miejsc pracy.

Polityka „otwartych przestworzy” obejmuje następujące elementy:

- otwarte trasy i kierunki lotów;
- większa elastyczność w wyznaczaniu tras;
- brak limitów wielkości i częstotliwości przewozów;
- wzrost liczby lotów łączonych;
- odrzucenie kontroli państwa nad taryfami za przewóz pasażerów i towarów;
- liberalizacja obszaru nieregularnych lotów czarterowych;
- liberalizacja transportu towarowego;
- wysoki poziom wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony;
- możliwość samodzielnej obsługi w zagranicznych portach lotniczych;
- dostosowanie opłat, podatków i innych obciążeń do warunków rynkowych;
- otwarta konkurencja i zakaz pomocy państwa dla przewoźników;
- liberalizacja kanałów sprzedaży i wykorzystanie komputerowych systemów rezerwacyjnych.

Liberalizacja procesu rejestracji linii lotniczych, a także podejścia do kwestii własności i kontroli w kontekście globalizacji rynku przewozów lotniczych

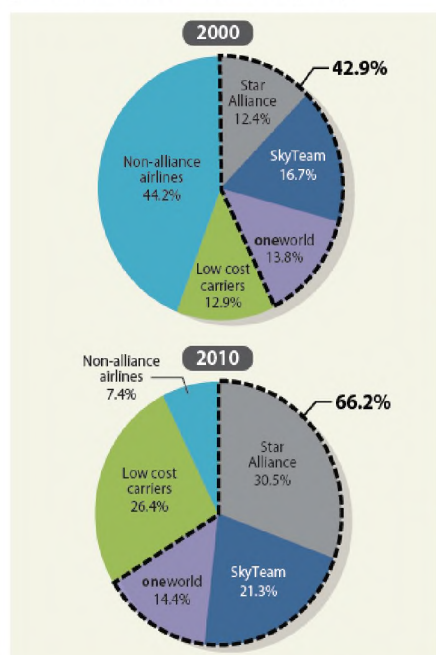
W przeszłości państwa zasadniczo nie przyznawały praw do wykorzystania z tras przewoźnikom, w których nie były większościami udziałowcami i których de facto nie kontrolowały. Obecnie, w okresie globalizacji i liberalizacji to kryterium własności i kontroli przez państwo staje się coraz mniej istotne. Wiele linii lotniczych przewoźników nie należy do państwa, a niektóre kraje przyznają możliwość kontroli nad nimi swoim obywatelom. Pozytywnym aspektem tych tendencji jest, bez wątpienia, zwiększenie wydajności przewoźników, którzy, z zasady, starają się zapewnić wymagany poziom bezpieczeństwa, utrzymując jednocześnie atrakcyjne ceny i dobrą jakość usług. Jednakże w takich sytuacjach nie ma żadnej pewności, że dany przewoźnik będzie reprezentował przede wszystkim interesy własnego kraju. Najsilniejsze światowe linie lotnicze aktywnie rozwijają nowe formy współpracy. Wiele państw z kolei rozluźniło w ostatnich latach restrykcje dotyczące zagranicznych udziałów w strukturze własności ich narodowych przewoźników. Duże linie coraz częściej przejmują pakiety kontrolne akcji swoich mniejszych konkurentów. W tej sytuacji, przy braku skutecznych środków, które mogłyby temu zapobiec, możemy dostrzec ryzyko powstawania „tanich bander” lotniczych, a także zagrożenie obniżenia standardów bezpieczeństwa i ochrony, kiedy przewoźnicy będą skoncentrowani przede wszystkim na osiągnięciu celów komercyjnych. Dlatego rozluźnieniu regulacji dotyczących własności i kontroli musi towarzyszyć wprowadzanie odpowiednich rozwiązań zapobiegających tworzeniu tanich bander i zapewniających utrzymanie właściwego poziomu bezpieczeństwa [275].

Tworzenie sojuszy przewoźników lotniczych, umowy o lotach łączonych i franszyzy

Jak wspomnieliśmy, jednym z najważniejszych trendów globalizacji jest znaczące zwiększenie konkurencji na rynku lotniczym. W rezultacie wielu przewoźników działa na granicy rentowności, co

może zagrażać bezpieczeństwu świadczonych przez nich usług. By rozwiązać te problemy, największe światowe linie lotnicze odchodzą od walki konkurencyjnej na rzecz filozofii współpracy i koordynacji wspólnych działań biznesowych. Pierwszym krokiem w tym procesie jest podpisanie dwustronnych porozumień międzyliniowych (Bilateral Interline Agreement, BITA). Drugi krok to opracowanie wspólnych systemów taryf (na bazie porozumienia o podziale zysków – Special Prorate Agreement, SPA). Kolejnym etapem konsolidacji jest zawarcie umów u lotach łączonych, najpierw z proporcjonalnym podziałem oferowanych miejsc (Code-Share Blocked Space Agreement, CSBSA), a następnie umożliwiających swobodną sprzedaż i dystrybucję przez każdą z linii (Code-Share Free Sale Agreement, CSFSA). Proces ten ilustruje rozwój relacji marketingowych między członkami sojuszu. Wykorzystuje go wiele linii lotniczych, by zwiększyć swój dostęp do rynku, budować synergię i zwiększać przychody. Wprowadzenie lotów łączonych pozwala partnerom oferować płynne połączenia, takie same jak w przypadku pojedynczej linii lotniczej. Jednakże rozwiązanie to budzi pewne obawy władz odnoszące się do standardów bezpieczeństwa obowiązujących w zagranicznych liniach lotniczych, które są partnerami ich narodowych przewoźników. Inne obawy wiążą się z potencjalnymi zagrożeniami dla bezpieczeństwa przewozu dotyczącymi jednej z linii, które mogą zostać przeniesione również na jej partnerów wykonujących wspólnie lot łączony, wymuszając na odpowiednich władzach wprowadzenie dodatkowych środków zabezpieczających.

Kolejnym etapem wzmocnienia współpracy między liniami lotniczymi jest budowa strategicznych i ogólnoświatowych sojuszy lotniczych. Tego typu konsolidacja najsilniejszych linii, reprezentujących wszystkie regiony świata, zapewnia im geometryczny wzrost przewagi konkurencyjnej, możliwy dzięki: wielostronnej koordynacji taryf i stawek międzynarodowych, ujednoczeniu programów lojalnościowych, wspólnej sprzedaży usług w ramach wielostronnych porozumień międzyliniowych (MITA), wspólnemu wykorzystaniu tras na całym świecie, optymalizacji wykorzystania floty samolotów, a także koordynacji rozkładów lotów i wspólnej promocji połączeń. W efekcie takich działań członkowie sojuszy lotniczych mogą osiągać znaczące oszczędności bezpośrednich i pośrednich kosztów operacyjnych, marketingowych, sprzedażowych i ogólnych. Wszystkie powyższe elementy pozwalają w pełni wykorzystać efekt skali i umożliwiają oferowanie klientom bardziej elastycznych, tańszych i efektywniejszych warunków podróży. W rezultacie linie należące do sojuszy lotniczych obsługują obecnie ponad 66% światowego ruchu pasażerskiego (ilustracja 3.2 przedstawia segmentację rynku lotniczego i strukturę sojuszy przewoźników lotniczych).



Alliance	Principal U.S. airline	Transatlantic joint venture partners	Transpacific joint venture partners	Other airline members						
STAR ALLIANCE*	UNITED	AIR CANADA Austrian British Midland International brussels airlines Lufthansa SWISS	ANA	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Americas</th> <th>Europe & Africa</th> <th>Asia & Pacific</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Avianca* Continental Airlines COPA Airlines* TACA* TAM Airlines US Airways</td> <td>Adria Airways Aegean Airlines Blue 1 Croatia Airlines Egyptair Ethiopian Airlines*</td> <td>LOT Polish Airlines Air India SAS South African Spanair TAP Portugal Turkish Airlines Thai Airways</td> </tr> </tbody> </table>	Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific	Avianca* Continental Airlines COPA Airlines* TACA* TAM Airlines US Airways	Adria Airways Aegean Airlines Blue 1 Croatia Airlines Egyptair Ethiopian Airlines*	LOT Polish Airlines Air India SAS South African Spanair TAP Portugal Turkish Airlines Thai Airways
Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific								
Avianca* Continental Airlines COPA Airlines* TACA* TAM Airlines US Airways	Adria Airways Aegean Airlines Blue 1 Croatia Airlines Egyptair Ethiopian Airlines*	LOT Polish Airlines Air India SAS South African Spanair TAP Portugal Turkish Airlines Thai Airways								
SKYTEAM	DELTA	AIRFRANCE Alitalia KLM		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Americas</th> <th>Europe & Africa</th> <th>Asia & Pacific</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aerolineas Argentinas* Aeroméxico</td> <td>Aeroflot Russian Airlines Air Europa CSA Czech Airlines Kenya Airways TAROM Romanian Air Transport</td> <td>China Airlines* China Eastern Airlines* China Southern Airlines Garuda Indonesia* Korean Air Middle East Airlines* Saudi Arabian Airlines* Shanghai Airlines* Vietnam Airlines</td> </tr> </tbody> </table>	Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific	Aerolineas Argentinas* Aeroméxico	Aeroflot Russian Airlines Air Europa CSA Czech Airlines Kenya Airways TAROM Romanian Air Transport	China Airlines* China Eastern Airlines* China Southern Airlines Garuda Indonesia* Korean Air Middle East Airlines* Saudi Arabian Airlines* Shanghai Airlines* Vietnam Airlines
Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific								
Aerolineas Argentinas* Aeroméxico	Aeroflot Russian Airlines Air Europa CSA Czech Airlines Kenya Airways TAROM Romanian Air Transport	China Airlines* China Eastern Airlines* China Southern Airlines Garuda Indonesia* Korean Air Middle East Airlines* Saudi Arabian Airlines* Shanghai Airlines* Vietnam Airlines								
oneworld	AA	BRITISH AIRWAYS IBERIA	JAL	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Americas</th> <th>Europe & Africa</th> <th>Asia & Pacific</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LAN Airlines Mexicana**</td> <td>Air Berlin* Finnair Iberia S7 Airlines</td> <td>Cathay Pacific Airways Kingfisher Airlines* Qantas Airways Royal Jordanian Airlines</td> </tr> </tbody> </table>	Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific	LAN Airlines Mexicana**	Air Berlin* Finnair Iberia S7 Airlines	Cathay Pacific Airways Kingfisher Airlines* Qantas Airways Royal Jordanian Airlines
Americas	Europe & Africa	Asia & Pacific								
LAN Airlines Mexicana**	Air Berlin* Finnair Iberia S7 Airlines	Cathay Pacific Airways Kingfisher Airlines* Qantas Airways Royal Jordanian Airlines								

Non-alliance airlines	Przewoźnicy niezrzeszeni w sojuszach lotniczych
Low cost carriers	Przewoźnicy niskokosztowi
Alliance	Sojusz lotniczy
Principal U.S. airline	Główny przewoźnik amerykański
Transatlantic joint venture partners	Główni partnerzy transatlantyccy

Transpacific joint venture partners	Główni partnerzy transpacyficzni
Other airline members	Pozostali członkowie sojuszu
Americas	Ameryki
Europe & Africa	Europa i Afryka
Asia & Pacific	Azja i Pacyfik

Ilustracja 3.2. Segmentacja rynku transportu lotniczego i struktura światowych sojuszy lotniczych [277]

Międzynarodowa Konferencja Transportu Lotniczego (ATCONF, posiedzenie 6, Montreal, 18-22 marca 2013) określiła następujące korzyści i wady sojuszy lotniczych:

Korzyści sojuszy lotniczych

Jedną z najważniejszych korzyści międzynarodowych sojuszy linii lotniczych jest obniżenie cen połączeń pomiędzy poszczególnymi parami miast. Duża liczba pasażerów pozwala zwiększyć wartość wskaźnika wypełnienia samolotów, co oznacza zmniejszenie kosztów transportu i służy interesom zarówno klientów, jak i przewoźników.

Linie lotnicze mogą oferować pasażerom bardziej zróżnicowane rozkłady połączeń i większy wybór dostępnych czasów startu i lądowania, co wpływa na skrócenie czasów podróży.

Sojusze lotnicze stale doskonalą jakość obsługi pasażerskiej i stosują standardy na wszystkich etapach procesu – począwszy od wyboru kierunku i sprzedaży biletów, przez procedury odprawy i oczekiwania na lotniskach oraz usługi oferowane w czasie podróży, skończywszy na obsłudze reklamacji [278].

Wady sojuszy lotniczych

Pomimo wielu korzyści sojusze lotnicze są również krytykowane za niektóre elementy działalności, np.:

a) sojusze mogą nie przestrzegać przepisów antymonopolowych. Może to powodować wykluczanie niektórych przedsiębiorstw z rynku i naruszenie zasad wolnej konkurencji;

b) ze względu na możliwość kontrolowania wielu kluczowych aspektów procesu i przewagę konkurencyjną sojusze lotnicze mogą doprowadzić do upadku przedsiębiorstw zmuszonych do nierównej konkurencji cenowej;

c) stały rozwój sojuszy wpływa na złożoność i poziom skomplikowania relacji pomiędzy członkami [278].

Rozwój nowoczesnych modeli biznesowych linii lotniczych

Kolejnym aspektem ogólnoświatowych zmian na rynku lotniczym jest pojawienie się przewoźników niskokosztowych, którzy w ostatnim okresie zaczęli skutecznie zagrażać pozycji tradycyjnych linii lotniczych. Najważniejsze elementy typowej strategii niskokosztowej to:

- ograniczony zakres oferowanych usług;
- częste i regularne odloty;
- krótkie połączenia, bez przesiadek;
- wykorzystanie małych i średniej wielkości, często drugorzędnych, portów lotniczych;
- niskie ceny biletów;
- nieliczna, efektywna załoga;
- maksymalne wykorzystanie samolotów.

Najważniejsze elementy przewagi kosztowej w tym modelu biznesowym to:

- jednolita i nowa flota samolotów;
- większa liczba siedzeń w kabinie, mniej kuchni i toalet;
- brak darmowych posiłków i napojów, brak programów lojalnościowych;
- brak rezerwacji miejsc;
- wykorzystanie mniejszych portów lotniczych;

- brak łączonych lotów, brak połączeń z przesiadką;
- bezpośrednia sprzedaż biletów;
- niskie ceny, agresywne działania PR.

Rozwój przewoźników niskokosztowych wymusił na większych liniach lotniczych tworzenie oddzielnych jednostek biznesowych lub spółek zależnych, które mogłyby z nimi konkurować. W ciągu ostatnich 10 lat segment przewozów niskokosztowych zwiększył się z 12,9 do 26,4%. Według danych EUROCONTROL w 2012 r. powinniśmy obserwować dalszy wzrost liczby połączeń niskokosztowych w regionie europejskim (+1,4%, co da łącznie 25% w strukturze wszystkich operacji lotniczych w Europie, patrz tabela 3.2) [279].

Tabela 3.2. Struktura i segmenty europejskiego rynku ruchu lotniczego (dane EUROCONTROL [279])

Segment rynku	Średnia liczba lotów dziennie	Udział w rynku	Wzrost w 2012 r.
Tradycyjne rozkładowe	14 355	55%	-4,1%
Niskokosztowe	6 537	25%	1,4%
Lotnictwo biznesowe	1 870	7%	-4,0%
Czartery	1 414	5%	2,6%
Towarowe	918	4%	-4,6%
Inne*	995	4%	-9,6%
ŁĄCZNIE	26 089	100%	-2,67%

Dodatkowe operacje lotnicze wykonywane przez przewoźników niskokosztowych stanowią podstawę założeń i prognoz przedstawionych w tabeli 3.3. Prezentuje ona rzeczywisty i przewidywany udział przewozów niskokosztowych w rynku w poszczególnych krajach dla różnych scenariuszy.

Tabela 3.3. Udział przewozów niskokosztowych w ogólnej liczbie operacji w poszczególnych strefach ruchu [59]

Kraj	Rzeczywisty	Niski	Bazowy	Wysoki
	2014	2021	2021	2021
Albania	4%	4%	6%	9%
Armenia	3%	3%	6%	7%
Austria	25%	24%	29%	30%
Azerbejdżan	2%	2%	4%	7%
Białoruś	2%	2%	4%	7%
Belgia / Luksemburg	20%	19%	24%	25%
Bośnia-Hercegowina	22%	21%	26%	32%
Bulgaria	20%	19%	24%	30%
Wyspy Kanaryjskie	50%	50%	53%	58%
Chorwacja	32%	31%	36%	41%
Cypr	31%	30%	39%	49%
Czechy	38%	37%	46%	56%
Dania	22%	21%	26%	27%
Estonia	18%	17%	26%	36%
Macedonia Pn	43%	39%	44%	49%
Finlandia	13%	12%	17%	23%
Francja	27%	26%	31%	32%
Gruzja	15%	15%	18%	23%
Niemcy	37%	37%	38%	38%

Grecja	33%	32%	37%	38%
Węgry	45%	44%	51%	59%
Islandia	28%	27%	32%	37%
Irlandia	37%	36%	41%	46%
Włochy	43%	39%	44%	47%
Łotwa	80%	55%	65%	80%
FIR Lizbona	36%	35%	40%	45%
Litwa	41%	40%	45%	50%
Malta	36%	35%	44%	54%
Moldawia	11%	11%	13%	16%
Maroko	22%	20%	33%	48%
Niderlandy	26%	25%	30%	31%
Norwegia	24%	23%	28%	29%
Polska	33%	32%	43%	44%
Rumunia	27%	26%	31%	36%
FIR Santa Maria	1%	1%	3%	6%
Serbia i Czarnogóra	11%	10%	16%	21%
Słowacja	30%	29%	37%	45%
Słowenia	5%	4%	13%	23%
Hiszpania	57%	56%	59%	59%
Szwecja	21%	21%	24%	25%
Szwajcaria	20%	19%	24%	25%
Turcja	32%	31%	36%	37%
Wielka Brytania	48%	47%	49%	51%
Ukraina	9%	8%	14%	20%

W obecnej sytuacji możemy obserwować stopniową ewolucję obu modeli biznesowych linii lotniczych (tradycyjnego i niskokosztowego), która sprawia, że coraz bardziej się do siebie upodabniają. I tak, linie niskokosztowe wprowadzają szeroko reklamowane promocje cenowe, podwyższając jednocześnie stawki bazowe. Z kolei tradycyjne linie lotnicze podejmują działania skierowane na obniżenie kosztów operacyjnych i konsolidację usług, umożliwiające wykorzystanie efektu skali [276]. Muszą jednak pamiętać, by wdrażane programy oszczędnościowe nie stanowiły zagrożenia dla poziomu bezpieczeństwa i jakości świadczonych przez nie usług.

Outsourcing usług obsługi naziemnej, technicznej i napraw statków powietrznych

Innym trendem wynikającym z globalizacji rynku przewozów lotniczych jest outsourcing, czyli przekazanie części funkcji przedsiębiorstwa podmiotom zewnętrznym. Znakomitą ilustracją tego rozwiązania są działania związane z obsługą naziemną i obsługą techniczną samolotów. Obserwujemy tendencję do liberalizacji tych działań w wielu dwustronnych i wielostronnych umowach o służbach lotniczych. W efekcie dziś zarówno obsługą naziemną, jak i przeglądami i utrzymaniem samolotów zajmują się wyspecjalizowane firmy, które nie są w żaden sposób ograniczone regulacjami dotyczącymi struktury własności. Może to stanowić kolejne zagrożenie dla bezpieczeństwa i ochrony lotnictwa. Odnosząc się do tych obaw, ICAO przeprowadziła ostatnio badanie dotyczące bezpieczeństwa w obszarach obsługi naziemnej i technicznej statków powietrznych, zakończone wprowadzeniem zmian do istniejących norm i zalecanych metod postępowania (SARPs).

Globalizacja i komercjalizacja portów lotniczych

Kolejną zauważalną tendencją i elementem globalizacji współczesnego rynku lotniczego jest komercjalizacja lub prywatyzacja portów lotniczych oraz służb żeglugi powietrznej, a także zmiany struktury własności tych wcześniej państwowych instytucji lub też przekazanie przez władze kontroli nad tymi operacjami podmiotom niezależnym albo organizacjom sektora prywatnego. ICAO zaleca, aby zawsze, kiedy powstaje tego typu nowy autonomiczny podmiot lub organizacja, państwo

uzależniło swoją zgodę na jego utworzenie od zobowiązania do wykonywania przez ten podmiot lub organizację wszystkich obowiązków nakładanych na to państwo przez konwencję chicagowską wraz z Załącznikami. Szczególnie istotne jest zwrócenie uwagi na bezpieczeństwo transportu, uznawane obecnie za najwyższy priorytet, z uwzględnieniem wszystkich konsekwencji dla obsługi pasażerów, kosztów zapewnienia bezpieczeństwa oraz, w różnym zakresie w różnych częściach świata, odzyskania publicznego zaufania. Branża lotnicza musi dbać o to, by wprowadzane środki bezpieczeństwa nie zakłócały przepływu pasażerów, towarów, poczty ani samych lotów, a także podejmować wszelkie działania niezbędne dla przywrócenia społecznego zaufania do transportu lotniczego i ożywienia całego sektora. W tym zakresie bliska współpraca pomiędzy regulatorami, odpowiednimi służbami, liniami lotniczymi oraz władzami portów lotniczych powinna pomóc w stworzeniu komplementarnych programów obsługi i poprawy bezpieczeństwa, które mogłyby ograniczyć negatywne skutki i zapewnić maksymalną wydajność kontroli granicznej, przy utrzymaniu najwyższego poziomu bezpieczeństwa i przestrzegania prawa [275].

Tabela 3.4 stanowi wycinek tabeli przedstawiającej 100 największych światowych grup portów lotniczych (według przychodów). Spośród tych 100 podmiotów 36 jest w całości lub w części własnością prywatnych inwestorów (lub też jest w trakcie procesu prywatyzacji, jak to się dzieje w Hiszpanii i Portugalii). W przypadku częściowej prywatyzacji zazwyczaj właścicielem pakietu akcji (większościowego lub mniejszościowego) jest podmiot państwowy lub samorządowy, należący do władz kraju lub regionu, w którym znajduje się dane lotnisko. Wiele z tych globalnych grup portów lotniczych zarządza również lotniskami poza granicami swojego kraju, na podstawie stosownych umów, jednak bez żadnych udziałów w kierowanych spółkach. Dobrym przykładem jest tu Fraport, zarządzający portem lotniczym w Kairze. Niektóre mniejsze spółki (np. Hochtief Airport, HRL Morrison/Infratil, Peel Airports) znalazły się w 20102 r. poza grupą 100 największych przedsiębiorstw portów lotniczych, zatem nie zostały ujęte w tabeli. Całkowite przychody 36 sprywatyzowanych podmiotów wyniosły 33,6 mld dol., co stanowi 45% całkowitych łącznych przychodów wszystkich 100 największych grup portów lotniczych [280]. (Tabela 3.4 pokazuje największe sprywatyzowane spółki lotniskowe).

Tabela 3.4. Największe sprywatyzowane grupy portów lotniczych [280]

Nazwa grupy	Miejsce w rankingu	Główne lotniska	Przychody [mln dol.]	Status prywatyzacji
AENA	1	Madryt, Barcelona	4 521	wstrzymana
Ferrovial	2	Londyn Heathrow	3 956	pełna
Aeroports de Paris	3	Paryż de Gaulle i Orly	3 497	częściowa
Fraport	4	Frankfurt	3 314	częściowa
TAV Airport Holding	14	Stambuł, Ankara	1 231	pełna
Flughafen Zurich	19	Zurich	1 028	pełna
Southern Cross Airports	20	Sydney	1 015	pełna
Beijing Capital Intl. Airport Group	21	Pekin	1 008	częściowa
Airports of Thailand	22	Bangkok	945	częściowa
Malaysia Airports Holding Berhad	23	Kuala Lumpur	902	częściowa
SEA Aeroporti	24	Mediolan	901	częściowa

de Milano				
Aeroporti di Roma	25	Rzym Fiumicino i Ciampino	883	pełna
Flughafen Wien	28	Wiedeń	814	pełna
Airports Company South Africa	30	Johannesburg, Kapsztad	775	częściowa
Guangzhou Baiyun International	35	Guangzhou	657	częściowa
Copenhagen Airports	36	Kopenhaga	628	częściowa
Aerportos de Portugal	38	Lizbona	604	w toku
Flughafen Dusseldorf	41	Dusseldorf	585	częściowa
GMR Infrastructure	42	New Delhi, Hyderabad	563	częściowa
Australia Pacific Airports Corp.	43	Melbourne	559	częściowa
Brussels Intl. Airport Corp.	45	Bruksela	527	pełna
Aeropuertos Argentina 2000	48	Buenos Aires EZE i AEP	470	pełna
Athens Intl. Airport	50	Ateny	465	częściowa
Brisbane Airport	51	Brisbane	456	częściowa
Abertis	57	Londyn Luton, Cardiff, Belfast	409	pełna
Grupo Aeroportuario del Pacifico (GAP)	59	Guadalajara, Tijuana	396	pełna
Aeropuertos del Sureste (ASUR)	66	Cancun	367	pełna
Flughafen Hamburg	68	Hamburg	354	częściowa
Auckland International Airport	77	Auckland	304	częściowa
Westralia Airports	78	Perth	300	pełna
Aeroports de la Cote d'Azur	82	Nicea	265	częściowa
Operadora Mexicana de Aeropuertos (OMA)	86	Monterrey, Acapulco	197	pełna
Hannover-Lengenhagen	87	Hanower	\$192	częściowa
SAVE Aeroporto	89	Wenecja	177	częściowa

Marco Polo				
Adelaide	93	Adelajda	152	pełna
Birmingham Airport Holdings	95	Birmingham	150	w toku

W ciągu ostatnich 20 lat ponad 50 krajów „skomercjalizowało” również systemy kontroli ruchu lotniczego (ATC). Oznacza to, że władze tych krajów wydzieliły funkcje ATC ze swoich ministerstw transportu i ze służby cywilnej (by zachować bezpieczny dystans) i zamieniły w samodzielne podmioty, utrzymujące się z opłat od operatorów statków powietrznych korzystających z ich usług. W połowie 2012 r. CANSO (stowarzyszenie dostawców służb żeglugi powietrznej) liczyło 76 pełnoprawnych członków – podmiotów zapewniających służby żeglugi powietrznej. Ponad 50 z nich było skomercjalizowanych – dostawcy służb żeglugi powietrznej z Australii, Nowej Zelandii, Tajlandii, Indii, Kanady, Wielkiej Brytanii, Irlandii, Niemiec, Hiszpanii, Portugalii, Austrii, Szwajcarii, a także większości pozostałych państw UE. Rządowe instytucje odpowiedzialne za służby żeglugi powietrznej działają nadal na Cyprze, w Luksemburgu, Grecji, na Malediwach i w Stanach Zjednoczonych (działające w ramach FAA – Federal Aviation Administration i przez nią finansowane) [281].

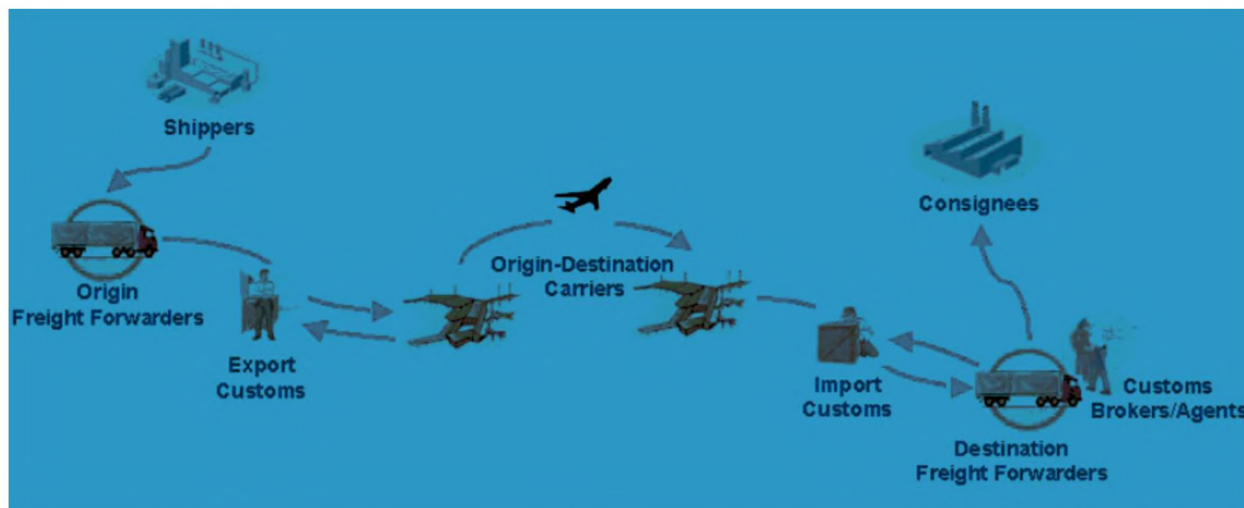
Wyzwania w obszarze przewozów towarowych i logistyki lotniczej w kontekście globalizacji rynku lotniczego

Termin „air cargo” (ładunek lotniczy) wykorzystywany jest obecnie w branży lotniczej w szerszym sensie, jako określenie każdego rodzaju przesyłki (towarowej, kurierskiej lub pocztowej), z wyjątkiem bagażu, transportowanej drogą powietrzną. Usługa all-cargo to przewóz wyłącznie przesyłek towarowych, wykonywany zgodnie z rozkładem lub jednorazowy. W obszarze międzynarodowego transportu lotniczego najwięcej uwagi nadal poświęca się przewozom pasażerskim, ale znaczenie ładunków lotniczych stale rośnie. Dla wielu krajów, np. krajów śródlądowych lub eksportujących głównie towary nietrwałe albo wysokowartościowe, obsługa przesyłek lotniczych stanowi istotny element rozwoju gospodarki i handlu międzynarodowego. Dla nadawców przewozy lotnicze mogą stanowić konkurencyjne rozwiązanie, alternatywne wobec innych rodzajów transportu (kolejowego, drogowego lub morskiego), spełniając ich wymagania w zakresie bezpieczeństwa, ochrony i efektywności (szybkości, jakości, mniejszego ryzyka uszkodzeń), a także kosztów. W czasach gdy rośnie liczba przedsiębiorstw działających w systemie *just-in-time* (w którym towary dostarczane są bezpośrednio na linię produkcyjną, co pozwala ograniczać koszty składowania), samoloty coraz częściej wykorzystywane są jako przedłużenie magazynów, umożliwiając krótki czas dostawy i redukcję kosztów obsługi zapasów [282].

Dla linii lotniczych transport towarów może być ważnym źródłem przychodów. Na najważniejszych trasach międzynarodowych (przez północny Atlantyk, pomiędzy Europą i Azją oraz przez północny i środkowy Pacyfik) przewóz ładunków zapewnia około jednej piątej ogólnych przychodów z operacji rozkładowych. W segmencie cargo działają również wysoko wyspecjalizowane firmy oferujące przewozy ekspresowe, których ekspansję obserwujemy w ostatnim dziesięcioleciu. Firmy te wykorzystują system łączący duże samoloty transportowe z naziemnymi środkami transportu, co umożliwia im dostawy nawet w ciągu 24 godzin na obszarze jednego kontynentu lub 48 godzin w przypadku przesyłek międzykontynentalnych. Z tego typu rozwiązań korzysta również wielu operatorów pocztowych [9].

Najnowszym typem przedsiębiorstw, których działania dodatkowo zwiększają znaczenie lotniczego transportu towarowego, są dynamicznie rozwijające się firmy kurierskie, oferujące dostawy niewielkich przesyłek lub dokumentów w systemie „od drzwi do drzwi”, zazwyczaj z gwarantowanym terminem dostawy (tego samego lub następnego dnia) [282, 283]. Również linie lotnicze coraz częściej oferują kompleksową obsługę „od drzwi do drzwi”, a nie tylko sam przewóz drogą powietrzną. Lotniczy transport towarowy jest coraz bardziej zintegrowany i zglobalizowany, w wyniku wspólnych działań i porozumień między przewoźnikami, takich jak łączone operacje czy

umowy franczyzowe. Niniejszy rozdział wskazuje niektóre cechy wyróżniające lotniczy transport towarowy i prezentuje informacje na temat rządowych regulacji dotyczących przewozu ładunków. Pokazuje również transport lotniczy jako element rozwiązań multimodalnych, w których na trasie między miejscami załadunku i rozładunku wykorzystuje się również inne rodzaje transportu – drogowy, kolejowy lub morski (patrz ilustracja 3.3) [282, 284].



Shippers	Nadawcy
Origin freight forwarders	Spedytorzy w miejscu nadania
Export customs	Odprawa celna w wywozie
Origin-destination carriers	Przewoźnicy główni
Import customs	Odprawa celna w przywozie
Consignees	Odbiorcy
Destination freight forwarders	Spedytor w miejscu przeznaczenia
Customs brokers/ agents	Agenci celni

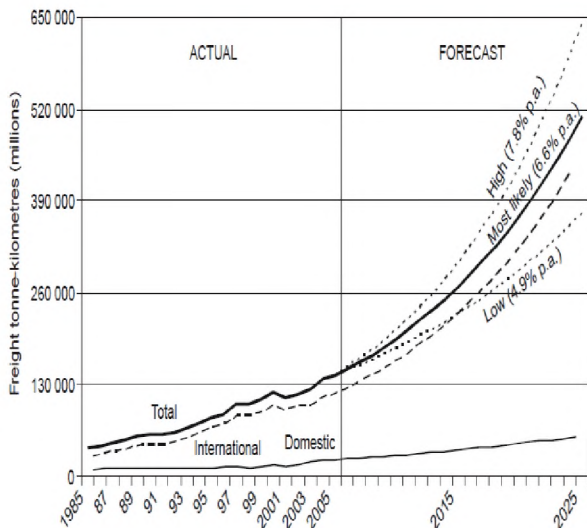
Ilustracja 3.3. Schemat procesu logistycznego obejmującego transport lotniczy [285]

Prognozy efektywności i wydajności lotniczego transportu towarowego

Czołowe międzynarodowe organizacje międzyrządowe (Organizacja Międzynarodowego Transportu Lotniczego, ICAO) i pozarządowe (Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Lotniczych, IATA), a także najwięksi producenci samolotów, Boeing i Airbus, tworzą prognozy rozwoju rynku lotniczego transportu towarowego. Analiza tych prognoz pozwala ocenić wskaźniki wydajności światowego systemu logistycznego, a także zidentyfikować ryzyko i zagrożenia związane z jego dynamicznym rozwojem.

Długoterminowa prognoza Organizacji Międzynarodowego Transportu Lotniczego dotycząca przewozów towarowych

Analiza ekonometryczna, w połączeniu ze wspomnianymi wcześniej założeniami, zaowocowała „najbardziej prawdopodobną” prognozą wzrostu na poziomie 6,6% rocznie liczonego w tonokilometrach ładunków przetransportowanych na świecie, obejmującą okres 2005–2025. Wynik ten jest niemal taki sam jak wzrost zarejestrowany w okresie 1985–2005. Przyjmując nieco inne założenia dotyczące czynników wpływających na lotniczy transport towarowy, uzyskujemy prognozowany wynik pomiędzy 4,9% a 7,8% rocznie, co pokazuje ilustracja 3.4. Z kolei tabela 3.5 przedstawia prognozy ICAO dotyczące regularnych przewozów towarowych (krajowych i międzynarodowych), zarówno w zakresie wykonanych tonokilometrów, jak i przewiezionych ton ładunków. Prognozowany wzrost w międzynarodowym ruchu towarowym jest znacznie szybszy niż w transporcie krajowym, w dużej części dzięki dynamicznie rozwijającemu się handlowi międzynarodowemu. W obszarze krajowego transportu lotniczego rynkiem dominującym jest dojrzały rynek amerykański, co jest główną przyczyną umiarkowanego wzrostu w skali ogólnoswiatowej. Dodatkowo, ponieważ średnia długość lotów stale się zwiększa, wzrost liczby tonokilometrów będzie następował szybciej niż wzrost ilości przewożonych ładunków [9].



Freight tonne-kilometres	Tonokilometry ładunków (mln)
Total	łącznie
International	Międzynarodowe
Domestic	Krajowe
ACTUAL	RZECZYWISTY
FORECAST	PROGNOZOWANY
High	Najwyższy
Most likely	Najbardziej prawdopodobny
Low	Najniższy

Ilustracja 3.4. Ogólnoświatowe trendy na rynku regularnych przewozów towarowych – 1985–2025 (Państwa członkowskie ICAO) [9]

				Average annual growth rate (per cent)	
	Actual 1985	Actual 2005	Forecast 2025	1985-2005	2005-2025
Freight tonne-kilometres (millions)					
Total	39 813	142 580	510 000	6.6	6.6
International	29 384	118 480	452 120	7.2	6.9
Domestic	10 429	24 100	57 880	4.3	4.5
Freight tonnes carried (thousands)					
Total	13 742	37 660	145 000	5.2	5.5
International	5 884	22 630	110 000	7.0	6.5
Domestic	7 858	15 030	35 000	3.3	3.4

Source: ICAO.

Freight tonne-kilometres	Tonokilometry ładunków (mln)
Total	łącznie
International	Międzynarodowe
Domestic	Krajowe
Actual	Rzeczywisty
Forecast	Prognozowany
Freight tonnes carried	Liczba ton przewiezionych ładunków (tys.)
Average annual growth rate	Średni wzrost roczny (proc.)
Source: ICAO	Źródło: ICAO

Tabela 3.5. Regularne przewozy towarowe – prognoza ICAO (1985–2025) (Państwa członkowskie ICAO) [9]

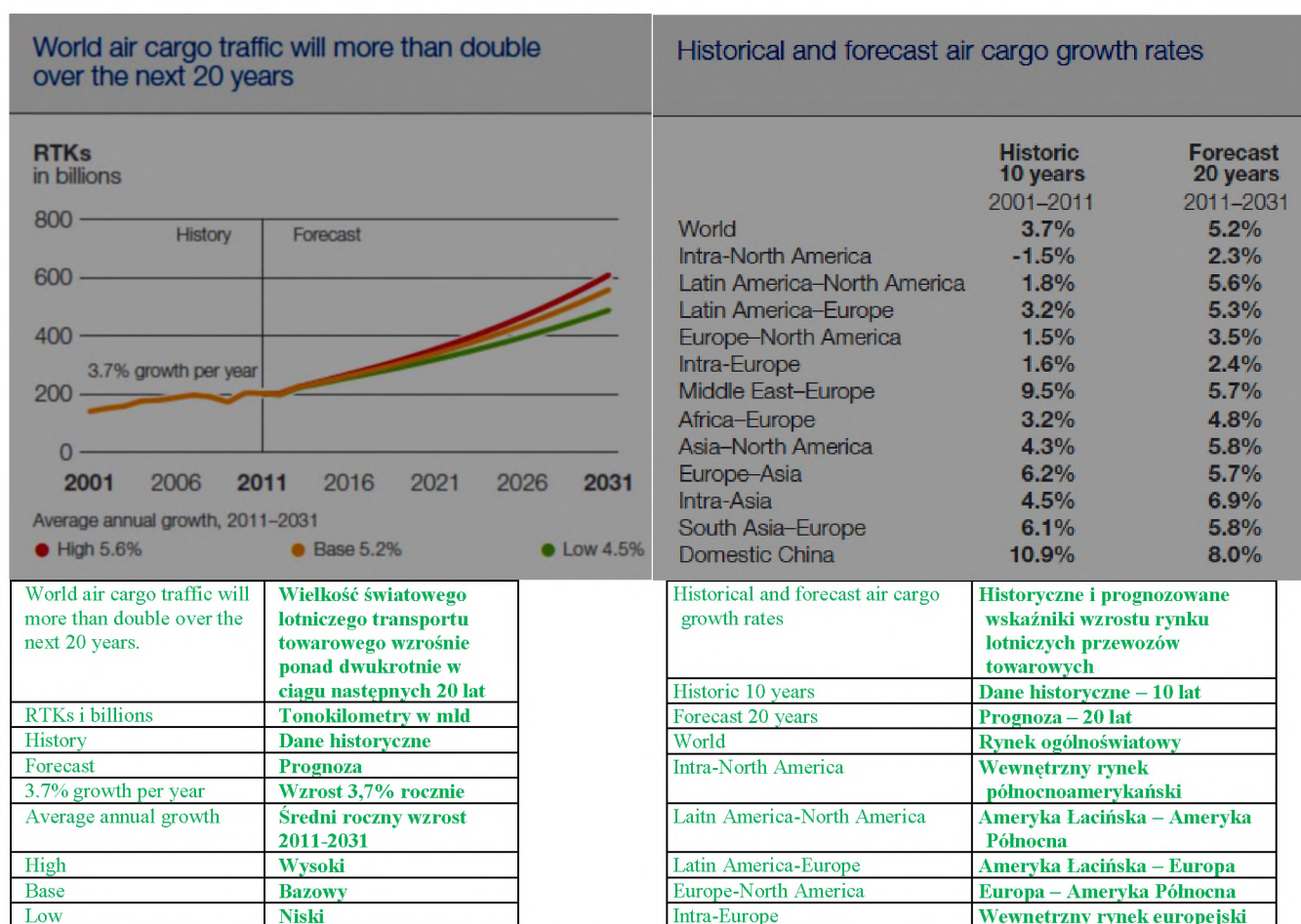
Prognoza krótkookresowa Międzynarodowego Zrzeszenia Przewoźników Lotniczych

Według prognoz Międzynarodowego Zrzeszenia Przewoźników Lotniczych (IATA) światowe rynki przewozów towarowych zakończą 2012 r. na poziomie o 0,4% niższym niż 2011 r. Obserwując stały wzrost możliwości przewozowych przy jednoczesnym spadku obrotów w handlu międzynarodowym, IATA ocenia „pesymistycznie” również rentowność lotniczego transportu towarowego, przewidując jej spadek o 2% poniżej poziomu z 2011 r. Nowe prognozy zrzeszenia są niższe od poprzednich. Na początku roku IATA prognozowała 0,3% wzrostu ruchu towarowego w ujęciu rok do roku i rentowność na niezmiennym poziomie w ciągu całego roku. W swoim oświadczeniu prasowym zrzeszenie wskazało na rozbieżność pomiędzy podażą i popytem jako główną przyczynę późniejszego obniżenia prognoz. W ciągu pierwszych ośmiu miesięcy 2012 r. możliwości przewozowe przekraczały zapotrzebowanie o 3%, co było widoczne głównie w przypadku operacji samolotami pasażerskimi. Ponieważ niemal połowa wszystkich ładunków lotniczych przewożona jest w ładowniach samolotów pasażerskich, dopasowanie podaży do popytu może, zdaniem IATA, stanowić poważne wyzwanie. Podobny problem może nękać branżę lotniczą jeszcze w 2013 r. Według przewidywań zrzeszenia rentowność przewozów towarowych w 2013 r. spadnie o dalsze 1,5%, nawet pomimo odbicia w obszarze handlu międzynarodowego. Prognozy na 2013 r., dotyczące obrotów handlowych, zakładają wzrost o 5,1% rok do roku, w porównaniu z 3,4% wzrostu spodziewanego w 2012 r. Ogólnie jednak IATA podwyższyła swoje prognozy na 2012 r. dla całej branży lotniczej. Według przewidywań zrzeszenia przewoźnicy zarobią w tym roku 4,1 mld dol., czyli o 1,1 mld więcej, niż prognozowano w czerwcu. IATA przewiduje również, że w 2013 r. zyski w skali ogólnoswiatowej wzrosną do 7,5 mld dol., nawet pomimo niskich marż netto, na poziomie 1,1% [286].

Długookresowa prognoza cargo firmy Boeing

Rozwój międzynarodowego transportu lotniczego będzie głównym czynnikiem napędzającym wzrost w obszarze lotniczych przewozów towarowych do 2031 r. Według prognoz w ciągu następných

20 lat wzrost ten wyniesie średnio 5,2% rocznie. Liczony w tonokilometrach (revenue tonne-kilometres, RTK) wzrost w obszarze lotniczego transportu towarowego, z uwzględnieniem operacji kurierskich, osiągnie średnio 5,3% rocznie. W przypadku poczty lotniczej wskaźnik wzrostu będzie znacznie niższy, bo do 2031 r. będzie wynosił średnio 0,9% rocznie. Ogólnie światowy lotniczy ruch towarowy zwiększy się z 202,4 mld RTK w 2011 r. (spadek w porównaniu z rekordowym wynikiem 204,2 mld RTK w 2010 r.) do ponad 558,3 mld RTK w 2031 r. Czołowym graczem w branży pozostanie Azja, obszar o najwyższych wskaźnikach wzrostu, szczególnie na krajowym rynku chińskim i na kierunkach między różnymi krajami kontynentu, gdzie wyniosą one odpowiednio średnio 8% i 6,9% rocznie. W przypadku połączeń pomiędzy Ameryką Łacińską i Ameryką Północną oraz Europą tempo wzrostu będzie się utrzymywać na średnim poziomie ogólnoświatowym, podobnie jak na kierunkach łączących Bliski Wschód z Europą. Z kolei dojrzałe rynki północnoamerykański i europejski będą notować wzrosty niższe od ogólnoświatowego poziomu. W całości wielkość światowego lotniczego transportu towarowego wzrośnie ponad dwukrotnie w ciągu następnych 20 lat (ilustracja 3.5 i tabela 3.6) [287].

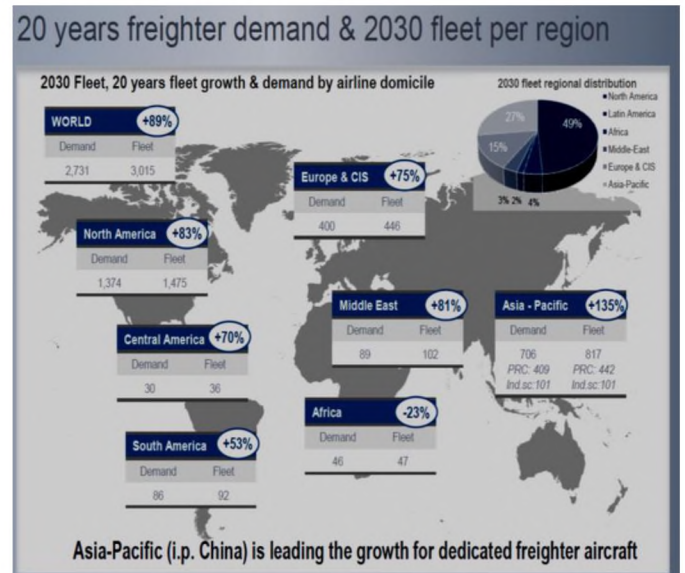
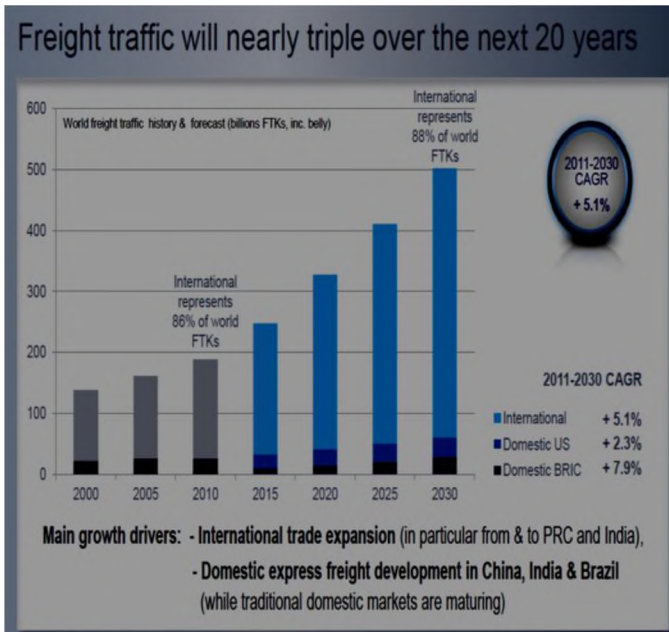


Ilustracja 3.5. Długookresowa prognoza cargo firmy Boeing [287]

Tabela 3.6. Prognoza cargo firmy Boeing dla poszczególnych regionów [287]

Długookresowa prognoza cargo firmy Airbus

Pozytywne trendy na światowym rynku przewozów towarowych potwierdzają również prognozy czołowego europejskiego producenta samolotów – konsorcjum Airbus. Poniższe liczby pokazują długookresowe prognozy firmy dotyczące ilości cargo (ilustracja 3.6) oraz wykorzystania samolotów transportowych (ilustracja 3.7) do 2030 r. [286].



Freight traffic will nearly triple over the next 20 years	Wielkość światowego transportu towarowego wzrośnie niemal trzykrotnie w ciągu następnyc 20 lat
World freight traffic history and forecast	Dane historyczne i prognozy dotyczące światowego transportu towarowego (mld FTK, w tym samoloty pasażerskie)
International represents 86% of world FTKs	Transport międzynarodowy stanowi 86% światowych FTK
International represents 88% of world FTKs	Transport międzynarodowy stanowi 88% światowych FTK
2011-2031 CAGR	Wzrost ruchu cargo 2011-2031
International	Międzynarodowy
Domestic US	Wewnętrzny USA
Domestic BRIC	Wewnętrzny BRIC
Main growth drivers	Główne czynniki wzrostu
International trade expansion	Rozwój handlu międzynarodowego (szczególnie do i z Chin oraz Indii)
Domestic express development in China, India & Brazil	Rozwój krajowych usług kurierskich w Chinach, Indiach i Brazylii (przy dojrzałych tradycyjnych rynkach krajowych)

Ilustracja 3.6. Długookresowa prognoza firmy Airbus dotycząca ilości cargo [288]

20 years freighter demand & 2030 fleet per region	Zapotrzebowanie na samoloty transportowe w ciągu kolejnych 20 lat i wielkość floty w 2030 r. w poszczególnych regionach
2030 fleet, 20 years fleet growth & demand by airline domicile	Flota w 2030, zwiększenie floty i zapotrzebowanie wśród linii lotniczych w ciągu 20 lat
2030 fleet distribution	Rozkład zapotrzebowania na flotę w 2030 r.
North America	Ameryka Północna
Latin America	Ameryka Łacińska
Africa	Afryka
Middle East	Bliski Wschód
Europe & CIS	Europa i WNP
Asia-Pacific	Azja-Pacyfik
WORLD	ŚWIAT
Central America	Ameryka Środkowa
South America	Ameryka Południowa
Demand	Zapotrzebowanie
Fleet	Flota
Asia-Pacific (i.p. China) is leading the growth for dedicated freighter aircraft	Azja-Pacyfik (głównie Chiny) to rejon największego zapotrzebowania na dedykowane samoloty transportowe

Ilustracja 3.7. Długookresowa prognoza firmy Airbus dotycząca wykorzystania samolotów transportowych [288]

Obecny system regulujący lotnicze przewozy towarowe obejmuje ok. 4000 dwustronnych umów o służbach lotniczych. Jednak silny trend wzrostowy w obszarze transportów i logistyki lotniczej wskazuje potrzebę stworzenia wspólnej platformy regulacyjnej, niezależnej od rozwiązań wykorzystywanych w przewozach pasażerskich. W coraz bardziej zglobalizowanym i zliberalizowanym środowisku lotnicze operacje towarowe muszą być tak wydajne, oszczędne i szybkie, jak to tylko możliwe, by spełniać wymagania klientów, szczególnie w przypadku wartościowych i pilnych przesyłek. Jednym z głównych problemów lotniczego transportu towarowego jest kwestia praw dostępu do rynku, regulowana w dwustronnych i wielostronnych umowach lotniczych. Umowy te nakładają zazwyczaj ograniczenia dotyczące wolności lotniczych, punktów, tras, taryf czy częstotliwości. Jednak transport towarowy ma zupełnie inną strukturę połączeń, przepływów sezonowych i opłat niż transport pasażerski. Biorąc pod uwagę coraz silniejsze tendencje globalizacyjne i liberalizacyjne w sektorze przewozów towarowych, należałoby uznać potrzebę stworzenia odrębnej platformy regulacyjnej dla międzynarodowych operacji w tym obszarze.

Globalizacja i liberalizacja w zakresie praw dostępu do rynku stałaby się dodatkowym bodźcem wzrostu gospodarczego, ponieważ pozwoliłaby siłom rynkowym decydować o przepływach towarowych na wzajemnie powiązanim ogólnoswiatowym rynku. Dodatkowo liberalizacja otwarłaby nowe możliwości przed mniejszymi portami lotniczymi, odciążałaby zatłoczone huby pasażerskie, umożliwiłaby skuteczniejsze wykorzystanie coraz bardziej ograniczonych możliwości portów lotniczych i dostarczyła impulsu dla światowego handlu i tworzenia miejsc pracy [282].

Globalizacja rynku lotniczego – zalety i wady

Globalizacja branży międzynarodowego transportu lotniczego obejmuje wiele aspektów i odgrywa istotną rolę w procesie rozwoju światowego lotnictwa cywilnego. Do najważniejszych pozytywnych aspektów globalizacji możemy zaliczyć:

- rozwój globalnego systemu bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego, który łączy czołowe organizacje międzynarodowe i regionalne, międzyrządowe i pozarządowe w działaniach na rzecz poprawy bezpieczeństwa, ochrony oraz rentowności działań lotniczych;
- rozwój i komercjalizacja światowego systemu portów lotniczych;
- koordynacja, standaryzacja i upowszechnienie działań transgranicznych służb żeglugi powietrznej;
- stworzenie konkurencyjnego i niedyskryminacyjnego środowiska dla przewoźników działających na międzynarodowym rynku lotniczym;
- znaczący wzrost liczby operacji w obszarze przewozów towarowych i logistyki lotniczej.

Jednocześnie globalizacja przyniosła wiele poważnych rodzajów ryzyka i zagrożeń:

- możliwa utrata kontroli państw nad własnym rynkiem transportu lotniczego (obejmującym przewoźników, porty lotnicze oraz służby żeglugi powietrznej);
- bankructwa krajowych linii lotniczych spowodowane silną konkurencją ze strony silniejszych finansowo członków globalnych sojuszy lotniczych i przewoźników niskokosztowych;
- programy oszczędnościowe, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa i jakości usług.

Złożona kwestia globalizacji światowego rynku lotniczego ma ogromny wpływ na najnowszy rozwój i działania w sektorze lotnictwa cywilnego [289, 290].

3.2. Międzynarodowe regulacje w obszarze taryf lotniczych w kontekście globalizacji i liberalizacji rynku lotniczego

Taryfy lotnicze to jeden z trzech najważniejszych elementów regulacji obowiązujących w międzynarodowym transporcie lotniczym. Pozostałe dwa kluczowe elementy to prawa dostępu do rynku i wielkość przewozów. Obecnie wyróżniamy następujące poziomy międzynarodowych regulacji w obszarze taryf lotniczych:

- wielostronna koordynacja taryf, nadzorowana przez Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Lotniczych (IATA);
- koordynacja taryf w ramach międzyrządowych umów o współpracy w transporcie lotniczym, nadzorowana przez Organizację Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO);
- polityka taryfowa linii lotniczych, realizowana w ramach ograniczeń i możliwości stwarzanych przez globalne sojusze lotnicze;
- polityka ukrytych taryf, realizowana przez linie lotnicze na podstawie możliwości i domniemań wynikających z powyższych poziomów regulacji [282].

Wielostronna koordynacja taryf (rekomendacje IATA)

Najstarszym i najpowszechniejszym systemem wielostronnej koordynacji taryf lotniczych jest system konferencji transportowych (TC) IATA. Konferencje służą uzgadnianiu i koordynacji taryf w ramach trzech stref taryfowych – TC1 (Ameryka Południowa, Środkowa i Północna), TC2 (Europa, Afryka, Bliski Wschód) i TC3 (Azja Centralna i Południowo-Wschodnia, Daleki Wschód, Australia i Oceania), pomiędzy parami tych stref taryfowych oraz na poziomie ogólnoświatowym. W ten sposób IATA opracowuje tylko metodologię i koordynuje działania. Wszystkie najważniejsze decyzje dotyczące struktury i poziomów taryf podejmuje bezpośrednio członkowie stowarzyszenia, uzgadniając wspólne stanowisko podczas dyskusji. Rządy państw mogą przyjmować rozmaite stanowiska wobec działań IATA i decyzji podejmowanych przez jego członków, np.:

- mogą je wykorzystywać jako narzędzie ustalania międzynarodowych taryf lotniczych i instrument upraszczający system współpracy między liniami lotniczymi na całym świecie;
- mogą zajmować neutralne stanowisko, nie zakazując ani nie nakazując wprowadzenia w życie tych decyzji;
- mogą wprowadzać ograniczenia lub dodatkowe warunki wdrożenia tych decyzji [292].

W ciągu wielu lat funkcjonowania system wielostronnej koordynacji taryf IATA stał się bardziej elastyczny, czytelny i mniej obligatoryjny. Rodzi się jednak pytanie, czy zmiany będą wystarczające, by dostosować ten system do bardziej konkurencyjnych warunków działania, czy też sprawią, że utraci swoją skuteczność jako narzędzie podejmowania decyzji spełniających wymagania linii lotniczych i rządów w procesie wielostronnej koordynacji taryf.

Koordynacja taryf w ramach międzyrządowych umów o współpracy w transporcie lotniczym (rekomendacje ICAO)

Najważniejsze powody, dla których państwa włączają się w proces regulacji międzynarodowych taryf lotniczych, to:

- zapewnienie krajowym przewoźnikom rzeczywistej możliwości oferowania usług międzynarodowych przewozów lotniczych;
- zapewnienie krajowym przewoźnikom warunków sprawiedliwej konkurencji w obszarze międzynarodowych przewozów lotniczych;
- wsparcie realizacji ważnych dla kraju celów i zadań, np. wsparcie turystyki i handlu międzynarodowego;
- pobudzenie konkurencji w obszarze międzynarodowego transportu lotniczego, np. poprzez

- zapewnienie elastyczności polityki taryfowej danych przewoźników;
- zaspokojenie potrzeb pasażerów korzystających z międzynarodowych przewozów lotniczych;
- utrzymanie różnic między regularnymi i nieregularnymi połączeniami lotniczymi.

Istnienie zróżnicowanych typów modeli taryfowych wynika zarówno z różnych przyczyn regulacji taryfowych, jak i z faktu, że przyczyny te nie zawsze rozumiane są w taki sam sposób przez regulujące państwa. Dlatego niektóre modele taryfowe stanowią swego rodzaju kompromis uwzględniający różne podejścia państw-stron umów do regulacji taryf lotniczych. Rozwiązanie to, połączone z dążeniem linii lotniczych do stworzenia taryf dostosowanych do różnych rynków i różnych segmentów rynku, doprowadziło do powstania skomplikowanego i niejasnego systemu międzynarodowych taryf lotniczych.

W procesie koordynacji taryf lotniczych wykorzystuje się rozmaite kryteria oceny. Kryteria te można podzielić na cztery kategorie:

- kryteria związane z określonymi kosztami i warunkami zastosowania taryfy;
- kryteria związane z kosztami;
- kryteria związane z warunkami;
- kryteria związane z potencjalnymi skutkami oferowanej taryfy.

Niektóre inne kryteria, które nie odnoszą się do kosztów ani warunków wykorzystania określonej taryfy, uwzględniają następujące czynniki:

- Czy taryfa została uzgodniona (w ramach konsultacji linii lotniczych obsługujących daną trasę lub w wyniku wielostronnych działań koordynacyjnych z wykorzystaniem instrumentów IATA)?
- Czy dana taryfa jest wynikiem własnej inicjatywy linii lotniczej (której celem jest np. przejęcie pozycji lidera rynku), czy też jest to wspólna taryfa?
- Jeśli taryfa została przedstawiona przez zagraniczną linię lotniczą, jakie propozycje mają krajowi przewoźnicy?

Poniższe kryteria biorą pod uwagę koszty:

- Czy cena przekracza ustalony maksymalny limit?
- Czy cena znajduje się w zakresie ustalonym dla taryf w danej strefie?
- W jakim stopniu cena skorelowana jest z długoterminowymi, dokładnie przeliczonymi kosztami operacyjnymi, uwzględniając wymaganie dodatniego zwrotu z kapitału?

Kryteria jakościowe opierają się na odpowiedzi na pytanie, czy:

- taryfa jest sztucznie zaniżona z powodu dotacji rządowych lub innego wsparcia z zewnątrz;
- czy taryfa jest nieracjonalnie niska ze względu na pozycję konkurencyjną przewoźnika na rynku;
- czy taryfa jest zawyżona, by wymusić wyższe opłaty od klientów;
- czy taryfa jest nieracjonalnie wysoka lub restrykcyjna w wyniku nadużywania dominującej pozycji.

Ze względu na brak precyzji i subiektywny charakter tych kryteriów państwa napotykają na poważne trudności w osiągnięciu porozumienia i uzgodnieniu wspólnych taryf. Niektóre z tych kryteriów odnoszą się do potencjalnych negatywnych implikacji zastosowania jakiejś taryfy, np. czy nie będzie ona niesprawiedliwie dyskryminacyjna; czy nie ma służyć zbudowaniu pozycji monopolisty; czy nie doprowadzi do strat innych linii obsługujących daną trasę lub grupę tras [282].

Przez wiele lat dwie przeciwstawne koncepcje miały największy wpływ zarówno na rozwój międzynarodowego systemu taryf IATA, jak i na ograniczenia taryfowe zawarte w międzyrządowych umowach o współpracy w transporcie lotniczym. Jedna z tych koncepcji zakłada szczegółowe uregulowania kwestii taryf (międzyrządowe umowy o współpracy w lotnictwie typu Bermuda), a druga dąży do liberalizacji tego obszaru (umowy o liberalizacji usług lotniczych i o otwartych przestworzach). Do niedawna światowy rynek był podzielony w tej kwestii po połowie. Jednakże w ostatnim dziesięcioleciu zauważamy wyraźną tendencję na korzyść bardziej liberalnych rozwiązań.

Niedawno także Unia Europejska, pierwszy i najstarszy przeciwnik filozofii liberalizacji rynku lotniczego, zaczęła wykorzystywać wspólny potencjał lotnictwa cywilnego w regionie i podpisywać porozumienia „o otwartych przestworzach” nie tylko z krajami sąsiednimi (w tym z Ukrainą), ale również z dawnymi konkurentami, np. ze Stanami Zjednoczonymi. Stopniowe zmniejszanie zakresu regulacji prowadzi do uproszczenia procesu uzgadniania międzynarodowych taryf lotniczych. Rozwiązaniem najbliższym koncepcji pełnej liberalizacji są umowy o otwartych przestworzach, które zasadniczo znoszą kontrolę państwa nad procesem tworzenia taryf. Z jednej strony daje to liniom lotniczym nieograniczone możliwości kształtowania własnej polityki taryfowej i blokuje wszelkie ograniczenia – ale również wsparcie – ze strony państwa. Z drugiej jednak tego typu umowy eliminują wszelkie działania państwa służące ochronie narodowych przewoźników. Wprowadzenie przez Unię Europejską horyzontalnej umowy o otwartych przestworzach wywołało burzliwą dyskusję między zwolennikami i przeciwnikami takiego rozwiązania. Wśród pozytywnych aspektów takiego rozwiązania należy wspomnieć jego rolę we wzmocnieniu integracji Ukrainy z UE oraz zwiększenie potencjału i możliwości nie tylko głównego węzła – portu lotniczego Borispol – ale także lotnisk regionalnych i związany z tym rozwój systemu kontroli ruchu lotniczego. Z kolei najważniejszym czynnikiem negatywnym jest pogorszenie pozycji konkurencyjnej ukraińskich przewoźników, którzy nie należą do żadnego z globalnych sojuszy lotniczych [275].

Polityka taryfowa linii lotniczych, realizowana w ramach ograniczeń i możliwości stwarzanych przez globalne sojusze lotnicze

Jak wspomnieliśmy wcześniej, filozofia liberalizacji zyskała w ostatnim okresie wielu zwolenników i zaczęła obejmować kolejne ważne rynki lotnicze. Trend ten zaowocował znaczącym wzrostem konkurencji na trasach międzynarodowych. Jednak koncepcja wolnej konkurencji nie jest pomysłem idealnym i może powodować stagnację oraz negatywne tendencje na różnych etapach realizacji, szczególnie w zmieniających się warunkach rynkowych. Bez wątplenia pod wieloma względami wolna konkurencja między liniami lotniczymi przynosi liczne korzyści klientom – pasażerom i właścicielom towarów. Konkurencja wymaga od linii lotniczych ciągłego doskonalenia i rozwoju – wyższego poziomu usług i większej elastyczności cenowej. Ciągły wzrost kosztów operacyjnych zmusza jednak przewoźników do poszukiwania oszczędności, co może doprowadzić do obniżenia jakości i poziomu bezpieczeństwa świadczonych usług. Jednocześnie nieustanne funkcjonowanie na granicy opłacalności lub też obsługa nieopłacalnych połączeń może tak naprawdę zagrozić istnieniu przedsiębiorstw lotniczych. W takich przypadkach linie lotnicze często przyjmują filozofię porzucania konkurencji na rzecz współpracy i koordynacji działań biznesowych ze swoimi wcześniejszymi rywalami (patrz rozdział 3.1).

Jednym z najbardziej wpływowych czynników rozwoju rynku jest pojawienie się strategicznych światowych sojuszy linii lotniczych. Główne powody ich tworzenia to nieustanny wzrost kosztów operacyjnych i rosnąca presja konkurencyjna ze strony przewoźników niskokosztowych, którzy działają bardzo agresywnie w różnych strefach taryfowych IATA. Konsolidacja najsilniejszych linii lotniczych, reprezentujących wszystkie regiony świata, zapewnia im geometryczny wzrost przewagi konkurencyjnej, możliwy dzięki:

- wspólnej koordynacji taryf międzynarodowych;
- ujednoczeniu programów lojalnościowych;
- wspólnej sprzedaży usług w ramach wielostronnych porozumień międzyliniowych;
- wspólnym wykorzystaniu tras na całym świecie;
- optymalizacji wykorzystania floty samolotów;
- koordynacji rozkładów lotów i wspólnej promocji połączeń [275, 282].

Kolejnym etapem konsolidacji mogą być strategiczne inwestycje w rozwój sojuszy. Obecnie sojuszami, które w największym stopniu wpływają na sytuację na rynku, są „Star Alliance”, „One World”, „Sky Team” oraz „Wings”. Reprezentują one linie lotnicze obsługujące ponad 50% regularnego światowego ruchu pasażerskiego. Każdy z największych sojuszy ma wśród swoich członków przewoźników pochodzących ze wszystkich trzech stref taryfowych IATA. W efekcie

pasażerowie odwiedzający biuro sprzedaży lub stronę internetową dowolnego członka sojuszu mogą kupić bilety do każdego miejsca na świecie. Wygląda to zupełnie jak w przypadku wykorzystania publikowanych taryf IATA, jednak w tym przypadku całkowita cena biletu będzie niższa, połączenie będzie znacznie wygodniejsze, poziom obsługi będzie odpowiadał standardom całego sojuszu, pasażer będzie miał pewność odpowiedniego ubezpieczenia i możliwość skorzystania z globalnego programu lojalnościowego. Wszystko to sprawia, że oferta sojuszu jest znacznie atrakcyjniejsza od oferty każdego pojedynczego klasycznego przewoźnika. A przy tym, dzięki koordynacji działań, członkowie sojuszu mogą osiągać znaczące oszczędności bezpośrednich i pośrednich kosztów operacyjnych, marketingowych, sprzedażowych i ogólnych. Wszystkie powyższe elementy pozwalają w pełni wykorzystać zjawisko ekonomii skali i umożliwiają oferowanie klientom bardziej elastycznych, tańszych i efektywniejszych taryf (patrz także rozdział 3.1).

Polityka ukrytych taryf linii lotniczych

Stworzenie własnej polityki dotyczącej taryf międzynarodowych to jeden z priorytetowych instrumentów strategii konkurencyjnej każdej linii lotniczej. Polityka taryfowa ma dwa główne cele – zwiększenie liczby pasażerów na lotach międzynarodowych (współczynnika załadunku) oraz zwiększenie wskaźnika rentowności operacji w przeliczeniu na 1 pasażerokilometr (współczynnika rentowności). Z zasady oba te współczynniki są ze sobą powiązane. Struktura i poziom taryf zależą będą bezpośrednio od rodzaju linii lotniczej i zakresu jej działalności. Na tej podstawie możemy wyróżnić trzy rodzaje polityk taryfowych linii lotniczych:

- polityka taryfowa regularnej międzynarodowej linii lotniczej;
- polityka taryfowa niskokosztowej linii lotniczej;
- polityka taryfowa czarterowej linii lotniczej.

Polityka taryfowa regularnej międzynarodowej linii lotniczej jest zazwyczaj najlepiej rozwiniętym i złożonym instrumentem kreowania popytu i elementem systemu promocyjnego. Jej przygotowanie wymaga szczegółowych badań zewnętrznych i wewnętrznych czynników cenowych. Wpływ na jej kształt mają wszystkie omówione wyżej poziomy regulacji, z ich zaletami i restrykcjami.

W efekcie prowadzonych analiz linie lotnicze tworzą tzw. normalne taryfy, czyli podstawowe taryfy odzwierciedlające klasy obsługi (F – pierwsza, C – biznes, Y – ekonomiczna). Niektóre linie wprowadzają dodatkową klasę – Premium. Tego typu taryfy to najważniejszy instrument służący zapewnieniu odpowiedniego współczynnika rentowności.

Z kolei w celu osiągnięcia jak najwyższego współczynnika załadunku linie lotnicze konstruują taryfy specjalne i obniżone. Decyzje o ich wprowadzeniu podejmuje się na podstawie wskaźników elastyczności popytu oraz struktury bieżących i możliwych przepływów pasażerskich. Wśród taryf specjalnych wyróżniamy taryfy wycieczkowe, promocyjne, grupowe oraz taryfy dla biur podróży. Taryfy obniżone z kolei nie są tak naprawdę oddzielnymi taryfami, lecz zniżkami od taryf publikowanych, przysługującymi specjalnym kategoriom pasażerów. Głównym problemem powszechnego wykorzystania tych narzędzi jest ryzyko wypełnienia samolotów pasażerami podróżującymi z biletami o niższych cenach (niski współczynnik rentowności). By zapobiec tego typu niepożądanym sytuacjom, linie lotnicze wprowadzają dodatkowe regulacje dostępu do taryf specjalnych dla sieci sprzedaży (kontrola strategiczna) i w określonym czasie (kontrola operacyjna). W przypadku pierwszego typu ograniczeń linie lotnicze podejmują decyzje o udostępnieniu specjalnych taryf sieci sprzedaży w kraju i/lub za granicą na podstawie szczegółowych i starannych badań popytu na danym rynku. Sprzedaż odbywa się z wykorzystaniem następujących kanałów: sieć własna (biura linii lotniczej), własne kanały zdalne (centra obsługi telefonicznej, strony internetowe), pośrednicy (partnerskie linie lotnicze), partnerzy obsługujący wspólnie loty łączone (partnerzy code-share), główni agenci (działający w ramach umów o współpracy), inni agenci (działający w ramach umów o sprzedaży) oraz biura podróży (działające w ramach umów o sprzedaży). Z kolei kontrola operacyjna polega na stopniowym ograniczaniu dostępu do niższych taryf w miarę zbliżania się daty wylotu, z praktycznym zablokowaniem tego dostępu w samym dniu wylotu. Co więcej, warunki sprzedaży taryf specjalnych zawierają zazwyczaj również dodatkowe ograniczenia, związane z

uprawnieniami do korzystania, liczbą przesiadek i długością przerw w podróży, sezonowością, dniem tygodnia, minimalnym i maksymalnym okresem pobytu w kraju docelowym, kategorią pasażerów (taryfy promocyjne), wielkością grupy (taryfy grupowe) czy dodatkowymi usługami turystycznymi (taryfy dla biur podróży).

Ostatnim etapem tworzenia polityki taryfowej linii lotniczej jest program lojalnościowy, który pozwala ograniczyć nieuniknione straty związane z walką cenową na rynku lotniczym i jednocześnie może być czynnikiem stymulującym dywersyfikację usług. Doskonalenie polityki cenowej regularnej międzynarodowej linii lotniczej wymaga zazwyczaj znaczących inwestycji (finansowanych z kosztów ogólnych przedsiębiorstwa) i stałego monitorowania ze strony departamentów taryf, sprzedaży, marketingu, kontroli operacyjnej i zarządzania zyskami.

Polityka cenowa niskokosztowych linii lotniczych różni się diametralnie. Jej głównym założeniem jest osiągnięcie 100% wypełnienia lotów (maksymalizacja współczynnika załadunku), przy maksymalnym ograniczeniu kosztów operacyjnych. Przewoźnicy tego typu prowadzą sprzedaż niemal wyłącznie przez Internet, nie wykorzystują klasycznych pośredników, oferują uproszczony system taryf i tylko jedną, najniższą, klasę obsługi. Filozofia tego typu działalności opiera się na budowaniu popytu poprzez dumping rynkowy. Niski współczynnik rentowności rekompensowany jest efektem skali w całej sieci połączeń. Zaczynamy też jednak obserwować stopniową ewolucję obu modeli biznesowych linii lotniczych (tradycyjnego i niskokosztowego), która sprawia, że coraz bardziej się do siebie upodabniają. I tak, przewoźnicy niskokosztowi wprowadzają szeroko reklamowane obniżki cenowe, podwyższając jednocześnie stawki bazowe. Z kolei tradycyjne linie lotnicze podejmują działania skierowane na obniżenie kosztów operacyjnych i konsolidację usług, umożliwiające wykorzystanie efektu skali.

Kwestia regulacji polityki cenowej linii czarterowych i lotów czarterowych w ogóle jest w znacznie mniejszym stopniu przedmiotem kontroli na wyższych poziomach regulacyjnych. W tym przypadku dużo większe znaczenie ma wpływ regularnych międzynarodowych linii lotniczych wyznaczonych do obsługi tych samych tras. Taryfy czarterowe konstruowane są zazwyczaj doraźnie, w odniesieniu do konkretnego celu i sytuacji, a wyrażone mogą być w formie ogólnej ceny za wynajem (zarówno w przypadku pojedynczych, jak i seryjnych operacji), stawki za godzinę wynajmu samolotu z załogą (umowy ACMI), w przeliczeniu na jednego pasażera lub jako połączenie kilku elementów (np. wynajem samolotu plus stawka za pasażera – tzw. czarter dzielony) [293].

Rozwój procesów globalizacyjnych i liberalizacyjnych na rynku lotniczym zmienia obecny system regulacji międzynarodowych taryf lotniczych. Z jednej strony zmiany te oferują liniom lotniczym możliwość tworzenia bardziej elastycznych polityk taryfowych, jednak z drugiej strony utrwalają istniejącą na rynku silną konkurencję. Współczesne tendencje w tym obszarze wskazują na proces stopniowego odchodzenia od protekcjonizmu państwa i przeniesienia funkcji uzgadniania taryf z poziomu międzyrządowego na poziom skonsolidowanych linii lotniczych. W przyszłości utrzymanie dopuszczalnego poziomu konkurencji na rynku lotniczym będzie wymagało stałego monitorowania regulacji taryfowych międzynarodowych linii lotniczych i wprowadzenia rozmaitych działań preferencyjnych w zakresie polityki taryfowej [276].

3.3. Analiza opóźnień statków powietrznych w fazie przylotu do portu lotniczego

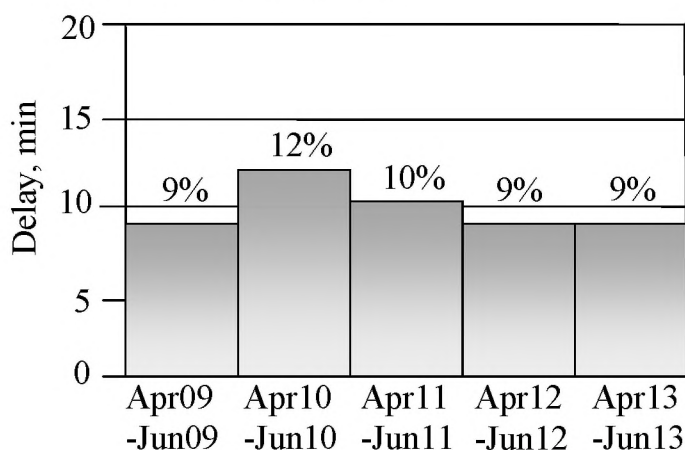
Opóźnienia występujące w zarządzaniu przepływem ruchu powietrznego (Air Traffic Flow Management, ATFM), wynikające ze zróżnicowanych przyczyn, możemy podzielić na cztery główne kategorie [300]:

- opóźnienia wynikające z przyczyn związanych z kontrolą ruchu lotniczego (ATC, podczas lotu lub w rejonie lotniska);
- opóźnienia wynikające z infrastruktury portu lotniczego;
- opóźnienia wynikające z warunków meteorologicznych;
- opóźnienia wynikające z innych przyczyn, nieobjętych powyższymi kategoriami (działań wojskowych, wydarzeń specjalnych) lub związanych z zarządzaniem siecią (trasy ATC).

Opóźnienia związane z portami lotniczymi stanowią 43,4% wszystkich opóźnień ATFM.

Jedną z najważniejszych przyczyn opóźnień w rejonie portów lotniczych jest różnica między natężeniem ruchu lotniczego i przepustowością portów, a także nieprzestrzeganie slotów czasowych wyznaczanych przez ATFM.

Według autorów [269] średnia długość opóźnień w przylocie, we wszystkich kategoriach, zmniejszyła się w 2013 r. z 10 do 9 min (ilustracja 3.8).



Delay, min	Opóźnienie, min.
Apr-Jun	kwiecień-czerwiec

Ilustracja 3.8. Średnia długość opóźnienia w przylocie (wszystkie kategorie) [305]

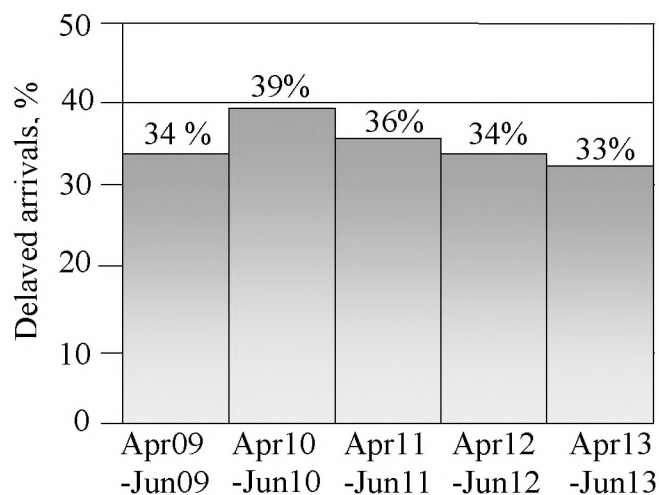
Z kolei procent opóźnionych lotów zmniejszył się w porównaniu z 2012 r. o 1,3 punktu procentowego, do 33,3% (ilustracja 3.9).

W Europie czynnikiem, który ma największy wpływ na opóźnienia w przylocie, jest punktualność odlotów. Najprostszym sposobem poprawy punktualności w przylocie jest zatem poprawa punktualności odlotów.

Natomiast punktualność przylotów jest bardzo ważnym wskaźnikiem stabilności sieci danego przewoźnika, znacznie istotniejszym od punktualności odlotów.

Punktualne przyloty umożliwiają pasażerom przesiadkę na planowane połączenia, służbom – na przygotowanie samolotu do kolejnego lotu, załogom obsługującym różne połączenia – na przesiadkę do innej maszyny, a pracownikom portu lotniczego pozwalają na sprawne i terminowe zarządzanie ruchem pasażerów.

Linie lotnicze nadal koncentrują się na fazie startu samolotu, ponieważ punktualny odlot jest najlepszą gwarancją punktualnego przylotu. Jednak nawet w przypadku terminowego odlotu silne wiatry przeciwne, nierealistyczne czasy przelotu lub wydłużone procedury oczekiwania mogą spowodować opóźnienia w przylocie samolotu.



Delayed arrivals, % Apr-Jun	Opóźnione przyloty, % kwiecień-czerwiec

Ilustracja 3.9. Procent opóźnionych przylotów (wszystkie kategorie). Przyszły popyt w lotnictwie zależy będzie od możliwości obsługi przez porty lotnicze rosnącej liczby operacji i większych statków powietrznych przewożących większą liczbę pasażerów [305]

Przepustowość systemu portu lotniczego zależy od wielu czynników, w tym od układu portu lotniczego, sposobu organizacji i wykorzystania przestrzeni powietrznej, procedur operacyjnych, warunków meteorologicznych, rodzajów obsługiwanych statków powietrznych oraz wykorzystywanych technologii [301].

Duża liczba przylotów statków powietrznych do portu lotniczego w jednym okresie może spowodować zbytne zatłoczenie przestrzeni powietrznej i opóźnienia. Liczba opóźnień to wskaźnik pokazujący, że liczba operacji osiąga lub przekracza poziom przepustowości portu lotniczego.

W literaturze proces obsługi przepływu ruchu przylotowego opisywany jest i oceniany za pomocą teorii kolejek.

Autorzy pracy [299] wykorzystują rezultaty teorii kolejek do obliczania zależności pomiędzy niepewnościami związanymi z trajektorią lotu i efektywnością przepływu ruchu w przestrzeni powietrznej. Proponują zastosowanie metody przybliżonej analizy sieci kolejkowych, która pozwala modelować procesy przylotu i obsługi w pierwszym i drugim momencie.

Praca [304] prezentuje porównawczą analizę środowiskową opóźnień na ziemi i w locie, wraz z oceną związanych z nimi kosztów.

Publikacja [298] przedstawia charakterystykę przepływu ruchu lotniczego i analizę kolejkową opóźnień. Analiza zawiera pomiar opóźnień w przepływie ruchu przylotowego i omawia strategię absorbowania tych opóźnień podczas fazy przelotu, zamiast fazy zniżania.

Praca [294] opisuje metodę modelowania opóźnień lotów właściwą dla tego typu zastosowań, a szczególnie dla opóźnień spowodowanych ograniczeniami przepustowości portów lotniczych.

W publikacji [302] autorzy tworzą model kolejki statków powietrznych lądujących na jednej drodze startowej w warunkach operacji opartych na trajektoriach. Badacze wykorzystują rekurencyjny model kolejki i przybliżenie Clarka dla maksymalnego skończonego zbioru zmiennych losowych, by przeanalizować i oszacować średnią oraz zmienność opóźnień lotów.

Praca [297] prezentuje modele analizy przepływu ruchu lotniczego. Modele te umożliwiają obserwację i badanie mechanizmów zagęszczenia ruchu.

Wreszcie, publikacja [300] przedstawia metodologię analizowania wpływu niepewności związanych z trajektorią na efektywność przepływu ruchu lotniczego, wykorzystującą teorię kolejek. Metodologia ta zakłada stworzenie modelu każdej policzalnej niepewności w operacjach lotniczych i ocenę ich wpływu na poszczególne parametry modelu kolejki, takie jak rozkład współczynnika przylotów, rozkład czasów oczekiwania, prawdopodobieństwo przeniesienia oraz liczba serwerów w każdym węźle.

Celem niniejszego rozdziału jest opracowanie modelu procesu obsługi przylotu do portu lotniczego oraz analiza czasu oczekiwania na lądowanie i czasu obsługi.

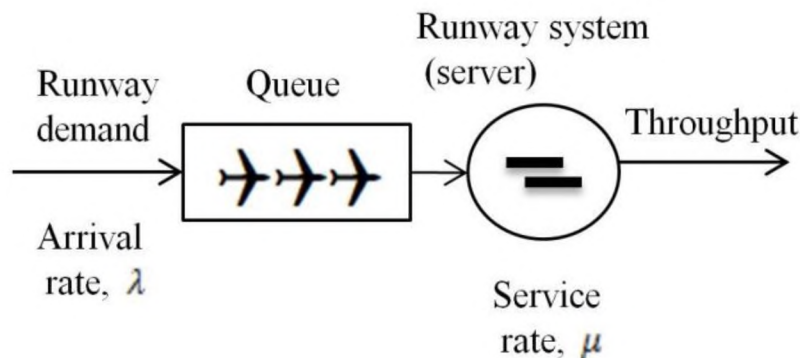
Proces obsługi przylotu do portu lotniczego

Zarządzanie natężeniem ruchu to termin o szerokim znaczeniu, obejmujący liczne nakładane odgórnie środki, takie jak sloty czasowe, które ograniczają liczbę lotów planowanych w danym okresie, a tym samym pozwalają zmniejszyć zagęszczenie przestrzeni powietrznej i liczbę opóźnień, a także efektywnie wykorzystywać dostępne ograniczone możliwości [301].

Zbytnie zatłoczenie pojawia się zazwyczaj jako efekt połączenia kilku elementów:

- przepływu klientów oczekujących na obsługę;
- restrykcji ograniczających dostępność obsługi;
- nieregularności w przepływie klientów, przebiegu operacji lub obu.

W zarządzaniu ruchem lotniczym rolę klientów odgrywają statki powietrzne oczekujące na dostęp do drogi startowej (ilustracja 3.10).



Runway demand	Potrzeba wykorzystania drogi startowej
Arrival rate	Wskaźnik przylotów
Queue	Kolejka
Runway system	System drogi startowej (serwer)
Service rate	Tempo obsługi
Throughput	Wydajność

Ilustracja 3.10. Przykładowa sieć kolejki przedstawiająca proces przylotu [305]

Obecnie największy wpływ na przepustowość dróg startowych ma pięć czynników ograniczających tempo obsługi w portach lotniczych [295]:

- separacja statków powietrznych – czyli minimalna odległość pomiędzy kolejnymi statkami powietrznymi podchodzącymi do lądowania;
- separacja pozioma, szczególnie w złych warunkach pogodowych, pomiędzy statkami powietrznymi podchodzącymi do lądowania na równoległych drogach startowych na jednym lotnisku;
- kolejność i separacja pomiędzy statkami powietrznymi startującymi i lądującymi na przecinających się drogach startowych;
- kolejność startów i lądowań statków powietrznych na jednej drodze startowej;
- kolejność statków powietrznych podchodzących do lądowania na położonych blisko siebie lotniskach, jeśli jeden ze statków powietrznych musi przeciąć ścieżkę podchodzenia drugiego statku, lądującego na pobliskim lotnisku.

W tym systemie kolejek statki powietrzne przylatują na lotnisko zgodnie z rozkładem Poissona, w ilości $\lambda > 0$, a czasy obsługi statków powietrznych są od siebie niezależne, z tym samym, umownym, $G(x)$.

Mówiąc dokładniej, jeśli σ_i i σ_j oznaczają czasy obsługi dwóch statków powietrznych, i i j , gdzie $i \neq j$, to σ_i i σ_j są od siebie niezależne:

$$G(x) = P(\sigma_i \leq x) = P(\sigma_j \leq x)$$

dla wszystkich $x \geq 0$.

Niech zbiór

$$p = \frac{\lambda}{\mu}$$

zakłada także, że statki powietrzne obsługiwane są zgodnie z zasadą First-In-First-Out (FIFO). Zdefiniujemy W_n jako czas oczekiwania w kolejce n -tego statku powietrznego w systemie FIFO.

Niech

- \bar{W} oznacza średni czas oczekiwania;
- $X(t)$ oznacza liczbę statków powietrznych w procesie oczekiwania na lądowanie w czasie t ;
- $R(t)$ oznacza resztę czasu obsługi statków powietrznych przez serwer w czasie t , jeśli taka się pojawia;
- t_n oznacza czas przylotu n -tego statku powietrznego dla wszystkich $n \geq 1$;
- σ_n oznacza czas obsługi statku powietrznego n .

Niech $\frac{1}{\mu}$ oznacza średni czas obsługi, mianowicie:

$$E[\sigma_n] = \frac{1}{\mu}.$$

Zgodnie z przyjętą konwencją założmy, że $X(t_i)$ to liczba statków powietrznych oczekujących w kolejce tuż przed przybyciem statku powietrznego i .

Otrzymujemy:

$$\begin{aligned} E[W_i] &= E[R(t_i)] + E\left[\sum_{j=i-X(t_i)}^{i-1} \sigma_j\right] = \\ &= E[R(t_i)] + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=i-k}^{i-1} E[\sigma_j | X(t_i) = k] P(X(t_i) = k) = \text{by wyznaczyć } E[W_i], \text{ wykorzystujemy fakt, iż } \sigma_j \text{ jest} \\ &= E[R(t_i)] + \frac{1}{\mu} E[X(t_i)]. \end{aligned}$$

niezależny od $X(t_i)$ dla

$$j = i - X(t_i), \dots, i - 1,$$

co implikuje, że $E[\sigma_j | X(t_i) = k] = \frac{1}{\mu}$.

W rzeczywistości $X(t_i)$ zależy tylko od czasów obsługi σ_j dla

$$j = 1, \dots, i - X(t_i) - 1,$$

a nie od σ_j dla

$$j \geq i - X(t_i),$$

ponieważ obsługa odbywa się zgodnie z zasadą FIFO.

Zakładając teraz, że $i \rightarrow \infty$, otrzymujemy:

$$\bar{W} = \bar{R} + \frac{\bar{X}}{\mu},$$

gdzie

$\bar{R} := \lim_{i \rightarrow \infty} E[R(t_i)]$ to średni czas obsługi w okresach przylotów w stanie ustalonym;

$\bar{X} := \lim_{i \rightarrow \infty} E[X(t_i)]$ to średnia liczba statków powietrznych oczekujących na obsługę w okresach przylotów w stanie ustalonym.

Stosując wzór Little'a do oczekiwania na obsługę, otrzymujemy:

$$\bar{X} = \lambda \bar{W}$$

tak, aby

$$\bar{W}(1 - p) = \bar{R}.$$

Od teraz będziemy zakładać, że $p < 1$,

$$\bar{W} = \frac{\bar{R}}{1 - p}.$$

Warunek, że $p < 1$, jest warunkiem stabilności kolejki M/G/1 [303].

Obliczymy \bar{R} przy założeniu, że kolejka opróżnia się nieskończenie często (można pokazać, że dzieje się to z prawdopodobieństwem 1, jeśli $p < 1$).

Niech C oznacza czas, kiedy kolejka jest pusta, a $Y(C)$ definiuje liczbę obsłużonych statków powietrznych.

Otrzymujemy:

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{1}{C} \sum_{n=1}^{Y(C)} \frac{\sigma_i}{2} = \\ &= \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{Y(C)}{C} \lim_{C \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{Y(C)} \sum_{n=1}^{Y(C)} \frac{\sigma_i}{2} \right) = \\ &= \lambda \frac{E[\sigma^2]}{2}.\end{aligned}$$

gdzie $E[\sigma^2]$ to moment drugiego rzędu czasów obsługi dla wszystkich $i \geq 1$.

Stąd dla $p < 1$, oczekującego w kolejce (ilustracja 3.11):

$$\bar{W} = \frac{\lambda E[\sigma^2]}{2(1-p)}.$$

Z kolei średni czas reakcji systemu (ilustracja 3.12), \bar{T} , obliczamy ze wzoru:

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu} + \frac{\lambda E[\sigma^2]}{2(1-p)},$$

a po zastosowaniu wzoru Little'a otrzymujemy średnią liczbę statków powietrznych $E[N]$ w całym systemie (oczekujących + obsłużiwanych, ilustracja 3.13):

$$\bar{N} = p + \frac{\lambda^2 E[\sigma^2]}{2(1-p)}.$$

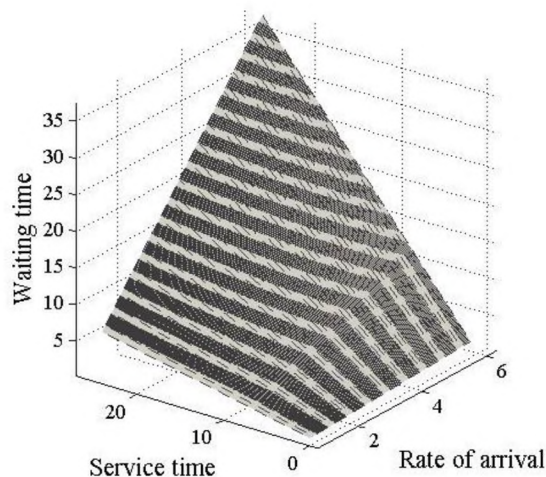
Należy podkreślić, że wartości $\bar{W}, \bar{T}, \bar{N}$ zależą od dwóch momentów $\frac{1}{\mu}$ i $E[\sigma^2]$ czasu obsługi, a także, oczywiście, od liczby przylatujących statków powietrznych.

Opóźnienia występują, kiedy wskaźnik zapotrzebowania jest większy od tempa obsługi. Mogą się jednak również pojawić w sytuacjach, kiedy wskaźnik zapotrzebowania jest niższy od tempa obsługi – w przypadku możliwych nagłych zmian wskaźnika przylotów i/lub czasów obsługi (np. krótkoterminowych nieoczekiwanych wzrostów zapotrzebowania lub niespodziewanego spowolnienia obsługi).

Im bardziej wskaźnik zapotrzebowania zbliża się do maksymalnej przepustowości systemu, tym większe jest zagrożenie opóźnień, w przypadku nawet drobnych wahań któregośkolwiek z czynników.

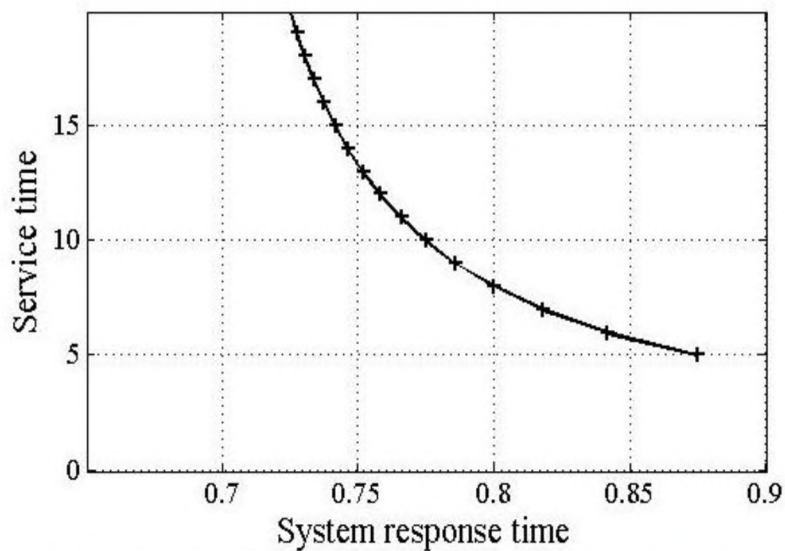
Wielkość przewidywanego opóźnienia w każdym dowolnym momencie zależy od „historii” kolejki w okresie poprzedzającym ten moment.

Dlatego wraz z tym, jak wskaźnik zapotrzebowania zbliża się do wskaźnika tempa obsługi (lub wraz z tym, jak $\rho \rightarrow 1$ lub „zapotrzebowanie zbliża się do przepustowości”), szybciej zwiększa się długość kolejki i średnia długość opóźnień.



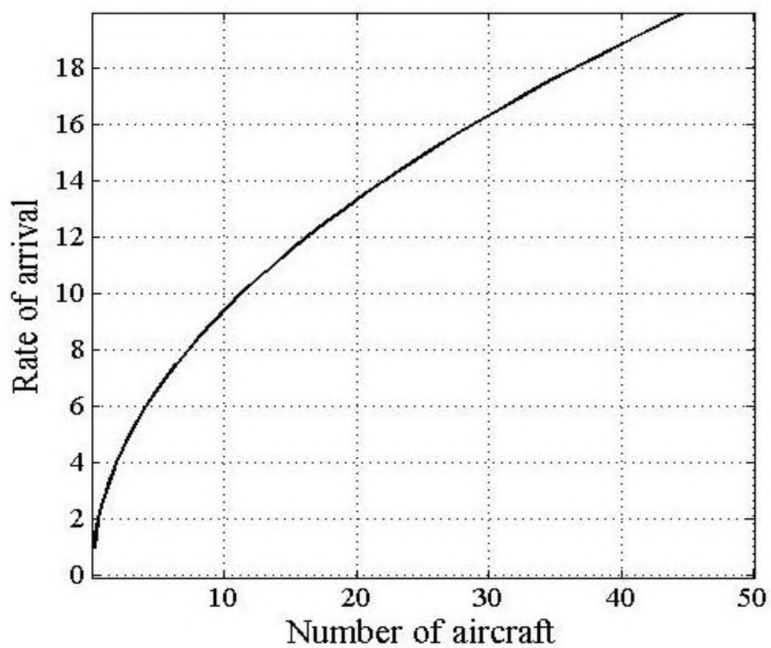
Waiting time	Czas oczekiwania
Service time	Czas obsługi
Rate of arrival	Wskaźnik przylotów

Ilustracja 3.11. Czas oczekiwania w minutach, dla sytuacji lądowania w kolejce [305]



Service time	Czas obsługi
System response time	Czas reakcji systemu

Ilustracja 3.12. Czas reakcji systemu przy stałym wskaźniku przylotów [305]



Rate of arrival	Wskaźnik przylotów
Number of aircraft	Liczba statków powietrznych

Ilustracja 3.13. Liczba statków powietrznych oczekujących na lądowanie i znajdujących się na drodze startowej przy stałym wskaźniku tempa obsługi [305]

Koncentracja przylotów statków powietrznych do portu lotniczego może spowodować zbytnie zagęszczenie i opóźnienia.

Opóźnienia w przylocie można ograniczyć, modyfikując procedury kontroli ruchu lotniczego lub wprowadzając nowe technologie usprawniające przepływ statków powietrznych w rejonie lotniska.

Zmiana struktury przestrzeni powietrznej może zwiększyć efektywność jej wykorzystania i poprawić dostępność oraz przepustowość dróg startowych.

Procedury RNAV i RNP są obecnie stosowane w licznych portach lotniczych w USA i Europie.

Procedury PBN w rejonie lotniska mogą przynieść korzyści zarówno dla służb ATC, jak i dla operatorów, ograniczając potrzebę łączności i umożliwiając skrócenie czasu oraz odległości lotu, dzięki zastosowaniu bardziej efektywnych profili lotu [305].

3.4. Analiza opóźnień w ruchu naziemnym w portach lotniczych

Wzrost natężenia ruchu i zatłoczenie przestrzeni powietrznej staje się coraz poważniejszym problemem w wielu portach lotniczych. Dlatego jednym z elementów zarządzania przepływem ruchu lotniczego (Air Traffic Flow Management, ATFM) jest planowanie, którego celem jest przewidywanie i zmniejszanie obciążeń kontroli ruchu lotniczego (Air Traffic Control, ATC) i zapobieganie opóźnieniom.

Opóźnienia występują, kiedy natężenie ruchu jest zbyt duże w stosunku do możliwości obsługi lotów przylatujących i wylatujących przez port lotniczy (przepustowości) [306].

Są one wynikiem nadmiernego obciążenia lub niskiej efektywności określonych elementów systemu.

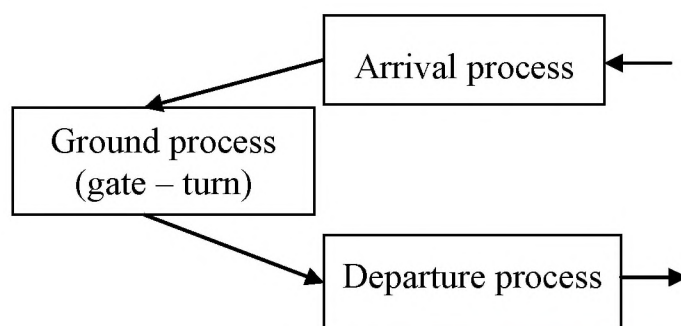
W przypadku portów lotniczych głównym wąskim gardłem są zazwyczaj drogi startowe, których ograniczenia wynikają najczęściej z następujących czynników:

- wymagań dotyczących separacji pomiędzy kolejnymi odlotami;
- ograniczeń przepustowości wynikającej z konfiguracji dróg startowych;
- reguł udostępniania drogi startowej dla lądujących statków powietrznych;
- ograniczeń wynikających ze skrzyżowań dróg startowych.

Jak pokazują badania i obserwacje, właśnie nierównomierne i stosunkowo wysokie zapotrzebowanie na wykorzystanie drogi startowej jest jednym z najczęstszych powodów opóźnień w ruchu naziemnym występujących w portach lotniczych [310, 312].

Modelowanie portu lotniczego jako systemu operacji naziemnych może pokazać najlepsze metody działania, pozwalające zredukować opóźnienia, oszacować ich koszty, a także pomóc w określeniu rozwiązań (jak np. zwiększenie liczby dróg startowych lub zakup dodatkowego sprzętu), które umożliwią poprawę przepustowości w niekorzystnych warunkach pogodowych.

Autorzy pracy [311] wskazują, że wydłużone kolejki przed drogą startową są jednym z głównych czynników utrudniających ruch naziemny przylatujących i wylatujących statków powietrznych na drogach kołowania. Innym ważnym czynnikiem jest słaba widoczność na płycie lotniska (ilustracja 3.14).



Arrival process	Proces przylotu / lądowania
Ground process (gate-turn)	Procesy naziemne (obsługa – obracanie)
Departure process	Proces odlotu / startu

Ilustracja 3.14. Schemat operacji naziemnych [314]

W publikacji [307] przedstawione zostały trzy modele zaprojektowane w celu odtworzenia dynamiki operacji naziemnych w ruchliwych węzłowych portach lotniczych. Na końcu autorzy prezentują możliwe zastosowania modeli w zarządzaniu opóźnieniami kolejek i zagęszczeniu ruchu w portach lotniczych.

W pracy [308] omówiona została oparta na danych technika przewidywania czasu kołowania przed startem, dostosowana do dynamiki działań na płycie lotniska. W metodzie tej wykorzystano zasady dynamicznego programowania stochastycznego.

Z kolei publikacja [309] zawiera szczegółową analizę sytuacji statków powietrznych odlatujących z dwóch portów lotniczych i wskazuje, że liczba przylatujących statków powietrznych w

rzeczywistości wpływa na czas kołowania przed startem. Jak można by przewidywać, wpływ ten zwiększa się wraz ze wzrostem zależności pomiędzy odlotami i przylotami.

Zgodnie z teorią kolejek wzrost liczby startów i lądowań powoduje zwiększenie liczby opóźnień i ich wydłużenie. Efekt ten jest jeszcze silniejszy, kiedy natężenie ruchu naziemnego zaczyna przekraczać możliwości i przepustowość portu lotniczego.

Zjawiska takie obserwujemy często w niekorzystnych warunkach pogodowych – wówczas zazwyczaj liczba i długość opóźnień wzrastają znacząco [313].

W takich przypadkach konieczność oczekiwania w kolejkach może się pojawić na różnych etapach operacji naziemnych.

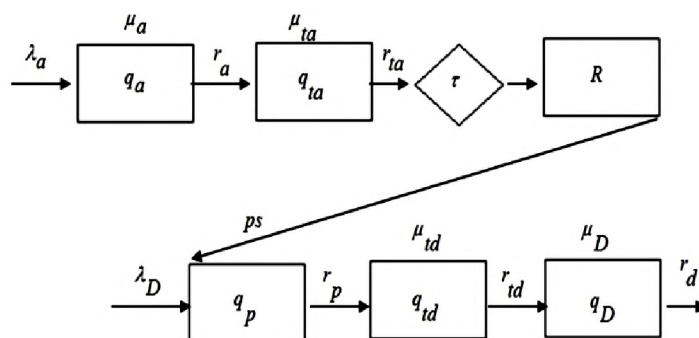
Najczęściej wymieniane przyczyny opóźnień w ruchu naziemnym to [311]:

- skrzyżowania dróg kołowania z wykorzystywanymi drogami startowymi;
- wypychanie statków powietrznych z płyt postojowych na drogi kołowania;
- fragmenty dróg kołowania zbyt wąskie dla ruchu dwukierunkowego;
- skrzyżowania dróg kołowania.

Celem niniejszego rozdziału jest analiza opóźnień w ruchu naziemnym, występujących w operacjach startu i lądowania statków powietrznych.

Ocena wpływu kolejek statków powietrznych przy starcie i lądowaniu na opóźnienia

Ilustracja 3.15 przedstawia kolejkę do lądowania (w przylocie) q_a , według procesu przylotu Poissona z parametrem $\lambda_a(t)$.



Ilustracja 3.15. Sieć kolejek w porcie lotniczym [314]

Przylatujący statek powietrzny dołącza do kołowania po lądowaniu q_{ta} .

Po operacji obrócenia (rozładunku i ponownego załadunku) τ statki powietrzne znajdujące się wcześniej w kolejce kołowania po lądowaniu r_{ta} przechodzą do zbioru R , gotowych do odlotu.

Dołączają one do kolejki kołowania przed startem q_p , zgodnie z procesem Poissona o wskaźniku λ_D . Wskaźnik tempa obsługi odlatujących statków powietrznych to $\mu_{td}(t)$.

Kiedy statek powietrzny dostaje zgodę na start, zbiór R zostaje pomniejszony o 1 element.

Odjeżdżający statek powietrzny dołącza do kolejki na drodze startowej q_{td} .

Następnie, zgodnie z kolejnością oczekiwania, statek powietrzny wjeżdża na drogę startową q_D , gdzie odbywa się obsługa o wskaźniku μ_D .

Opuszczając drogę startową q_D , statek powietrzny opuszcza również system kolejek w porcie lotniczym.

Pierwszy moment rozkładu liczby klientów w kolejce to:

$$\dot{q}_a = f_1(\lambda_a, \mu_a, k, q_a),$$

gdzie

$$f_1(\lambda_a, \mu_a, k, q_a) \equiv k(\lambda - \mu) + k\mu \frac{k(k+1)}{k(k+1) + 2kq_a}.$$

Operacje w procesie przylotu

Zachowanie statku powietrznego w procesie przylotu zależy od wyniku równania na wskaźnik końcowy procesu r_a :

$$r_a = \lambda_a - \dot{q}_a.$$

Pokazuje ono, że wskaźnik tempa przylotu statku powietrznego równy jest sumie wskaźników tempa, w jakim statek powietrzny opuszcza proces przylotu i tempa zmian kolejki w przylocie. Oznacza to, że przylatujący statek powietrzny może opuścić proces przylotu lub też dołączyć do kolejki w przylocie.

Wskaźnik końcowy r_a jest jednocześnie wskaźnikiem początkowym kolejki kołowania po wylądowaniu \dot{q}_{ta} :

$$\dot{q}_{ta} = r_a - \mu_{ta} [1 - P_0(q_{ta}, v_{ta})]$$

i

$$v_{ta} = r_a + \mu_{ta} (2q_{ta} + 1) P_0(q_{ta}, v_{ta}),$$

gdzie

$$P_0(q, v) \equiv \left(\frac{q}{v}\right)^{v-q}.$$

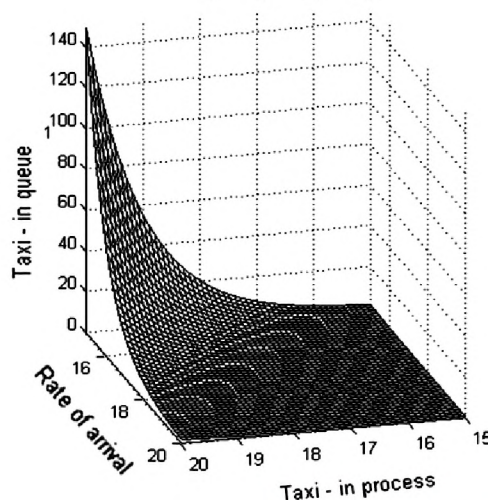
By określić zachowanie statku powietrznego, obliczamy:

$$r_a = r_a - \dot{q}_{ta}.$$

Równanie wskazuje, że wskaźnik końcowy r_a procesu przylotu równy jest sumie wskaźników tempa, w jakim statek powietrzny opuszcza kolejkę kołowania po wylądowaniu oraz tempa zmian kolejki kołowania po wylądowaniu (ilustracja 3.16).

Bieżące opóźnienie w porcie lotniczym, pokazujące, czy statki powietrzne kończą cały proces przylotu i kołowania po przylocie, czy też gromadzą się w kolejce do lądowania lub kołowania po wylądowaniu, obliczamy ze wzoru:

$$\lambda_a = r_a + \dot{q}_a + \dot{q}_{ta}.$$



Taxi-in queue	Kolejka do kołowania po przylocie / wylądowaniu
Rate of arrival	Wskaźnik tempa przylotu
Taxi-in proces	Proces kołowania po przylocie / wylądowaniu

Ilustracja 3.16. Wartość wskaźnika końcowego procesu przylotu [314]

Wskaźnik końcowy procesu kołowania po przylocie r_{ta} , po operacji obrócenia statku powietrznego τ , staje się wskaźnikiem początkowym zbioru R , statków powietrznych gotowych do lotu. Zachowanie statku powietrznego w tym zbiorze wyraża wzór:

$$\dot{R} = r_{ta}(t - \tau) - ps,$$

gdzie ps to wskaźnik tempa obsługi samolotów.

Operacje w procesie odlotu

Odlatujący samolot najpierw oczekuje w kolejce do obsługi statków powietrznych „gotowych do lotu”. Kolejkę tę opisują następujące równania:

$$\dot{q}_p = f_{fluid}(\lambda_D, ps, q_p),$$

$$f_{fluid}(\lambda, \mu, q) \equiv \begin{cases} \lambda - \mu, q > 0 \\ (\lambda - \mu)^+, q = 0, \end{cases}$$

gdzie x^+ równa się x , kiedy $x > 0$, i równa się zero dla ujemnych x .

Z tego wynika, że q_p będzie równe zero, jeśli

$$ps = \lambda_D.$$

Proces odlotu rozpoczyna się od obsługi kolejki statków powietrznych „gotowych do lotu”.

Obsługa ta zależy od wartości zbioru R .

Jeśli $R = 0$, to ps nie może być większe niż wskaźnik początkowy zbioru.

Jeśli R nie jest pusty, to wskaźnik tempa obsługi $\mu_p(t)$ jest większy od 1.

Jeśli R jest pusty, to zasilają go statki powietrzne opuszczające kolejkę w przylocie, z opóźnieniem równym czasowi obrócenia τ :

$$ps = \begin{cases} \lambda_D, R > 0 \\ \left. \begin{cases} r_{ta}(t - \tau), q_p > 0 \\ \min(\lambda_D, r_{ta}(t - \tau)), q_p = 0 \end{cases} \right\}, R = 0 \end{cases}.$$

By określić zachowanie statku powietrznego, wyznaczamy wartość wskaźnika końcowego r_p , kolejki samolotów „gotowych do lotu” za pomocą równania:

$$r_p = \lambda_D - \dot{q}_p.$$

Wskaźnik końcowy r_p stanowi wskaźnik początkowy kolejki statków powietrznych oczekujących na kołowanie przed startem, q_{td} :

$$\dot{q}_{td} = r_p - \mu_{td} \left[1 - P_0(q_{td}, \nu_{td}) \right]$$

i

$$\dot{\nu}_{td} = r_p + \mu_{td}(2q_{td} + 1)P_0(q_{td}, \nu_{td}).$$

Następnie wyznaczamy wartość wskaźnika końcowego r_{td} , kolejki oczekujących na kołowanie ze wzoru:

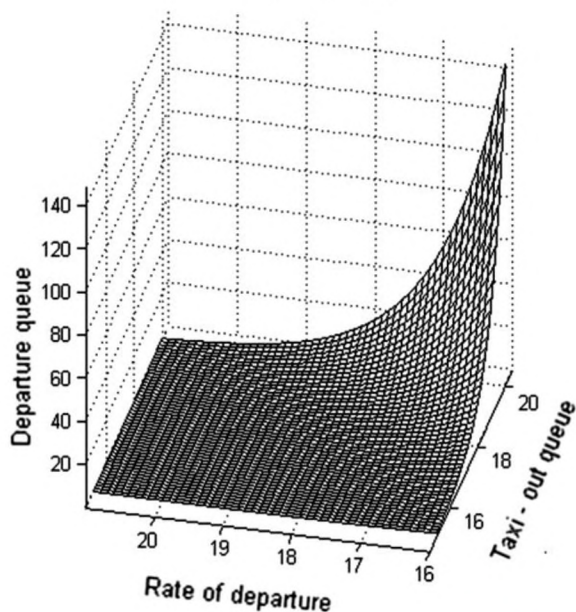
$$r_{td} = r_p - \dot{q}_{td}.$$

Wskaźnik końcowy r_{td} , kolejki oczekujących na kołowanie jest zarazem wskaźnikiem początkowym kolejki do startu, q_D :

$$\dot{q}_D = f_1(r_{td}, \mu_D, q_D).$$

Na koniec wyznaczamy wskaźnik końcowy całego procesu odlotu (ilustracja 3.17):

$$r_d = r_{id} - q_D$$



Departure queue	Kolejka do startu
Rate of departure	Wskaźnik odlotów
Taxi-out queue	Kolejka do kołowania

Ilustracja 3.17. Wskaźnik końcowy procesu odlotu [314]

Analiza operacji naziemnych (ilustracje 3.16, 3.17) umożliwia określenie przewidywanego natężenia ruchu w operacjach w procesach odlotu i przylotu.

Przed odlotem i po przylocie statki powietrzne przechodzą przez etap kołowania, który może wpływać na natężenie ruchu na płycie lotniska, a tym samym na występowanie i długość opóźnień.

Opóźnienia mogą się pojawiać w systemie w wyniku nadmiernego obciążenia lub nieprawidłowości w dowolnym elemencie procesu obsługi.

Jeśli lotnisko wykorzystuje tę samą drogę startową do startów i lądowań statków powietrznych, wieża kontrolna zezwala na starty tylko w okresach przerw między lądowaniami.

Może to prowadzić do opóźnień startujących statków powietrznych, które muszą oczekiwać na zgodę na start na drogach kołowania lub stanowiskach postojowych. Opóźnienia te mogą się znacznie wydłużać.

Zmiany natężenia ruchu w kolejnych godzinach zależą od rozkładów odlotów z portów lotniczych danej sieci oraz od rozkładów przylotów do portów lotniczych sieci z lotnisk zewnętrznych.

Duże opóźnienia mogą się pojawiać wraz ze zwiększeniem zapotrzebowania na operacje naziemne w procesach odlotu i przylotu. Największy wpływ na działanie służb lotniskowych mają niekorzystne warunki meteorologiczne, w których tempo obsługi może się znacząco obniżyć.

Efektorem takich sytuacji jest konieczność oczekiwania na obsługę na kolejnych etapach procesu i wydłużenie czasów kołowania. W rezultacie nawet niewielkie zwiększenie natężenia ruchu może doprowadzić do znaczącego wydłużenia opóźnień [314].

4. Rozwój i wykorzystanie zdalnie sterowanych systemów latających

Analiza literatury przedmiotowej wskazuje, że XXI w. będzie erą lotów bezzałogowych. Według przewidywań niemal 90% wojskowych statków powietrznych stanowić będą systemy bezzałogowe, a jedynie 10% – samoloty pilotowane przez ludzi. Podobna sytuacja prognozowana jest również w lotnictwie cywilnym. Wskazuje to na ogromne znaczenie podstawowych problemów teoretycznych związanych z wykorzystaniem bezzałogowych systemów latających nowej generacji (Unmanned Aircraft Systems, UAS) w lotnictwie cywilnym. Jak dotychczas, najważniejszym problemem ograniczającym powszechne wykorzystanie systemów bezzałogowych były niewystarczające badania w zakresie bezpieczeństwa, uważanego za kluczowe kryterium we współczesnym lotnictwie. Dlatego przed wprowadzeniem nowej generacji bezzałogowych systemów latających do powszechnego użytku konieczne jest rozwiązanie wielu problemów technicznych i organizacyjnych. Najważniejsze z nich związane są z wykorzystaniem przestrzeni powietrznej, alokacją częstotliwości radiowych dla łączności powietrze–ziemia i ziemia–powietrze, a także z budową i rozwojem rynku usług lotniczych, które mogłyby być realizowane przez tego typu systemy [289]. W niniejszym rozdziale omówimy teoretyczne podejścia do problematyki bezpieczeństwa UAS i ich zastosowanie w rozwiązywaniu różnego rodzaju problemów, bezzałogowe technologie lotnicze opracowywane w National Aviation University oraz oryginalne modele matematyczne rozmaitych aspektów działania UAS. Rozdział obejmuje następujące zagadnienia:

- *Podstawy bezpieczeństwa bezzałogowych systemów latających nowej generacji;*
- *Stan obecny i perspektywy rozwoju bezzałogowych technologii lotniczych w National Aviation University;*
- *Wykorzystanie technologii i możliwości zdalnie sterowanych systemów latających w realizacji różnego typu zadań;*
- *Modele i technologie bezzałogowych systemów latających.*

4.1. Podstawy bezpieczeństwa bezzałogowych systemów latających nowej generacji

Jednym z najważniejszych powodów zainteresowania bezzałogowymi systemami latającymi (UAS) nowej generacji jest ich wydajność i niska cena. Metody i technologie produkcji takich systemów są coraz powszechniej dostępne na rynku i coraz chętniej wykorzystywane przez konstruktorów oraz wytwórców statków powietrznych. Jednak brak skutecznych systemów zapobiegania kolizji systemów bezzałogowych z innymi statkami powietrznymi oraz wysokie prawdopodobieństwo niekontrolowanego upadku ograniczają zastosowanie UAS w tych samych obszarach, w których operują inne statki powietrzne lub w gęsto zaludnionych regionach. Oznacza to utratę licznych korzyści związanych z wykorzystaniem systemów bezzałogowych i tym bardziej pokazuje, jak istotne jest rozwiązanie problemów związanych z ich bezpieczeństwem.

Obecnie bezzałogowe systemy latające stają się coraz ważniejszym elementem ogólnego systemu transportu lotniczego, dlatego Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), a także liczne organizacje regionalne i krajowe, takie jak Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA), EUROCONTROL, Europejska Agencja Obrony (EDA), Europejska Agencja Kosmiczna (ESA), Europejska Organizacja Wyposażenia Lotnictwa Cywilnego (EUROCAE), Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego (NATO), amerykańskie Federalna Administracja Lotnicza (FAA), Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) oraz Radiotechniczna Komisja Aeronautyki (RTCA), a także rządy wielu państw oraz branża lotnicza prowadzą działania w celu zbadania i oceny możliwości pełnej integracji systemów bezzałogowych. Systemy te wykorzystują najnowocześniejsze technologie, które umożliwiają ich szerokie komercyjne zastosowanie, a także mają wpływ na ogólną poprawę bezpieczeństwa i efektywności lotnictwa cywilnego [315]. Jednakże brak załogi na pokładzie samolotu przynosi nowe, nieznane dotąd wyzwania, których charakter i konsekwencje musimy starannie przeanalizować.

Obecnie problemy pojawiają się, kiedy decyzje techniczne i systemowe w obszarze bezzałogowych systemów latających nowej generacji nie spełniają określonych wymagań.

W Stanach Zjednoczonych regulowaniem bezpiecznego wykorzystania bezzałogowych systemów latających zajmują się takie organy i organizacje, jak Federalna Administracja Lotnicza (FAA), Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA), Departament Obrony czy Radiotechniczna Komisja Aeronautyki (RTCA). Federalna Administracja Lotnicza współpracuje w tym zakresie z organizacjami europejskimi – Agencją Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA) i EUROCONTROL. FAA reguluje loty, wykorzystując w tym celu przepisy amerykańskiego prawa publicznego zawarte w Code of Federal Regulations Title 14 – Aeronautics and Space (Kodeks federalny, tytuł 14 – Aeronautyka i przestrzeń kosmiczna). Najważniejszym dokumentem opisującym politykę FAA w zakresie regulacji wykorzystania systemów bezzałogowych jest Policy and Basic Principles of Unmanned Aircraft Systems Operation 05-01 (Polityka i podstawowe zasady eksploatacji bezzałogowych systemów latających, AFS-400 UAS Policy 05-01) [316].

Celem tego dokumentu jest wyjaśnienie polityki i zasad wykorzystania bezzałogowych systemów latających. Zawiera ona wytyczne i wskazówki dotyczące użytkowania systemów bezzałogowych w amerykańskiej przestrzeni powietrznej. Ponieważ Departament Bezpieczeństwa Wewnętrznego uznał, że wykorzystanie bezzałogowych systemów latających jest elementem „bezpieczeństwa narodowego”, jedynie FAA może zatwierdzać certyfikaty zdatności do lotu dla systemów spełniających normy zawarte w tej polityce. W takim przypadku wymagania dotyczące poziomu potencjalnego zagrożenia są zgodne z amerykańskimi normami bezpieczeństwa narodowego, zaś wniosek o przyznanie certyfikatu zdatności do lotu powinien zawierać wszystkie potrzebne informacje na temat potencjalnego ryzyka związanego z użyciem systemów bezzałogowych.

FAA ogłosiła trzypoziomowy, 15-letni plan przygotowania regulacji w zakresie bezpiecznego wykorzystania bezzałogowych systemów latających. Każdy z poziomów tego planu łączy się z wdrożeniem jednej ze Specjalnych Federalnych Regulacji Lotniczych (Special Federal Aviation Regulations, SFAR). Pierwszą z nich była FAA SFAR – 01 Special Federal Aviation Regulation Target – UAV Flight Under Visual Flight Rules (regulująca loty systemów bezzałogowych zgodnie z zasadami lotów z widocznością). Drugi etap to wdrożenie Special Federal Aviation Regulation – UAV Flight With DSA Collision Avoidance Technology (dotyczącej zastosowania w systemach bezzałogowych rozwiązań zapobiegających kolizji). Etapem ostatnim będzie wdrożenie FAA SFAR – 03 Special Federal Aviation Regulation – Overall UAV US NAS Guidance Regulations – Unrestricted File and Fly Use of UAVs (zezwalającej na nieograniczone wykorzystanie dopuszczonych do lotu i zarejestrowanych systemów bezzałogowych). Pełne wdrożenie planowane jest na 2020 r.

W 2014 r. zanotowano znaczący wzrost wykorzystania systemów bezzałogowych. Już rok wcześniej FAA wyznaczyła i uruchomiła 6 nowych obszarów testowania UAS. Obecnie agencja koordynuje tworzenie centrów doskonalenia operatorów małych komercyjnych systemów bezzałogowych i opracowuje projekty regulacji w tym zakresie. Wszystkie te działania umożliwią FAA wdrożenie odpowiednich uregulowań oraz procedur zapewniających bezpieczne włączenie publicznych, komercyjnych i cywilnych UAS do ruchu w amerykańskiej krajowej przestrzeni powietrznej (National Airspace System, NAS).

Już dziś systemy bezzałogowe operują w NAS, w kontrolowanych warunkach, w zakresie pomiędzy powierzchnią ziemi i pułapem 50 000 stóp, w zależności od typu systemu. W przestrzeni powietrznej klasy B, znajdującej się ponad terenami miejskimi, o największym natężeniu ruchu załogowych statków powietrznych, UAS mogą się poruszać jedynie w pojedynczych przypadkach. FAA przewiduje, że po opracowaniu struktury regulacyjnej i standardów branżowych rynek komercyjnych systemów bezzałogowych będzie się rozwijał bardzo szybko. Dotyczy to szczególnie stosunkowo niedrogich UAS, o masie poniżej 55 funtów (25 kg), których wykorzystanie już teraz jest ekonomicznie opłacalne. Ekspertki przewidują zwiększenie popytu na te systemy i na ich zastosowanie w ramach określanych przez wdrożone regulacje. Ponieważ jednak zakres tworzonych regulacji wciąż nie jest znany, dokładne prognozowanie tego wzrostu jest dziś niezwykle trudne [8].

W dokumencie AFS-400 UAS Policy 05-01 FAA wyznacza również zadanie dla specjalistów z Radiotechnicznej Komisji Aeronautyki (RTCA), polegające na opracowaniu rekomendacji dla norm

dotyczących eksploatacji bezzałogowych systemów latających. Rekomendacje te wykorzystywane są przez FAA w procesie tworzenia zasad, programów i regulacji. Specjalny komitet 203 (SC203 RTCA) opracowuje minimalne standardy operacji lotniczych (Minimum Aviation Performance Standards, MASPS).

Bardzo ważną rolę w opracowywaniu standardów wykorzystania systemów bezzałogowych odgrywa również Międzynarodowy Komitet F-38 ASTM. Służy on jako otwarte forum do dyskusji na temat przyszłych norm i standardów.

Oprócz wymienionych wyżej organów i instytucji opracowaniem standardów wykorzystania bezzałogowych systemów latających w Stanach Zjednoczonych zajmują się również takie organizacje, jak Society of Automotive Engineers (SAE) S-4 Unmanned Systems; American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Technical Committee on Aerial Robots (IEEE). Także Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego (NATO), żywo zainteresowana budową i eksploatacją wojskowych bezzałogowych systemów latających, opracowała własny system norm, o nazwie STANAG.

Jednym z najważniejszych kierunków europejskich regulacji w zakresie bezpieczeństwa wykorzystania bezzałogowych systemów latających jest próba znalezienia miejsca dla tych systemów w ramach istniejącej struktury zasad regulujących normalny ruch lotniczy w europejskiej przestrzeni powietrznej. Oznacza to, że efektywne wykorzystanie systemów bezzałogowych wymaga odpowiedniego dopasowania ich operacji do tej struktury. Biorąc pod uwagę obecność licznych i silnych organizacji oraz wykwalifikowanych ekspertów, Europa ma ogromny potencjał, by stać się liderem w tej sferze. Wymagałoby to jednak wspólnego przygotowania, zatwierdzenia i wdrożenia wielu zróżnicowanych aktów prawnych i narzędzi regulacyjnych. Celem końcowym takich działań jest wprowadzenie niezawodnych i opłacalnych bezzałogowych systemów latających, wyposażonych w rozwiązania zapobiegające kolizji (Sense and Avoid, S&A). Głównym problemem jest spełnienie przez UAS regionalnych i ogólnosiwiatowych wymagań związanych z bezpieczeństwem operacji lotniczych. Dlatego wszystkie systemy bezzałogowe poruszające się w kontrolowanej przestrzeni powietrznej powinny mieć stosowne zezwolenia, wydane przez odpowiednie władze lotnicze.

Systemy o masie startowej powyżej 330 funtów (150 kg) powinny uzyskać certyfikaty zdolności do lotu od EASA (podstawowy dokument dotyczący wykorzystania UAS o masie startowej powyżej 330 funtów / 150 kg to EASA A-NPA) [317]. Z kolei w Wielkiej Brytanii za tworzenie norm lotniczych i regulację bezpieczeństwa operacji systemów bezzałogowych odpowiada organ o nazwie Civil Aviation Authority (UK – CAA) [318]. Opracowana przez niego polityka rozwoju lekkich bezzałogowych systemów latających zawiera szczegółowe wymagania dotyczące konstrukcji i bezpieczeństwa tych systemów. Niedawno opublikowana przez UK-CAA trzecia wersja dokumentu CAP 722 została przyjęta z dużym zainteresowaniem przez wiele krajów europejskich, które uznały go za odpowiednią podstawę koordynacji przyszłych działań.

Oprócz znaczących osiągnięć poszczególnych krajów kwestią bardzo istotną jest wypracowanie ogólnoeuropejskiego porozumienia w sprawie bezzałogowych systemów latających, co wydaje się całkowicie realne, biorąc pod uwagę fakt, że EUROCONTROL (organizacja odpowiedzialna za koordynację włączenia systemów UAS) zrzesza 38 krajów na kontynencie. Europejska Agencja Obrony (EDA) ogłosiła, że UAS powinny stać się zintegrowanymi użytkownikami kontrolowanej europejskiej przestrzeni powietrznej do 2015 r. Jednak większość ekspertów wymienia raczej daty bliższe końca dekady. W imieniu EUROCONTROL prace nad rozwojem infrastruktury regulacyjnej koordynuje Europejska Organizacja Wyposażenia Lotnictwa Cywilnego (EUROCAE). Jej grupa robocza WG-37 współpracuje z licznymi interesariuszami z obszarów przemysłu, wojskowości, nauki i administracji [319].

Równolegle do działań legislacyjnych skoncentrowanych na wprowadzeniu funkcjonalnych norm dotyczących certyfikacji zdolności do lotu oraz zasad prowadzenia operacji lotniczych toczą się prace konstrukcyjne i projektowe, których celem jest stworzenie łatwych w obsłudze, czułych i skutecznych systemów unikania kolizji. Wprowadzenie tej technologii będzie niezwykle istotne dla osiągnięcia zadowalającego poziomu bezpieczeństwa lotów. Rozwiązania tego typu zagwarantują możliwość zautomatyzowanych niezakłóconych lotów systemów bezzałogowych w ogólnej przestrzeni powietrznej. Oznacza to, że służby żeglugi powietrznej nie będą musiały stale śledzić

ruchów UAS, by zapewnić utrzymanie minimów separacyjnych między nimi i innymi użytkownikami przestrzeni. Wiele niezbędnych elementów tego systemu funkcjonuje już dziś. Prace nad stworzeniem rozwiązań zapobiegających kolizjom w przestrzeni w ramach projektu MIDCAS wspiera Europejska Agencja Obrony.

Innym istotnym czynnikiem w produkcji i wykorzystaniu UAS jest kwestia ubezpieczeń. Jest to również jeden z kluczowych elementów w rozwoju rynku usług świadczonych z użyciem takich systemów. Wiele krajów UE wprowadza obecnie istotne zmiany w swoich przepisach w tym obszarze, jednak nie zawsze obejmują one obowiązkowe ubezpieczenie systemów bezzałogowych.

W Australii bezpieczeństwo operacji bezzałogowych systemów latających regulują zapisy Australia Civil Aviation Safety Regulation Part 101.

Analiza obecnej fazy rozwoju bezzałogowych systemów latających i regulacji dotyczących bezpieczeństwa ich wykorzystania prowadzi do wniosku, że na dziś poziom bezpieczeństwa operacji bezzałogowych systemów latających nie dorównuje poziomowi tradycyjnych komercyjnych usług lotniczych (który wynosi mniej niż 1 incydent na milion lotów). Nie istnieje również jeszcze stabilny system dokumentów regulujących organizację i eksploatację systemów bezzałogowych w przestrzeni powietrznej. Pomimo pełnej autonomii tych systemów ich wykorzystanie w kontrolowanej przestrzeni powietrznej bez stałej komunikacji i nadzoru ze strony służb kontroli ruchu lotniczego jest nadal niedozwolone. Potwierdza to konieczność dalszej integracji i harmonizacji przepisów lotniczych oraz stworzenia i wdrożenia norm dotyczących bezpieczeństwa eksploatacji UAS, zarówno w regionie europejskim, jak i na całym świecie. W sytuacji globalizacji gospodarki, obejmującej również rynek bezzałogowych systemów latających, zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa jest podstawowym warunkiem wykorzystania takich systemów w krajach na całym świecie [4].

Kategorie UAS	Oznaczenie	Zasięg (km)	Pułap (m)	Czas pracy (h)	Masa (kg)
Taktyczne					
Nano					
Mikro					
Mini					
Bliskiego zasięgu					
Krótkiego zasięgu					
Średniego zasięgu					
Średniego zasięgu o krótkim czasie pracy					
Niskiego pułapu o krótkim czasie pracy					
Niskiego pułapu o długim czasie pracy					
Średniego pułapu o długim czasie pracy					
Strategiczne					
Wysokiego pułapu o długim czasie pracy					
Specjalne					
Bezzałogowe wojskowe systemy latające					
Bojowe					
Wabikowe					
Stratosferyczne					
Egzostratosferyczne					

Tabela 4.1. Międzynarodowa klasyfikacja UAS

UAV Categories	Mark	Range (km)	Altitude (m)	Endurance (h)	Weight (kg)
Tactical					
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025
Micro	μ	< 10	250	1	< 5
Mini	Mini	< 10	150 - 300	< 2	< 20
Close Range	CR	10 – 30	3.000	2 – 4	25-150
Short Range	SR	30 – 70	3.000	3 – 6	50-250
Medium Range	MR	70 – 200	3. – 5.000	6 – 10	150-500
Medium Range Short Endurance	MRE	> 500	5. – 8.000	10 – 18	500-1500
Low Altitude Short Endurance	LASE	> 250	3.000	0.5 – 1	250-2500
Low Altitude Long Endurance	LALE	> 500	3. – 5.000	> 24	15-25
Medium Altitude Long Endurance	MALE	> 500	5. – 8.000	24 – 48	1000-1500
Strategic					
High Altitude Long Endurance	HALE	> 2000	20. 000	24 - 48	2500-5000
Special					
Unmanned Combat Aerial Vehicle	UCAV	≈1500	12. 000	≈ 2	>1000
Lethal	LET	300	4. 000	3 - 4	TBD
Decoys	DEC	0 - 500	50–5.000	< 4	150-500
Stratospheric	STRATO	> 2000	20. – 30.000	> 48	>2500
Exo-Stratospheric	EXO	—	> 30.500	—	—

National Aviation University (NAU) to jedna z pierwszych instytucji na Ukrainie, która zwróciła uwagę na możliwości wykorzystania bezzałogowych systemów latających dla celów cywilnych i wojskowych. NAU dysponuje odpowiednią wiedzą, zapleczem technicznym oraz zasobami niezbędnymi do projektowania i tworzenia automatycznych systemów lotniczych dla całej branży. Tabela 4.1 przedstawia międzynarodową klasyfikację bezzałogowych systemów latających. Na żółto zaznaczyliśmy w niej te klasy UAS, które wytwarzane są w NAU, zaś na różowo – te, nad którymi pracują obecnie specjaliści z naszego uniwersytetu (patrz więcej – rozdział 4.2).

4.2. Stan obecny i perspektywy rozwoju bezzałogowych technologii lotniczych w National Aviation University

Jedną z cech charakterystycznych współczesnego lotnictwa jest bardzo szybki i intensywny rozwój wyspecjalizowanych systemów robotycznych, połączony przede wszystkim z wprowadzeniem i rozwojem bezzałogowych statków powietrznych.

Optymalne połączenie wszystkich nowoczesnych lotniczych rozwiązań teledetekcyjnych i metod przetwarzania danych pozwoli stworzyć system wsparcia informacyjnego dla całej krajowej gospodarki, obejmujący terytorium całego kraju i umożliwiający bieżące gromadzenie danych krytycznych dla bezpieczeństwa funkcjonowania gospodarki. Jednym z ważnych elementów tego systemu mogą być właśnie drony monitorujące.

Urządzenia te i procesy można wykorzystywać w trudno dostępnych, odległych regionach, gdzie panują trudne warunki klimatyczne. Mogą one zapewniać wsparcie informacyjne, ułatwiające podejmowanie działań kluczowych z punktu widzenia bezpieczeństwa, planowania, kontroli oraz zarządzania dostępnymi zasobami i środkami.

Centrum badawczo-rozwojowe „Virage”, zajmujące się projektowaniem i budową bezzałogowych systemów lotniczych, działające przy National Aviation University w Kijowie, jest przygotowane do odejścia od lotów załogowych na rzecz wydajnych technologii bezzałogowych umożliwiających monitorowanie stanu obiektów gospodarczych w kraju.

Ośrodek projektuje lotnicze systemy bezzałogowe (bezzałogowe statki powietrzne) w różnych klasach i rozmiarach. Ich poziom zaawansowania jest zgodny z aktualnym poziomem rozwoju w obszarach aeronautyki, łączności, systemów kontroli i teledetekcji.

Centrum zbudowało kilka prototypów systemów latających, gotowych do wprowadzenia do produkcji, wyposażonych w różnego typu jednostki napędowe i przystosowanych do transportu ładunków, a także naziemne systemy wsparcia i kontroli.

Główne korzyści wynikające z budowy i wykorzystania systemów bezzałogowych to:

- utrzymanie charakterystyki i osiągnięć załogowego statku powietrznego;
- możliwość obserwacji dużych obszarów na powierzchni ziemi;
- stosunkowo niskie koszty UAS;
- wielofunkcyjność i zróżnicowanie UAS;
- szybka integracja UAS z tymczasowymi sieciami informacyjnymi w obszarach zastosowania [320].

Specjaliści National Aviation University tworzą liczne eksperymentalne UAS różnego typu, wyposażone w nowoczesne rozwiązania nanotechnologiczne, kontrolowane za pomocą zaawansowanych narzędzi informatycznych, z wykorzystaniem urządzeń umożliwiających bezpieczne przesyłanie danych telemetrycznych i prowadzenie nadzoru wideo, a także przetwarzanie informacji w wyznaczonych celach, wykrywanie i rozpoznawanie obiektów oraz inne elementy, w zależności od typu UAS i wykonywanych przez niego zadań.

Przykładowe bezzałogowe systemy latające zaprojektowane i zbudowane w centrum badawczo-rozwojowym „Virage” w National Aviation University to:

dwusilnikowe bezzałogowe statki powietrzne „Sky Patrol”:

M-7 (waga 90 kg),

M-7D (waga 150 kg),

M-7V5 (waga 200 kg);

jednosilnikowe bezzałogowe statki powietrzne:

M-10 „Eye” (waga 3 kg),

M-6 „Lark” (waga 7 kg),

M-22 „Aerotester” (waga 18 kg);

bezzałogowy system latający Polikopter PK-07 (waga 4 kg);

seria zdalnie sterowanych systemów latających „Ukraina”.

(Informacja z oficjalnej strony Centrum Badawczo-Rozwojowego Lotnictwa Bezzałogowego National Aviation University „Virage”: <http://uav.nau.edu.ua/rozrob.html>. Dyrektor naukowy prof. Volodymyr Kharchenko) [321].

Bezzałogowy system latający M-7B5 „Sky Patrol”

Zastosowanie: wykonywanie zdjęć lotniczych, dozоровanie wideo w czasie rzeczywistym, patrolowanie obiektów liniowych oraz wykonywanie innego typu zadań w powietrzu, również w rejonach u dużym natężeniu ruchu.



Charakterystyka techniczna:

Rozpiętość skrzydeł – 6,0 m;
 Waga ładunków specjalnych – do 70 kg;
 Masa startowa – do 200 kg;
 Prędkość maksymalna – 250 km/h;
 Moc silników – 2 × 17 kW;
 Pułap lotu – do 3000 m;
 Metoda startu i lądowania – jak samolot;
 Czas przygotowania do pracy – 0,5 h;
 Maksymalna masa startowa – 200 kg;
 Masa własna – 100 kg;
 Prędkość przelotowa – 200 km/h;
 Pułap lotu – 3000 m.

Warianty w zależności od wagi ładunku:

Waga ładunków specjalnych – 70 kg / 20 kg;
 Masa paliwa – 30 kg / 80 kg;
 Czas lotu – 5 h / 14 h;
 Zasięg – 1000 km / 2800 km.

Ilustracja 4.1. Bezzałogowy system latający M-7B5 „Sky Patrol”

Projekt służy rozwiązaniu kwestii zwiększania masy transportowanych ładunków i poprawy efektywności dwusilnikowych UAS. M-7V5 „Sky Patrol” to dron w kształcie samolotu górnopłatowego o skrzydłach umieszczonych na pylonie. Powierzchnie nośne wykonane są z kompozytów. Skrzydła o średnim stopniu mechanizacji mają formę przesuwanych klap szczelinowych.

By zapewnić dostęp do przestrzeni ładownych, przednia górna i tylna część gondoli wykonane zostały w formie przesuwanych owiewek. Możliwe jest wykorzystanie innego typu gondoli, w przypadku przewozu innego typu ładunków.

Standardowy ładunek: żyroskopowa kamera dzienna CCD. Kontrola prowadzona z wykorzystaniem kamery lotu.

Tabela 4.2. Klasyfikacja bezzałogowego systemu latającego UA M-7B5 „Sky Patrol”

Kod (angielski)	Nazwa (ukraińska)	Masa [kg]	Zasięg operacyjny [km]	Pułap lotu [m]	Długość lotu [h]
MRE	Czas pracy średniego zasięgu	500–150	≥500	8000	10–18

Klasa ukraińska – UAS średnie 100–1000 kg; UAS taktyczne i operacyjne 80–300 km; UAS o długim zasięgu lotu 12–24 h

Tabela 4.3. Zasięg i długość lotu systemu M-7V5

Maksymalna masa startowa – 200 kg
Masa własna – 100 kg
Prędkość przelotowa – 200 km/h.

Maksymalny pułap – 3000 m	
Warianty według ładowności	
Ładowność – 70 kg	Ładowność – 20 kg
Masa paliwa – 30 kg	Masa paliwa – 80 kg
Długość lotu – 5 h	Długość lotu – 14 h
Zasięg – 1000 km	Zasięg – 2800 km

Bezzałogowy system latający M-7D „Sky Patrol”

Zastosowanie: wykonywanie map i zdjęć lotniczych, dozorowanie w czasie rzeczywistym, patrolowanie obszarów i obiektów liniowych.



Charakterystyka techniczna:

Rozpiętość skrzydeł – 5,1 m;
Waga ładunków specjalnych – do 55 kg;
Masa startowa – do 150 kg;
Prędkość maksymalna – 190 km/h;
Moc silników – 2 × 12 kW;
Pułap lotu – do 2500 m;
Metoda startu i lądowania – jak samolot;
Czas przygotowania do pracy – 0,5 h;
Maksymalna masa startowa – 150 kg;
Masa własna – 80 kg;
Prędkość przelotowa – 190 km/h;
Pułap lotu – 2500 m.

Warianty w zależności od wagi ładunku:

Waga ładunków specjalnych – 55 kg / 20 kg;
Masa paliwa – 15 kg / 50 kg;
Czas lotu – 3 h / 10 h;
Zasięg – 450 km / 1500 km.

Ilustracja 4.2. Bezzałogowy system latający M-7D „Sky Patrol”

Tabela 4.4. Klasyfikacja bezzałogowego systemu latającego M-7D „Sky Patrol”

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Długość pracy	Masa
Krótkiego zasięgu	SR	30–70 km	3000 m	3–6 h	50–250 kg
Średniego zasięgu	MR	70–200 km	5000 m	6–10 h	150–500 kg

Tabela 4.5. Zasięg i długość lotu systemu M-7D

Maksymalna masa startowa – 150 kg	
Masa własna – 80 kg	
Prędkość przelotowa – 150 km/h	
Pułap maksymalny – 2500 m	
Warianty według ładowności	
Ładowność – 55 kg	Ładowność – 20 kg
Masa paliwa – 15 kg	Masa paliwa – 50 kg
Długość lotu – 3 h	Długość lotu – 10 h

Zasięg – 450 km

Zasięg – 1500 km

Tabela 4.6. Porównanie M-7D „Sky Patrol” z innymi systemami tej samej klasy (cz. 1)













Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa Ładowność
Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
M-7 "Sky Patrol" NAU		< 20 km	150 km/h 190 km/h 250 km/h	3000 m 6000 m 4000 m	< 10 h	90 / 30 kg 150 / 50 kg 200 / 70 kg
Aerostar , Aeronautics Defense Systems Israel		< 200 km	80 km/h	5500 m	< 14 h	200 kg 50 kg
Arcturus T-20 Arcturus UAV, USA		< 80 km	160 km/h	5400 m	< 6 h	75 kg 30 kg
RQ-2 Pioneer AAL, USA		< 180 km	175 km/h	4500 m	< 5 h	180 kg 30 kg
RQ-5 Hunter Northrop Grumman, USA		< 270 km	204 km/h	4500 m	< 12 h	720 kg 90 kg
RQ-6 Outrider Alliant Techsystems, USA		< 200 km	200 km/h	4570 m	< 7 h	230 kg 50 kg

Tabela 4.7. Porównanie M-7D „Sky Patrol” z innymi systemami tej samej klasy (cz. 2)

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa Ładowność
Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
M-7 "Sky Patrol" NAU		< 20 km	150 km/h 190 km/h 250 km/h	3000 m 6000 m 4000 m	< 10 h	90 / 30 kg 150 / 50 kg 200 / 70 kg
RQ-7A Shadow AAL, USA		< 125 km	225 km/h	4570 m	< 5 h	150 kg 30 kg
Blueye BlueBird Aero Systems, Israel		< 50 km	225 km/h	1000 m	< 8 h	60 kg 10 kg
Fox CAC Systemes, France		< 530 km	150 km/h	4000 m	< 6 h	125 kg 25 kg
Eyrie Mk.7 , C.Craft Wozlmayer GmbH, Austria		< 60 km	310 km/h	4000 m	< 15 h	225 kg 65 kg
Crecerelle Sagem, France		< 50 km	240 km/h 252	4500 m	< 3 h	115 kg 20 kg

Bezzałogowy system latający M-6 „Skylarc”

Zastosowanie: wykonywanie zdjęć lotniczych, dozоровanie w czasie rzeczywistym, patrolowanie obiektów liniowych (M-6B), biologiczna ochrona roślin (M-6CX-E).

Patent: UA № 34952, №38142, №43459

Klasa międzynarodowa: mini; masa: poniżej 20 kg; zasięg operacyjny: poniżej 10 km; pułap lotu: 300 m; długość lotu: ponad 2 h.

Klasa ukraińska: małe UAS; masa: 10 do 100 kg;

Systemy bojowe / taktyczne;

Krótki czas lotu: 3 do 6 h

Rok powstania: 2004

Premierowy lot: 2004

M-6 „Skylarc” powstał jako wynik poszukiwania efektywnych narzędzi wykonywania zdjęć lotniczych, dozоровania wideo, lotniczych oprysków chemicznych oraz innych usług lotniczych. Wdrożenie technologii bezzałogowych systemów latających (UAS) zapewnia poprawę wydajności technicznej i ekonomicznej operatorów oferujących tego typu usługi. Głównym źródłem oszczędności w przypadku systemów bezzałogowych jest zmniejszone zużycie paliwa i bezpośrednich wydatków operacyjnych, redukcja kosztów ludzkich oraz możliwość wykorzystania w warunkach różnego natężenia ruchu. Zestaw obejmujący dwa UAS, centrum kontroli naziemnej, wyrzutnię dronów oraz specjalistyczne urządzenia pokładowe może wykonywać swoje działania zarówno w normalnych warunkach meteorologicznych, jak i w nocy. Możliwe jest również wprowadzenie automatycznej kontroli systemów bezzałogowych.

Etap rozwoju: loty testowe prototypu.



Charakterystyka techniczna:

Rozpiętość skrzydeł – 1,6 m;

Waga ładunków specjalnych – do 7 kg;

Masa startowa – do 12 kg;

Moc silnika – 1,7 kW;

Prędkość maksymalna – 150 km/h;

Maksymalna prędkość oprysku – 40 ha/ h;

Pułap lotu – do 1000 m;

Metoda startu – z wyrzutni;

Metoda lądowania – jak samolot / spadochron.

Wersja elektryczna:

Maksymalna masa startowa – 7,0 kg;

Masa własna – 5,2 kg;

Waga ładunków specjalnych – 1,8 kg;

Czas lotu – do 1 h;

Zasięg – 80 km;

Prędkość przelotowa – 80 km/h;

Pułap lotu – 300 m;

Moc startowa silnika – 2,55 kW.

Wersja spalinowa:

Maksymalna masa startowa – 12,0 kg;

Masa własna – 5,5 kg;

Prędkość przelotowa – 110 km/h;

Pułap lotu – 300 m;

Moc startowa silnika – 2,79 kW;

Tempo przepływu paliwa – 0,51 kg/h.

Ilustracja 4.3. Bezzałogowy system latający M-6 „Skylarc”

Tabela 4.8. Zasięg i czas lotu bezzałogowych systemów latających M-6 „Lark” o różnym napędzie

Napęd elektryczny (M-6E)

Maksymalna masa startowa	kg	7,0
Masa własna	kg	5,2
Ładowność	kg	1,8
Czas lotu	h	maksymalnie 1
Zasięg	km	80
Prędkość przelotowa	km/h	80
Pułap lotu	m	300
Moc startowa silnika	kW	2,55

Napęd spalinowy (M-6B)

Maksymalna masa startowa	kg	12,0
Masa własna	kg	5,5
Prędkość przelotowa	km/h	110
Pułap lotu	m	300
Moc startowa silnika	kW	2,79
Zużycie paliwa na godzinę lotu	kg/h	0,51

Warianty w zależności od wagi ładunku i masy paliwa (napęd spalinowy)

Masa paliwa [kg]	Ładowność [kg]	Czas lotu [h]	Zasięg [km]
6,0	0,55	11	1000
3,0	3,5	5,5	500
1,0	5,5	2	200

Napęd metanolowy

Maksymalna masa startowa	kg	12,0
Masa własna	kg	4,45
Prędkość przelotowa	km/h	110
Pułap lotu	m	300
Moc startowa silnika	kW	1,74
Zużycie paliwa na godzinę lotu	kg/h	1,8

Warianty w zależności od wagi ładunku masy paliwa (napęd metanolowy)

Masa paliwa [kg]	Ładowność [kg]	Czas lotu [h]	Zasięg [km]
7,0	0,55	3,5	385
3,0	4,55	1,5	165
1,0	6,55	0,5	50

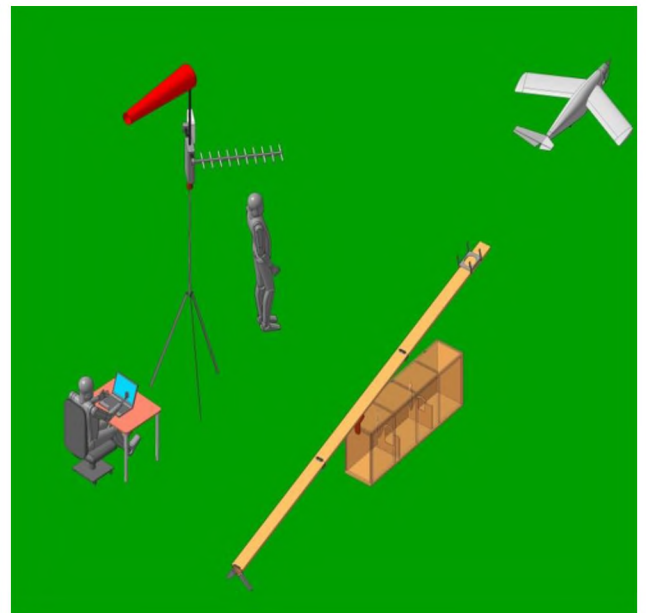
Analogiczne systemy na świecie: Pointer (USA); LUNA (Niemcy); Rafaeli Sky Lite B (Izrael) itd.

Tabela 4.9. Porównanie bezzałogowego systemu latającego M-6 „Lark” z innymi systemami tej samej klasy

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Czas lotu	Masa
Bliskiego zasięgu	CR	10–30 km	3000 m	2–4 h	20–150 kg

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa Ładowność
-------	---------	--------	---------------------	------------	-----------	-------------------------

Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
M-6 "Lark" NAU		< 20 km	240 km/h	1000 m	< 4 h (< 7 h)	< 12 kg < 5,5 kg
Stalker Lockheed Martin USA		< 20 km	80 km/h	4500 m	< 5 h	< 6.0 kg < 1.5 kg
Skylark-I LE Silver Arrow, Elbit Systems, Israel		< 30 km	90 km/h	5000 m	< 3 h	< 6,5 kg < 1.5 kg
WanderB BlueBird Aero Systems, Israel		< 35 km	80 km/h	5000 m	< 5 h	< 8.0 kg < 3.0 kg
Orbiter III Aeronautics Defense Sys., Israel		< 100 km	130 km/h	5000 m	< 6 h	< 20 kg < 3.0 kg
Luna X-2000 EMT, Germany		< 400 km	140 km/h	3500 m	< 6 h	< 35 kg < 5.0 kg



Ilustracja 4.4. Zdalnie sterowany system latający M-6 „Skylarc”

Bezzałogowy system latający M-10 „Eye”

Zastosowanie: dozorowanie wideo w czasie rzeczywistym; patrolowanie obiektów na powierzchni ziemi i wykonywanie zdjęć lotniczych.

Klasa międzynarodowa: mikro; masa: poniżej 5 kg;

Klasa ukraińska: UAS wojskowe

Premierowy lot: 2011



Charakterystyka techniczna:

Maksymalna masa startowa – 3 kg;

Masa własna – 1,3 kg;

Prędkość przelotowa – 60 km/h;

Pułap lotu – 300 m.

Wariant w zależności od wagi ładunku:

Waga ładunku specjalnego – 1,5 kg / 1,3 kg;

Waga baterii – 0,19 kg / 0,38 kg;

Czas lotu – 45 min / 1,5 h;

Zasięg – 45 km / 90 km.

Ilustracja 4.5. Bezzałogowy system latający M-10 „Eye”

Celem projektu M-10 było zbudowanie cichego bezzałogowego statku powietrznego napędzanego silnikiem elektrycznym. Dzięki niewielkiej masie i ładowności ($\sim 5 \text{ kg/m}^2$) dron może startować z rąk operatora i operować nawet na obszarze miejskim lub na leśnej polanie. Stosunkowo krótki czas pracy silnika skompensowany jest przez możliwość przełączania drona z lotu napędzanego silnikiem na lot szybowy, co umożliwia pewne wydłużenie czasu lotu.

Czas lotu: poniżej 1,5 h, na jednej baterii litowo-polimerowej. Po wymianie baterii (ok. 10 min), UAS jest natychmiast gotowy do ponownego użycia. Metoda kontroli: automatyczne i standardowe ręczne zdalne sterowanie. Dron wyposażony jest w aparat fotograficzny i kamerę CCD z nadajnikiem.

Główne zastosowanie M-10 „Eye” to rozpoznanie pola walki przez jednostki na poziomie plutonu. Cywilne zastosowania drona obejmują ochronę niewielkich terenów, monitorowanie ograniczonych obszarów itp.

M-10 „Eye” mogą być transportowane w pojemnikach o masie 5 kg i wymiarach $1,1 \times 0,29 \times 0,29$ m. Masa brutto przewożonego zestawu – ok. 10 kg.



Faza rozwoju: testowe loty prototypu.

Analogiczne systemy na świecie: Dragonfly Tango; Micropilot CropCam (Kanada); EMT Aladin (Niemcy); Aeronautics Orbiter, IAI Bird Eye 400 (Izrael) itd.

Tabela 4.10. Porównanie bezzałogowego systemu latającego M-10 „Eye” z innymi systemami tej samej klasy

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Czas lotu	Masa
Mini	Mini	<10 km	150–300 m	<2 h	<20 kg

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa łądowność
-------	---------	--------	---------------------	------------	-----------	-------------------------

Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
M-10 "Eye" NAU		< 45 km (< 90 km)	60 km/h	300 m	< 45 min. (< 1.5 h)	< 3.0 kg < 1.3 kg
RQ-11 Raven AeroVironment USA		< 10 km	256 95 km/h	5000 m	< 1 h	< 2.0 kg < 1.0 kg

Bezzałogowy statek powietrzny M-22 „Aerotester”

Zastosowanie: szkolenie operatorów dronów; „latające laboratorium”.



Charakterystyka techniczna:

Rozpiętość skrzydeł – 2,5 m;
Waga ładunku specjalnego – do 8 kg;
Masa startowa – do 18 kg;
Prędkość maksymalna – 120 km/h;
Moc silnika – 2,7 kW;
Pułap lotu – do 2000 m;
Metoda startu i lądowania – jak samolot;
Czas przygotowania do pracy – 0,5 h.

Ilustracja 4.6. Bezzałogowy statek powietrzny M-22 „Aerotester”

Zdalnie sterowany zestaw lotniczy (RPAS) „Ukraina”

Funkcja: zabezpieczenie misji dwusilnikowych systemów M-7B5 „Sky Patrol” w wyznaczonej przestrzeni powietrznej polegającej na wykonywaniu działań lotniczych w interesie gospodarki i obrony narodowej. Obsługiwane przez czteroosobowy zespół zewnętrznych operatorów.

System składa się z jednego bezzałogowego statku powietrznego UAV M-7B5 „Sky Patrol” umieszczonego na przyczepie-platformie i jednej naziemnej stacji kontrolnej (LCS-1-7V5) umieszczonej na przyczepie.



Charakterystyka techniczna:

- Stacjonowanie zestawu – na wszystkich typach dróg startowych;
- Okres niezależnego działania – do 3 dni;
- Metoda transportu – 2 przyczepy ciągnięte przez niewielkie ciężarówki;
- Ciężarówki nie są potrzebne do rozruchu systemu;
- Długość lotu UAV bez tankowania – 10–17 h;
- Zasięg łączności: 100–120 km;
- Zasięg lotu UAV – 1000–2800 km;
- Pułap lotu UAV – 3000 m;
- Masa ogranicznika – do 2000 kg.

Ilustracja 4.7. Charakterystyka techniczna systemu „Ukraina”

Polikopter NAU PC-08

Zastosowanie: wykonywanie zdjęć lotniczych, kartografia, dozоровanie wideo w czasie rzeczywistym, patrolowanie obiektów liniowych.



Osiągi:

- Masa startowa – poniżej 5 kg;
- Ładowność – poniżej 2 kg;
- Prędkość przelotowa: 20–30 km/h;
- Rozpiętość doczepianych skrzydeł – 2,2 m;
- Wysokość – 0,6 m;
- Całkowita moc jednostki napędowej – poniżej 1,6 kW.
- Długość lotu:
 - bez doczepianych skrzydeł – poniżej 20 min;
 - z doczepianymi skrzydłami – 55 min.

Ilustracja 4.8. Charakterystyka techniczna Polikoptera NAU PC-08

Celem projektu było wydłużenie czasu i odległości lotu bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania typu polikopter – „heksakoptera”. Wydłużenie lotu można osiągnąć za pomocą doczepianych skrzydeł nośnych.





W rzeczywistości takie rozwiązanie wskazuje możliwość poprawy właściwości nośnych śmigieł podczas przelotu poprzez wykorzystanie skrzydeł doczepianych do polikoptera pod odpowiednim kątem do płaszczyzny obrotu śmigła. Według wstępnych szacunków, przy prędkości ok. 5–6 m/s skrzydła polikoptera o powierzchni 0,7 m² wytwarzają siłę nośną 1,5–3 kgf/cm (at PP-1...1.5). Rekompensuje to nawet 40% masy UAS, pozwala zaoszczędzić energię i wydłużyć lot.

By umożliwić pełną kontrolę lotek i wychylenia UAS podczas lotu, należy dodatkowo wykorzystać sterolotki. Standardowy ładunek funkcyjny to żyroskopowa kamera CCD i aparat fotograficzny do zdjęć dziennych.

Tabela 4.11. Porównanie polikoptera NAU PC-08 z innymi urządzeniami tej samej klasy

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Czas lotu	Masa
Mikro	μ	<10 km	250 m	1 h	<5 kg

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość	Pułap	Czas	Masa
-------	---------	--------	----------	-------	------	------

			przelotowa	lotu	startowa lotu	ładowność
Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
Polycopter PC-07 NAU		< 10 km	20–30 km/h	150–300 m	< 30 min.	< 4.0 kg < 1.5 kg
SQ-4 Recon BCB International USA		2.5 km	24 km/h	400 m	< 30 min.	0.20 kg
MAV Honeywell USA		10 km	80 km/h	150 m	< 60 min.	7.2 kg
Draganflyer X6 Draganflyer Inc. USA		20 km	24 km/h	300 m	< 60 min.	11 kg

Projekt bojowego bezzałogowego statku powietrznego (LET UAV) M-49 „Haydamak”

Zastosowanie: dozоровanie wideo w czasie rzeczywistym;
operacje specjalne;
pojedyncze dostawy ładunków specjalnych.

Specyfikacja techniczna:

Rozpiętość skrzydeł – 0,82 m

Długość – 0,46 m

Maksymalna masa startowa – <4 kg

Masa własna – 1,2 kg

Prędkość maksymalna – 140 km/h

Prędkość przelotowa – 100 km/h

Pułap maksymalny – 2000 m

Kontrola automatyczna

Start – z urządzenia startowego lub z ręki

Łądowanie – ze spadochronem

Ograniczenia – lokalna prędkość wiatru >17 m/s

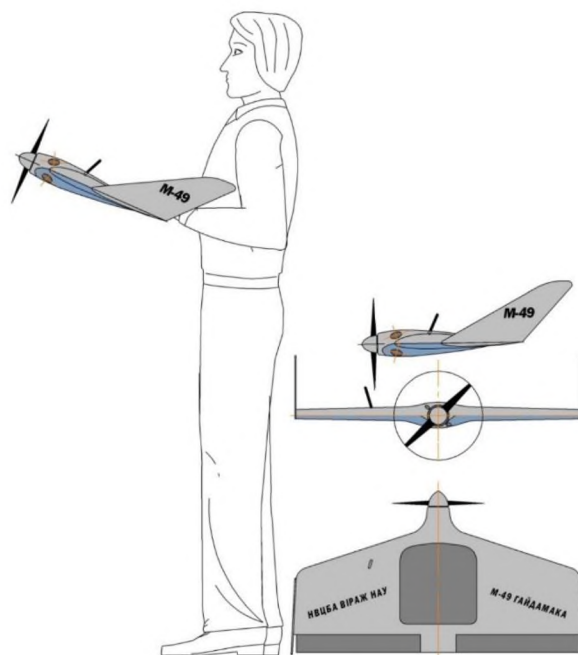
Łądowność – 1,8 kg

Waga akumulatora – 1 kg

Czas lotu – ~30 min

Odległość lotu – ~45 km

(w zależności od warunków meteorologicznych)



Ilustracja 4.9. M-49 „Haydamak”

Tabela 4.12. Porównanie M-49 „Haydamak” z innymi systemami tej samej klasy

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Czas lotu	Masa
Mikro	Micro	<10 km	250 m	1 h	<5 kg

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa Ładowność
-------	---------	--------	---------------------	------------	-----------	-------------------------

Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
UAV of shock class "Haydamak" NAU		< 45 km	140 km/h	2000 m	< 30 min.	< 4 kg < 1.8 kg
WASP, WASP 3 AeroVironment USA		< 5 km	65 km/h	300 m	< 45 min.	6.5 kg 0.5 kg
MicroB BlueBird Aero Systems Israel		< 10 km	85 km/h	300 m	< 60 min.	1.0 kg 0.2 kg

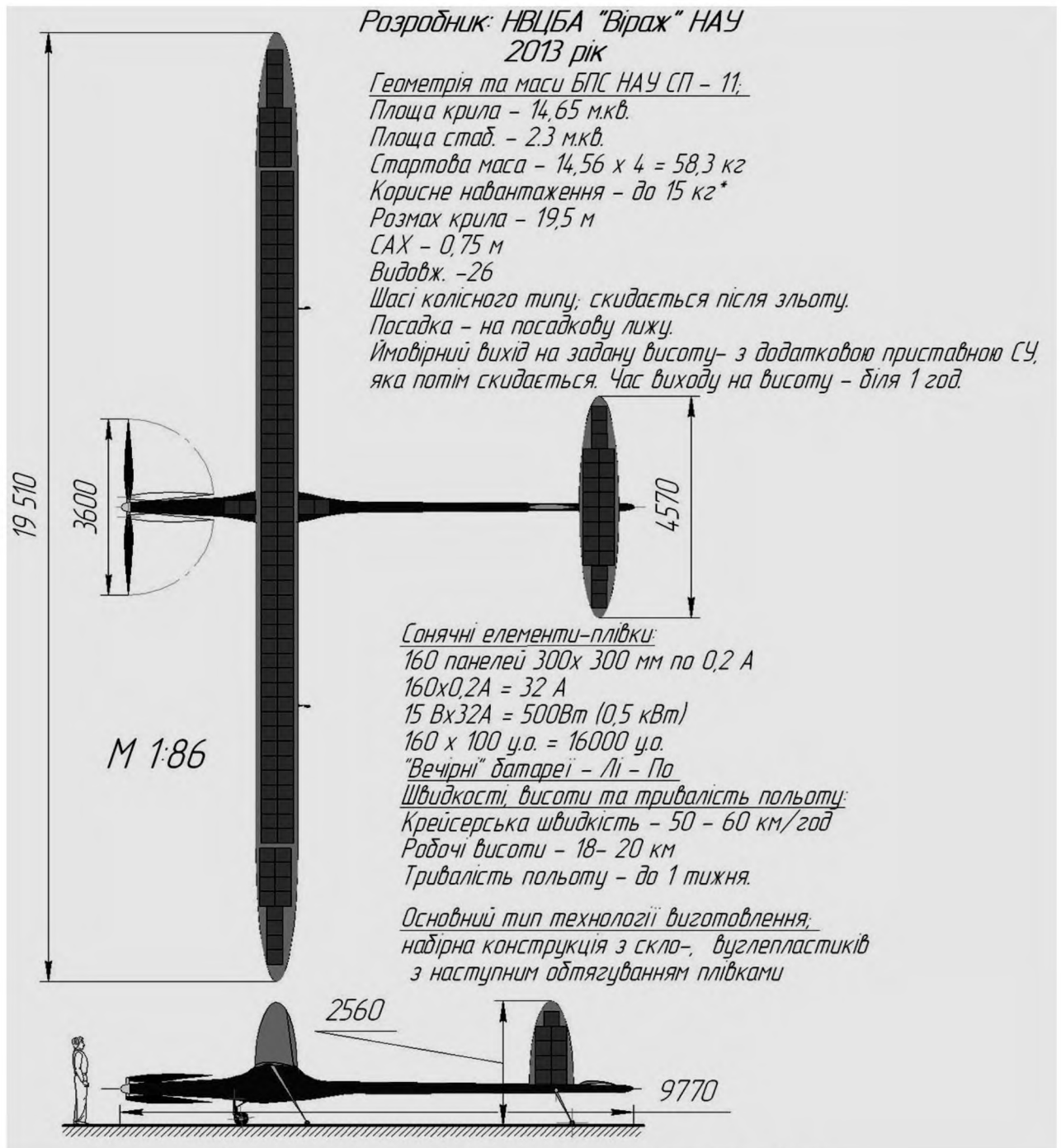


Иллюстрация 4.10. Стратосферический безалоговый самолет воздушный SP-11

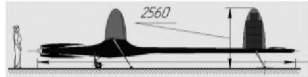


Specyfikacja techniczna:

- Rozpiętość skrzydeł – 19,5 m
- Długość – 9,77 m
- Maksymalna masa startowa – 58 kg
- Ładowność – 15 kg
- Prędkość przelotowa – 60 km/h
- Pułap maksymalny – 20 000 m
- Kontrola automatyczna
- Start – urządzenie startujące
- Łądowanie – na płozach
- Czas lotu – <1 tydzień
(niezależnie od warunków meteorologicznych)

Tabela 4.13. Porównanie stratosferycznego statku powietrznego SP-11 z innymi statkami tej samej klasy

Klasa	Oznaczenie	Zasięg	Pułap	Czas lotu	Masa
Stratosferyczne	STRATO	>2000 km	>20 000 i <30 000 m	>48 h	>2500 kg

Nazwa	Zdjęcie	Zasięg	Prędkość przelotowa	Pułap lotu	Czas lotu	Masa startowa ładowność
					<1 tydzień	
					<2 tygodnie	
					<1 rok	

Title	Photo	Flight distance	Cruise speed	Altitude of flight	Flight duration	Takeoff weight Payload
SP-11 NAU		< 5 000 km	60 km/h	20000 m	< 168 h (< 1 week)	60 kg < 15 kg
Zephyr 7 QinetiQ UK		< 10 000 km	90 km/h	21000 m	< 336 h (< 2 week)	32 kg < 15 kg
Solara 50 Titan Aerospace USA		4 500 000 km	110 km/h	20000 m	< 1 year	160 kg < 30 kg

4.3. Wykorzystanie technologii i możliwości zdalnie sterowanych systemów latających w realizacji różnego typu zadań

4.3.1. Wykorzystanie technologii o możliwości zdalnie sterowanych systemów latających w rozwiązywaniu problemów logistycznych związanych z infrastrukturą terytorialną

Zdalnie sterowane systemy latające (zdalnie sterowane statki powietrzne, remotely piloted aircraft systems, RPAS) wykorzystywane są do realizacji różnego typu zadań w ramach globalnych systemów logistycznych i rozwoju infrastruktury terytorialnej. By poprawić efektywność tych działań, badacze proponują udoskonalone metody rozwoju systemów bezzałogowych, obejmujące modyfikacje konstrukcyjne i wykorzystanie rozwiązań modułowych.

Gwałtowny rozwój globalnych systemów logistycznych oraz infrastruktury terytorialnej wymaga poszukiwania nowych metod monitorowania, kontroli przepływu i nawigacji. Jedną z tych metod jest zastosowanie globalnych systemów nawigacji satelitarnej (Global Satellite Navigation Systems, GSNS), łączących urządzenia pokładowe z naziemnymi. Obecnie jednak wykorzystanie tych systemów nie zawsze jest w pełni efektywne i opłacalne ekonomicznie. Nowym elementem, zwiększającym ich ogólną wydajność i skuteczność wykonywania zadań, mogą być właśnie zdalnie sterowane bezzałogowe statki powietrzne (RPAS).

Kierunki wykorzystania RPAS w rozwiązywaniu problemów logistycznych związanych z infrastrukturą terytorialną

Najważniejsze zastosowania RPAS związane z rozwojem globalnych systemów logistycznych i infrastruktury terytorialnej obejmują następujące obszary działania:

- zarządzanie systemami logistycznymi;
- badania geofizyczne – gromadzenie informacji na temat warunków na powierzchni ziemi i składu gleby do określonej głębokości na terenach, na których planowany jest rozwój infrastruktury;
- mapowanie – analiza i ocena układu przestrzennego obiektów na powierzchni ziemi; rozbudowa infrastruktury zgodnie z systemem geodezyjnym Ziemi;
- ochrona obszarów – proaktywne monitorowanie w celu zapobiegania nieuprawnionym zakłóceniom działania obiektów; ochrona wszystkich elementów infrastruktury terytorialnej;
- zarządzanie planowaniem zagospodarowania terenów w obszarach miejskich o gęstej zabudowie i trudnych warunkach geologicznych;
- monitorowanie budynków w celu bezpiecznego i zrównoważonego rozwoju obszarów zabudowanych, a także poprawy efektywności wykorzystania terenów przeznaczonych do zamieszkania w obecnych warunkach społecznych i gospodarczych;
- ocena rezultatów badań gruntu i powietrza – gromadzenie i analiza próbek gruntu i powietrza w celu weryfikacji dokładności pomiarów obiektów naturalnych lub oceny charakterystyki urządzeń badawczych.

Czynniki sprzyjające wykorzystaniu RPAS w działaniach monitorujących to:

- wysoki ogólny poziom rozwoju systemów bezzałogowych na całym świecie;
- rozwój przedsiębiorstw zajmujących się tworzeniem specjalistycznych systemów bezzałogowych, umożliwiającą wykorzystanie ich doświadczeń i bazy produkcyjno-technicznej;
- znaczący rozwój technologiczny w ostatnim okresie w obszarze zdalnego monitorowania i przetwarzania danych; istnienie rozległej sieci komunikacyjnej.

Analiza branży oraz najważniejszych składników infrastruktury, obejmująca wymogi wobec służb lotniczych, pozwala na sformułowanie listy zadań związanych z utrzymaniem służb lotniczych, które powinny być realizowane przez RPAS. Lista ta nakłada określone wymagania, zarówno na systemy bezzałogowe, jak i na ich docelowe wyposażenie [319].

Również w obszarze fotografii lotniczej RPAS mogą przynieść znaczące korzyści i oszczędności. Ich możliwości w tym zakresie zależą w dużym stopniu od pułapu lotu. Dziś maksymalny pułap wynosi 20 km, a w dłuższej perspektywie przewiduje się, że wzrośnie on do 30 km. Oznacza to, że drony będą mogły konkurować z satelitami, monitorując obszary o powierzchni nawet miliona kilometrów kwadratowych. Dzięki temu systemy bezzałogowe będą mogły przejąć funkcje konstelacji satelitów i pełnić je w czasie rzeczywistym w całym regionie. W odróżnieniu od satelitów UAS spędzają na obserwacji określony czas. Po zakończeniu zadania na określonej wysokości i w wyznaczonym czasie wracają do bazy, a ich miejsce zajmują inne. To główny czynnik oszczędnościowy, ponieważ znacznie tańsze od satelitów drony mogą być wykorzystywane wielokrotnie, w różnych rejonach. Bezzałogowe statki powietrzne mogą konkurować z satelitami także jako narzędzie tworzenia sieci telekomunikacyjnych i systemów nawigacji. Drony mogą prowadzić ciągle dozоровanie na wielu różnych częstotliwościach równocześnie. Pozwala to stworzyć pole informacyjne dla całego kraju, obejmujące monitorowanie i kontrolę ruchu w powietrzu, na ziemi i na wodzie. Systemy bezzałogowe mogą przejąć funkcje lokalizatorów naziemnych, powietrznych i satelitarnych (gromadzone przez nie informacje dają pełny obraz sytuacji w powietrzu, na wodzie i na ziemi).

Kolejnym priorytetowym zadaniem logistycznym, które może być wykonywane przez RPAS, jest monitorowanie ruchu drogowego w celu identyfikacji pojazdów naruszających jego przepisy. W takich sytuacjach przedstawiciele policji drogowej wspólnie ze specjalistami mogą sterować ruchami drona z naziemnego centrum kontroli, a samochody patrolowe wyposażone w monitory wideo mogą odbierać sygnał w czasie rzeczywistym i reagować na niebezpieczne zdarzenia. Obserwacja z powietrza z wykorzystaniem RPAS pozwoli usprawnić przepływ ruchu i zwiększyć poziom bezpieczeństwa na drogach.

Bezzałogowe statki powietrzne ułatwiają również wykrywanie utrudnień i skomplikowanych sytuacji na drogach, co umożliwi szybkie przekierowanie ruchu, pozwalające uniknąć zatorów. UAS i helikoptery bezzałogowe są bardzo skutecznym narzędziem monitorowania ruchu drogowego, szczególnie ich nowsze wersje, o dłuższym czasie działania, wyposażone w nowocześniejsze urządzenia obserwacyjne.

Jednym z najważniejszych obszarów zastosowania bezzałogowych systemów latających w sferze cywilnej jest monitorowanie rozmaitych terenów, wód, dróg oraz granic. Brak załogi i wymaganych dla niej systemów podtrzymywania życia daje możliwość zmniejszenia rozmiarów statku powietrznego, mocy jednostki napędowej, a w konsekwencji znacznego ograniczenia kosztów operacyjnych. Zastosowanie RPAS nie tylko pozwala zredukować koszty samego monitorowania, ale również umożliwia zwiększenie intensywności lotów patrolowych, a także oznacza znacznie mniejsze straty w przypadku awarii lub wypadku. Jednocześnie w rzeczywistości organizacja procesu patrolowania wymaga szczegółowych danych na temat zróżnicowania obsługiwanych kierunków, optymalnych tras przelotu czy lokalizacji obiektów i innych elementów infrastruktury. Zadania związane z monitorowaniem mają istotne znaczenie z ekonomicznego punktu widzenia. Z jednej strony, im więcej okrążeń wykonują drony podczas jednego kursu, tym wyższe są jego koszty. Z drugiej, zwiększenie częstotliwości misji zapewnia aktualną wiedzę na temat stanu obserwowanych obiektów, umożliwia szybkie reagowanie w nagłych wypadkach i w efekcie pozwala minimalizować potencjalne straty.

Projektowanie różnych kategorii wydajnych i efektywnych RPAS oraz UAV służących rozwiązywaniu problemów logistycznych związanych z infrastrukturą terytorialną

Najważniejsze kierunki rozwoju bezzałogowych statków powietrznych (UAV), służące realizacji zróżnicowanych zadań, obejmują [323]:

- zapewnienie najlepszej możliwej charakterystyki i osiągnięć UAV;
- możliwość monitorowania jednocześnie dużego obszaru;
- obniżanie kosztów bezzałogowych statków powietrznych;
- wielofunkcyjność i wielowariantowość UAV;
- włączenie UAV do tymczasowych sieci informacyjnych w obszarach wykorzystania.

Prowadzenie rozpoznania i monitorowania z powietrzna to jeden z ważnych sposobów poprawy efektywności, a w połączeniu z innymi rozwiązaniami technicznymi i organizacyjnymi – skuteczne narzędzie realizacji zadań różnego typu. Biorąc pod uwagę zróżnicowanie tych zadań, ich wykonanie wymaga wykorzystania różnych kategorii bezzałogowych statków powietrznych oraz innych podobnych systemów.

Projektowanie i konstruowanie nowoczesnych bezzałogowych systemów latających to proces wykraczający poza tradycyjną produkcję statków powietrznych. Poniżej przedstawiamy najważniejsze technologie stosowane w produkcji RPAS:

- tworzenie i produkcja zaawansowanych materiałów konstrukcyjnych, szczególnie kompozytów, z wykorzystaniem nanopowłok;
- nowoczesne technologie komputerowe, w tym systemy mikroprocesorów, wykorzystywane w celu gromadzenia, przetwarzania i przechowywania danych;
- teoria automatycznych systemów kontroli, jako gałąź cybernetyki, w połączeniu z teorią transmisji i kodowania informacji oraz kompresji danych;
- urządzenia i systemy łączności, w tym systemy kosmiczne;
- technologie teledetekcji (radary, systemy optyczne, czujniki wielospektralne);
- technologie energetyczne, alternatywne źródła energii, akumulatory o zwiększonej pojemności, energia słoneczna, ogniwa paliwowe;
- narzędzia i systemy nawigacyjne; zarządzanie ruchem powietrznym poprzez wdrożenie automatycznego dozoru zaleźnego;
- systemy informacji geograficznej (GIS);
- technologie przetwarzania obrazów, rozpoznawanie wzorców;
- technologie rozwijające funkcjonalność interfejsów człowiek–maszyna;
- technologie wspierające rozwój możliwości sztucznej inteligencji.

Rozwój różnych typów bezzałogowych statków powietrznych odbywa się zgodnie z powyższymi zasadami. Realizacja wyznaczonych zadań wymaga odpowiedniej charakterystyki, osiągow i wyposażenia RPAS, co oznacza wysokie koszty produkcji i operacji. By zredukować te koszty, producenci muszą rozwijać i wdrażać zaawansowane technologie oraz rozwiązania, takie jak konstrukcje modułowe czy modyfikacje na poziomie elementów strukturalnych projektu.

Dlatego podczas tworzenia RPAS projektanci muszą koncentrować się przede wszystkim na zapewnieniu maksymalnych możliwości zastosowania każdego z typów UAV. Dzięki temu jeden uniwersalny system bezzałogowy może zastąpić kilka innych, realizując ich zadania i wspomagając rozwiązanie zróżnicowanych problemów. Pozwala to znacząco obniżyć koszty operacyjne samych UAV, a także koszty urządzeń naziemnych, stanowiących istotny element całego systemu.

Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w rozwiązywaniu problemów wymaga nie tylko bezpośredniej kontroli nad określonymi obszarami na powierzchni ziemi, ale również stworzenia tymczasowych sieci wymiany informacji na terenach objętych działaniami. Metoda ta pozwala znacząco ograniczyć czas potrzebny na działania i umożliwia:

- analizowanie sytuacji operacyjnej na obserwowanym obszarze w czasie zbliżonym do rzeczywistego;
- większą selektywność na dłuższych dystansach w wyborze obserwowanych obiektów;
- zwiększenie efektywności zarządzania zasobami materiałowymi i ludzkimi podczas stosowania środków specjalnych;
- ograniczanie liczby i czasu trwania procedur kontrolnych podczas kontroli granicznej.

National Aviation University od wielu lat opracowuje zasady projektowania i budowy eksperymentalnych zdalnie sterowanych statków powietrznych [324].

Zintegrowane podejście do projektu obejmuje następujące elementy:

- określenie zasad konstrukcji bezzałogowych systemów latających na podstawie metodologii „systemu zarządzania bezpieczeństwem”, zgodnie z międzynarodowymi wymogami;

- opracowanie i wykorzystanie materiałów kompozytowych spełniających odpowiednie kryteria dotyczące wytrzymałości;
- rozwój nanotechnologii i wykorzystanie ich w urządzeniach pokładowych UAS oraz w urządzeniach naziemnych;
- projektowanie i produkcja zestawów kontrolnych wykorzystywanych w urządzeniach pokładowych i naziemnych;
- opracowanie rozwiązań umożliwiających automatyczne planowanie trajektorii lotu, wykorzystujących nowoczesne technologie informatyczne;
- opracowanie i wdrożenie metod oraz algorytmów umożliwiających automatyczne lądowanie UAV z wykorzystaniem sygnałów sieciowych wysyłanych przez orbitujące systemy satelitarne;
- stworzenie kanału łączności „pokład–ziemia, ziemia–pokład” transmitującego chronione dane, opracowanie systemu kontroli lotu, a także standaryzacja rekomendacji działań;
- projektowanie, produkcja i testowanie standardowych modeli UAS;
- opracowanie programów szkoleniowych dla operatorów UAS i personelu naziemnego;
- tworzenie dokumentacji technicznej dla celów certyfikacji RPAS;
- ocena efektywności wykorzystania zdalnie sterowanych systemów latających.

Metody oceny efektywności ekonomicznej RPAS

Na obecnym etapie rozwoju operacji lotniczych i w warunkach funkcjonowania licznych niezależnych organizacji efektywność ekonomiczna wykorzystania statków powietrznych może być różna, w zależności od problemu i sytuacji. Oceniając szczególnie efektywność wykorzystania systemów bezzałogowych, powinniśmy brać pod uwagę nie tylko sam statek powietrzny, ale cały zintegrowany system RPAS, należący do konkretnej organizacji, a także zewnętrzną infrastrukturę wykorzystywaną w danym przypadku. Czasami istotnym elementem całego systemu jest również podmiot, na rzecz którego wykorzystujemy UAV.

Kryteria i metody oceny efektywności ekonomicznej zostały opracowane na podstawie analizy efektywności ekonomicznej RPAS, wykorzystującej odpowiednie modele. Jednym z nich był model optymalizacji liczby lotów patrolowych, stosowany do obliczania kosztów monitorowania w okresie 1 roku i opracowania metod szacowania zapotrzebowania na działania RPAS oraz oceny wydajności ich wykorzystania.

Wskaźnikiem ułatwiającym wybór narzędzi lotniczych do prowadzenia rozpoznania i obserwacji, a także umożliwiającym ocenę efektywności zastosowania bezzałogowych statków latających do rozwiązania wspomnianych problemów, jest koszt pozyskania informacji z obserwowanego rejonu powierzchni ziemi (\bar{C}_I). \bar{C}_I może stanowić istotne uzasadnienie dla wykorzystania bezzałogowych systemów latających:

$$\bar{C}_I = \frac{C_{AC} + C_{AED} + C_{FEM}}{n_{AP} \cdot P_{PSP} \cdot F_{\Sigma}^1}$$

gdzie C_{AC} to koszt nowego statku powietrznego; n_{AP} to szacowana liczba zastosowań systemu bezzałogowego (wielokrotność); C_{AED} to koszt szybko zużywalnych urządzeń wykorzystywanych podczas lotu (akceleratorów, śrub itp.); C_{FEM} to koszt paliwa i materiałów jednorazowych (olejów i smarów, gazów przemysłowych itp.); P_{PSP} to prawdopodobieństwo równoczesnego wykonywania innych zadań; F_{Σ}^1 całkowita powierzchnia obszaru obserwowanego w jednym momencie [322].

Obliczanie produktywności lotniczych obserwacji obiektów liniowych odbywa się na podstawie zdjęć obserwowanego obszaru. Wielkość zdjęć lotniczych wykonywanych podczas przelotu UAV oblicza się z następujących wzorów [327, 328]:

$$\frac{1}{2}L = H \times \operatorname{tg} \frac{1}{2} \lambda(\beta);$$

$$S_{3H} = L_x \times L_y;$$

gdzie H to wysokość [m]; λ , β to kąty widzenia, odpowiednio poziomy i pionowy, bez przybliżenia, wyrażony w stopniach; S_{3H} to wielkość zdjęć lotniczych [m²]; a L to długość boków zdjęć lotniczych:

$$\frac{1}{2}L_{x1} = H \times \operatorname{tg} \frac{1}{2} \lambda ;$$

$$\frac{1}{2}L_{y1} = H \times \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta .$$

Obserwowany obszar na godzinę:

$$S_{\text{hour}} = (S_{\text{ph}} - p) \times N_{\text{ph}};$$

gdzie p to wzdluzne zachodzenie na siebie zdjęć lotniczych [%]; N_{ph} to liczba klatek na godzinę; $N_{\text{ph}} = 3600/t$.

Ocena produktywności UAV w zakresie obserwacji obiektów liniowych na każdą godzinę pracy opiera się na liczbie wykonanych zdjęć. Czas pomiędzy kolejnymi klatkami obliczamy ze wzoru:

$$t = \frac{L_y - p}{V};$$

gdzie V to prędkość [m/s]; a p to wzdluzne zachodzenie na siebie zdjęć lotniczych [%].

Rynek operacji patrolowych wykonywanych przez systemy bezałogowe jest nowym i gwałtownie rozwijającym się rynkiem. Wiele wcześniejszych zaleceń i obserwacji, które były skuteczne w przypadku tradycyjnych produktów przemysłu lotniczego – np. samolotów transportowych – może się okazać nieprzydatne w tym nowym sektorze [329]. Z jednej strony powoduje to pojawienie się nowych problemów w obszarze marketingu. Z drugiej – rozwiązanie tych problemów może okazać się istotne również dla tradycyjnych segmentów rynku lotniczego, wchodzących w okres fundamentalnych zmian. Przy rosnącym zapotrzebowaniu na nowe typy statków powietrznych nowe narzędzia monitorujące oraz systemy informacyjno-kontrolne, organizacje zainteresowane stosowaniem RPAS zwiększają ich efektywność ekonomiczną i bezpieczeństwo operacyjne, co z kolei przekłada się w pewnym stopniu na rozwój wykorzystujących naukę branż i dywersyfikację ukraińskiej gospodarki.

A zatem popyt na bezałogowe systemy latające i wykonywane przez nie loty obserwacyjne zależy od ich efektywności ekonomicznej. Wprowadzenie odpowiednich zasad prowadzenia obserwacji powietrznych może przynieść znaczące oszczędności, wynikające nie tylko ze zmniejszenia liczby samych lotów, ale również z ograniczenia potencjalnych strat w efekcie wczesnego wykrywania zagrożeń i sytuacji awaryjnych dzięki zwiększeniu dokładności obserwacji.

Znacząca niepewność dotycząca wyniku, uzależnionego od charakterystyki obserwowanego obszaru i zadań wykonywanych przez RPAS, wymaga obliczeń obejmujący szeroki zakres parametrów modelu [326]. Odpowiednie modele ekonomiczne i matematyczne mogą stać się skutecznym narzędziem marketingowym, pozwalającym producentom i potencjalnym klientom RPAS przewidzieć efektywność ich wykorzystania w sektorach cywilnych, oszacować i skoordynować przybliżone wyniki ich działań i na tej podstawie opracować szczegółowe specyfikacje oraz ceny.

Zastosowanie RPAS w realizacji zróżnicowanych zadań wykonywanych w ramach rozwoju globalnych systemów logistycznych i infrastruktury terytorialnej wygląda bardzo obiecująco, ponieważ systemy bezałogowe oferują możliwości porównywalne do globalnych systemów nawigacji satelitarnej, przy znacznie niższych kosztach eksploatacyjnych. By poprawić ich efektywność, projektanci i producenci, przy wsparciu naukowców, rozwijają kolejne zaawansowane technologie oraz rozwiązania, takie jak konstrukcje modułowe czy modyfikacje na poziomie elementów strukturalnych projektu. Należy tu wspomnieć rozległe doświadczenia National Aviation University w określaniu zasad projektowania i produkcji efektywnych zdalnie sterowanych systemów

latających. Obecnie prowadzimy nasze prace w ramach wspólnego, Ukraińsko-Polskiego Instytutu Badawczego we Wrocławiu, poszukując dalszych możliwości poprawy efektywności RPAS w rozwiązywaniu problemów związanych z infrastrukturą terytorialną na terenie Ukrainy i Polski [320].

4.3.2. Stan obecny i perspektywy rozwoju zdalnie sterowanych systemów latających (RPAS) wykorzystywanych do zadań morskich

Gwałtowny rozwój światowego systemu transportu morskiego wymaga poszukiwania nowych metod monitorowania, kontroli przepływu i nawigacji. Znaczącą rolę w wykonywaniu niektórych istotnych zadań odgrywają światowe systemy nawigacji satelitarnej (GSNS), obejmując urządzenia na pokładach statków i na lądzie. Jednakże dzisiejsze wykorzystanie tych systemów nie zawsze jest wystarczająco efektywne i opłacalne ekonomicznie. Nowym elementem systemu transportu mogą stać się zdalnie sterowane systemy latające (RPAS), wspomagające w kompleksowy sposób realizację jego najważniejszych celów [320]. Obecnie bezzałogowe systemy latające stają się coraz ważniejszym elementem ogólnego systemu transportu lotniczego, dlatego Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) oraz liczne organizacje regionalne i krajowe, takie jak Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA), EUROCONTROL, Europejska Agencja Obrony (EDA), Europejska Agencja Kosmiczna (ESA), Europejska Organizacja Wyposażenia Lotnictwa Cywilnego (EUROCAE), Organizacja Traktatu Północnoatlantyckiego (NATO), amerykańskie Federalna Administracja Lotnicza (FAA), Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) i Radiotechniczna Komisja Aeronautyki (RTCA), a także rządy i władze lotnicze wielu państw prowadzą działania w celu zbadania i oceny możliwości pełnej integracji systemów bezzałogowych. Systemy te wykorzystują najnowocześniejsze technologie, które umożliwiają ich szerokie komercyjne zastosowanie, a także mają wpływ na ogólną poprawę bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego [4].

Najważniejsze zastosowania RPAS w realizacji zadań na morzu

RPAS mogą być wykorzystywane do realizacji następujących typów zadań na morzu:

1. *Identyfikacja niewielkich obiektów na powierzchni wody.*
2. *Wsparcie w działaniach kontrolnych związanych z przestrzeganiem zasad żeglugi morskiej:* Poszukiwanie i rozpoznawanie statków; Zapobieganie wypadkom w portach; Kontrola granic morskich; Kontrola przestrzegania przepisów połowowych.
3. *Regionalne i międzyregionalne sieci telekomunikacyjne:* Tymczasowe systemy łączności, w tym łączność komórkowa; Tymczasowe systemy transmisji; Tymczasowe systemy nawigacyjne.
4. *Obserwacja i kontrola powierzchni wody z powietrza:* Wykonywanie zdjęć lotniczych w małej i średniej skali, a także inne metody obserwacji, również nocnej; Kontrola sytuacji hydro-meteorologicznej; obserwacja obiektów emitujących promieniowanie; Monitorowanie obszarów wokół portów morskich.
5. *Monitorowanie warunków środowiskowych:* Monitorowanie poziomów promieniowania; Kontrola emisji gazów i substancji chemicznych; Monitorowanie czujników sejsmicznych; Analiza magnetometryczna; Długookresowe monitorowanie środowiskowe wyznaczonych obszarów na życzenie klienta (z wykorzystaniem kilku UAV).
6. *Oceanologia:* Badanie warunków lodowych; Monitorowanie mórz i oceanów; poszukiwanie klastrow rybołówstwa przemysłowego itp.
7. *Wsparcie organów ścigania:* Monitorowanie nieuprawnionych działań; Monitorowanie nielegalnych transportów ludzi i ładunków w sytuacjach, w których klientami są cywilne organy ścigania.

Doświadczenia amerykańskie. Organizowane przez NASA misje bezzałogowych systemów latających realizujących zadania na morzu

Jedną z organizacji, która szczególnie często wykorzystuje bezzałogowe systemy latające w operacjach morskich, jest amerykańska Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej. NASA korzysta z nich w następujących rodzajach misji:

Obserwacje wybrzeża oceanicznego. Tego typu misje suborbitalne pomagają naukowcom w zrozumieniu zjawiska zakwitu wód przybrzeżnych oraz zachodzących w nim zmian. Dodatkowo uzyskane dane ułatwiają badanie podwodnej roślinności i raf koralowych, ocenę stanu osadów przybrzeżnych oraz obserwację, w jaki sposób składniki odżywcze są pochłaniane i uwalniane w wodach przybrzeżnych, a także wpływ tego zjawiska na obieg węgla. Zgromadzone dane pozwolą zwiększyć wiedzę na temat przybrzeżnych prądów i dynamiki wód przybrzeżnych, dzięki wykorzystaniu urządzeń o lepszej rozdzielczości pionowej i poziomej (czasowej i przestrzennej) oraz zróżnicowanych typów czujników.

Oceanografia fizyczna, meteorologia, właściwości chemiczne atmosfery. Podczas sezonowych sztormów na północnym Pacyfiku, północnym Atlantyku i Oceanie Południowym dochodzi do niewielkiej, ale intensywnej wymiany masy i energii pomiędzy powierzchnią oceanu a dolną warstwą atmosfery. Misje tego typu pozwalają naukowcom badać te wymiany w warunkach naturalnych – burzowych lub zbliżonych, a także umożliwiają zrozumienie szerszych implikacji tego zjawiska, takich jak tworzenie się termokliny i mieszanie się warstw powierzchniowych podczas silnych wiatrów.

Powstawanie, ewolucja i wejście na ląd huraganów. Celem tego typu misji jest prowadzenie obserwacji huraganów, by ułatwić prognozowanie trasy przemieszczania się huraganu i miejsca jego wejścia na ląd. W metodzie tej wykorzystuje się teledetekcję na dużej wysokości, umożliwiającą gromadzenie danych na temat opadów, chmur, wyładowań elektrycznych, mikrofizyki i pyłów. Balony meteorologiczne lub sondy spadochronowe zbierają dane (w formie czterowymiarowych kostek zmiennych termodynamicznych i wiatrów) na niższych wysokościach. Dodatkowe dane pozyskiwane są w warstwie granicznej (temperatura powierzchni morza i siła wiatru na powierzchni, zdjęcia powierzchni morza, prądy burzowe i stan powierzchni morza). Wszystkie te pomiary zwiększają możliwości modelowania huraganów, wpływając na wzrost ogólnego bezpieczeństwa.

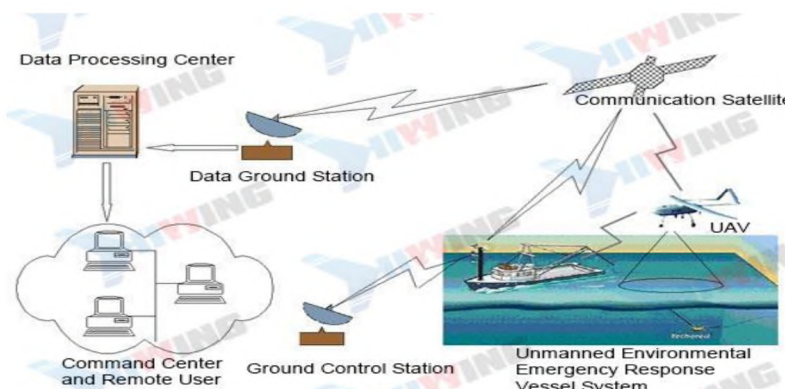
Patrole przybrzeżne. Są to misje realizowane dla amerykańskiej straży przybrzeżnej. Ich głównym celem jest obserwacja ruchu morskiego w pobliżu wybrzeży Stanów Zjednoczonych (wschodniego, zachodniego, Alaski i Hawajów). W każdym z tych regionów loty startują i lądują w jednej z trzech lokalizacji w odległości 100 mil (213 km) od brzegu. Misje obejmują swoim zasięgiem wody przybrzeżne w zakresie od 50 do 500 mil (106,5 do 1065 km) od amerykańskiej linii brzegowej [330].

Chińskie doświadczenia w rozwoju technologii bezzałogowych wykorzystywanych w misjach na morzu

Całkowita długość chińskiej linii brzegowej wynosi 32 000 km, przy czym długość wybrzeża kontynentalnego to 18 000 km, a pozostałe 14 000 km to długość linii brzegowej wysp chińskich. Do Chin należy ok. 7000 wysp (nie licząc wyspy Hajnan oraz wysp, na których położone są Tajwan, Hong Kong i Makau) o powierzchni przekraczającej 500 m². Chińska Państwowa Administracja Oceaniczna ujawniła, że jej projekt pilotażowy zdalnie sterowanego monitorowania obszarów morskich przez bezzałogowe statki powietrzne (UAV) wkroczył w swoją fazę finałową i obecnie Chiny kończą budowę sieci 11 baz UAV zlokalizowanych w 11 prowincjach nadmorskich, której celem będzie nadzorowanie ogromnych obszarów wód terytorialnych z wykorzystaniem systemów bezzałogowych.

Obecnie, chcąc w pełni zabezpieczyć swoje prawa i interesy na morzu, Chiny muszą stawić czoła wielu wyzwaniom, takim jak potencjalne konflikty związane z delimitacją obszarów morskich, zaostrzający się spór o archipelagi na Morzu Południowochińskim czy wreszcie nierozwiązane kwestie dostępu do zasobów morskich. Obecnie Chiny toczą spór z sąsiadami o możliwość eksploatacji złóż gazu i ropy naftowej, a także połowów ryb na morzach Żółtym, Wschodniocińskim, Południowochińskim oraz innych wspólnych obszarach morskich. W tym kontekście chińskie instytucje i służby przygotowują się do prowadzenia wszechstronnych badań i monitorowania

umożliwiającego dokładne zbadanie mórz, oceanów, zasobów, wysp itd., ocenę rozmieszczenia wysp należących do Chin, raf, rzek i zasobów, podstawowych warunków wylęgu, żerowania i migracji rozmaitych organizmów żywych, by w sposób naukowy wyznaczyć granice chińskich wód terytorialnych i określić proponowany udział Chin w wydobywaniu surowców morskich. Jest to warunek niezbędny dla stworzenia systemu monitorowania bezpieczeństwa i wykorzystania obszarów morskich.



Data processing Center	Centrum przetwarzania danych
Data ground station	Naziemna stacja odbioru danych
Command Center and remote user	Centrum dowodzenia i użytkownik zdalny
Ground control station	Naziemna stacja kontroli
Communication satellite	Satelita komunikacyjny
UAV	Bezzałogowy statek powietrzny (UAV)
Unmanned Environmental Emergency Response Vessel System	System bezzałogowych jednostek reagowania na zagrożenia środowiskowe

Ilustracja 4.11. Chińska platforma monitorowania i teledetekcji [331]

Nowa platforma monitorowania i teledetekcji, łącząca teledetekcję satelitarną, teledetekcję lotniczą, morskie statki patrolowe oraz inne konwencjonalne środki monitorowania z systemem monitorujących bezzałogowych statków powietrznych ma zapewnić rzeczywisty trójwymiarowy nadzór nad obszarami morskimi „z kosmosu, powietrza i wody”, a w rezultacie poprawić efektywność monitorowania i zwiększyć możliwości wykorzystania potencjału obszarów morskich przez Chiny [331].

Doświadczenie National Aviation University (Ukraina): Patrołowanie granic morskich Ukrainy przez zdalnie sterowane systemy latające (RPAS) „Ukraina”

National Aviation University od wielu lat opracowuje zasady projektowania i budowy eksperymentalnych zdalnie sterowanych systemów latających. Zintegrowane podejście do projektu obejmuje następujące elementy: określenie zasad konstrukcji bezzałogowych systemów latających na podstawie metodologii „systemu zarządzania bezpieczeństwem”, zgodnie z międzynarodowymi wymogami; opracowanie i wykorzystanie hybrydowych materiałów kompozytowych spełniających odpowiednie kryteria dotyczące wytrzymałości; rozwój nanotechnologii i wykorzystanie ich w urządzeniach pokładowych UAS oraz w urządzeniach naziemnych; projektowanie i produkcja zestawów kontrolnych wykorzystywanych w urządzeniach pokładowych i naziemnych; opracowanie rozwiązań umożliwiających automatyczne planowanie trajektorii lotu, wykorzystujących nowoczesne technologie informatyczne; opracowanie i wdrożenie metod oraz algorytmów umożliwiających automatyczne lądowanie UAV z wykorzystaniem sygnałów sieciowych wysyłanych przez orbitujące systemy satelitarne; stworzenie kanału łączności „pokład–ziemia, ziemia–pokład” transmitującego chronione dane, opracowanie systemu kontroli lotu, a także standaryzacja rekomendacji działań; projektowanie, produkcja i testowanie standardowych modeli UAS; opracowanie programów szkoleniowych dla operatorów UAS i personelu naziemnego; tworzenie dokumentacji technicznej dla celów certyfikacji RPAS; ocena efektywności wykorzystania zdalnie sterowanych systemów latających [320].

W centrum badawczo-rozwojowym „Virage”, działającym przy National Aviation University, zajmującym się projektowaniem i budową bezzałogowych systemów latających powstały następujące

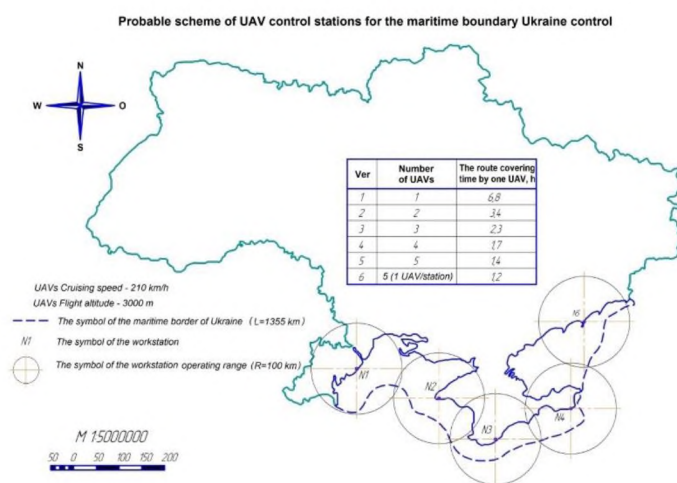
typy dronów: jednosilnikowe „Border” i M-6 „Skylark”; dwusilnikowe M-7, M-7D i M-7V5 „Sky Patrol”; a także napędzany silnikiem elektrycznym „Eye”. Wszystkie one mogą przyczynić się do rozwiązania problemu integracji i rozwoju UAV, a także innych metod poszukiwania, rozpoznania i przetwarzania danych niezależnie od działania systemów satelitarnych.

Wspólnie z naukowcami z Ningbo University of Technology prowadzimy wszechstronne prace w zakresie oceny możliwości i efektywności zdalnie sterowanych systemów latających wykorzystywanych do zadań na morzu [332].

Zdalnie sterowany system lotniczy (RPAS) „Ukraina”

Funkcja: zabezpieczenie misji dwusilnikowych systemów M-7B5 „Sky Patrol” w wyznaczonej przestrzeni powietrznej, polegającej na wykonywaniu działań lotniczych w interesie gospodarki i obrony narodowej. Obsługiwane przez czteroosobowy zespół zewnętrznych operatorów. Zestaw składa się z jednego bezzałogowego statku powietrznego UAV M-7B5 „Sky Patrol” umieszczonego na przyczepie-platformie i jednej naziemnej stacji kontrolnej (LCS-1-7V5) umieszczonej na przyczepie.

Probable scheme of UAV control stations for the maritime boundary of Ukraine	Prawdopodobny schemat rozmieszczenia stacji kontroli UAV służących monitorowaniu granicy morskiej Ukrainy
UAVs cruising speed	Prędkość przelotowa UAV
UAVs Flight altitude	Pułap lotu UAV
The symbol of the maritime border of Ukraine	Granica morska Ukrainy
The symbol of the workstation operating range	Zakres operacyjny stacji
Ver	Nr
Number of UAVs	Liczba UAV
The route covering time by one UAV (1 UAV / Station)	Czas pokonania wyznaczonej trasy przez UAV, h (1 UAV / stacja)



Ilustracja 4.12. Prawdopodobny schemat stacji kontroli UAV służących monitorowaniu granicy morskiej Ukrainy [333]

Całkowita długość ukraińskiej linii brzegowej to 1355 km. Jeśli UAV typu M-7V5 dokonuje przelotu na wysokości 3000 m, może obserwować pas o szerokości 3600 m. Jeśli pozostaje na tym pułapie przez 20% czasu lotu i pokona w tym czasie 200 km, może monitorować obszar o powierzchni 730 km². Całą trasę nad Morzem Czarnym – 1056,5 km – M-7V5 pokonuje w ciągu 5,28 h. Koszt takiego przelotu jest znacząco niższy od operacji tradycyjnych statków powietrznych, co potwierdza wysoką efektywność wykorzystania systemów bezzałogowych.

Zastosowanie RPAS w realizacji zadań na morzu wygląda bardzo obiecująco, ponieważ systemy bezzałogowe oferują możliwości porównywalne do globalnych systemów nawigacji satelitarnej, przy znacznie niższych kosztach eksploatacyjnych. National Aviation University ma rozległe doświadczenie w określaniu zasad projektowania i produkcji efektywnych zdalnie sterowanych systemów latających [333].

4.4. Modelowanie i technologie bezzałogowych systemów latających

4.4.1. Pomiar danych lotu eksperymentalnych bezzałogowych statków powietrznych i ich późniejsza analiza

Testowanie pokładowych systemów kontrolnych bezzałogowych statków powietrznych (UAV), obejmujące weryfikację parametrów systemu serwo autopilota, wymaga rejestracji wszystkich danych lotu transmitowanych do naziemnych stacji kontrolnych dwukierunkowym radiowym kanałem łączności [334, 335].

Dzięki rejestracji danych transmitowanych drogą radiową do stacji naziemnych możliwe jest odtworzenie przebiegu lotu, bez względu na stan techniczny i ewentualne uszkodzenia UAV.

Wykorzystanie dwukierunkowego kanału łączności oznacza też dodatkowe obciążenie dla systemu zasilania urządzeń pokładowych i wymaga zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) tych urządzeń.

Przy stałym poziomie mocy kanału telemetrycznego, a także przy zachowaniu innych warunków na stałym poziomie, wąskopasmowy kanał radiowy zapewnia wzmocnienie w wyniku niskiego poziomu szumu w paśmie widmowym odbiorników i mniejsze zakłócenia w działaniu innych urządzeń pokładowych.

Celem niniejszego rozdziału jest przeprowadzenie i prezentacja pomiarów danych lotu, kodowania dla celów transmisji do naziemnej stacji kontrolnej oraz późniejszego odcodowania umożliwiającego przetwarzanie i analizę.

Opis struktury i kodowania danych lotu

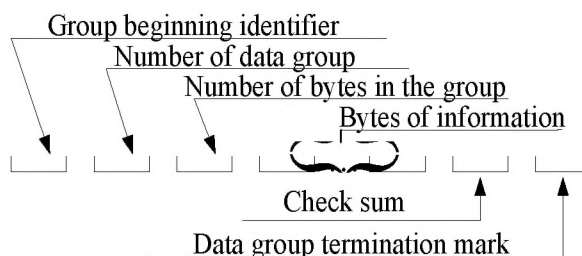
Nawiązując do wcześniejszych informacji, w analizowanym systemie prowadzimy transmisję danych w trybie wąskopasmowym – z prędkością 910 bit/s i częstotliwością odświeżania 1 Hz.

Wykorzystywany modem radiowy działający z szybkością 1200 bit/s, zapewnia wysoką czułość transmisji, na poziomie 118...–120 dBm, dzięki minimalnemu poziomowi szumu odbiornika radiowego.

Parametry transmisji danych lotu UAV zostały przedstawione w tabeli 4.14. Format kodowania wartości monitorowanych parametrów został określony na podstawie metody opisanej w publikacji [224] – każdemu z parametrów przyporządkowuje się jeden lub dwa bajty o mniej więcej stałej pozycji w transmitowanym pakiecie danych.

Dodatkowo, by zwiększyć oszczędności, takie parametry jak tryb kontroli lotu, częstotliwość odświeżania i częstotliwość wymiany danych transmitowane są w ramach jednego bajta. Z kolei by zapewnić jak największą dokładność transmisji współrzędnych (długości i szerokości geograficznej), dla każdego z nich przeznaczono 4 bajty transmisji (łącznie 8 bajtów).

Każda grupa danych przesyłana jest z osobnym nagłówkiem ułatwiającym identyfikację. Dodatkowo nagłówek pokazuje liczbę bajtów w grupie, sumę kontrolną oraz oznaczenie końca transmisji danych (ilustracja 4.13).



Group beginning identifier	Identyfikator początku grupy danych
Number of data group	Numer grupy danych
Number of bytes in the group	Liczba bajtów w grupie
Bytes of information	Bajty informacji
Check sum	Suma kontrolna
Data group termination mark	Oznaczenie końca grupy danych

Ilustracja 4.13. Rozkład bajtów w grupie danych [338]

Tabela 4.14. Skład i grupowanie parametrów transmisji [338]

Parametr	Rozmiar [bajty]	Wyjaśnienie	Uwagi
Pozycjonowanie			
Bieżące współrzędne	8	WGS	Jeden bit odpowiada 0,006 akra (ok. 25 m ²)
Bieżący kąt kursu wg GPS	2	–	Jeden bit odpowiada 0,01°
Bieżąca prędkość wg GPS	2	0 ... 120 m/s	Jeden bit odpowiada 0,1 m/s
Bieżący pułap wg GPS	2	0 ... 3000 M	–
Odchylenie azymutu	2	0 ... 1000 M	–
Błąd położenia	1	0 ... 1000 M	–
Orientacja i sterowanie			
Kąt wznoszenia	2	+ — 90°	Wartość położenia
Kąt nachylenia	2	+ — 90°	Wartość położenia
Komenda PWM dla przepustnicy	2	1000 ... 2000	Sygnal kontrolny napędu serwo
Komenda PWM dla lotek	2	1000 ... 2000	Sygnal kontrolny napędu serwo
Komenda PWM dla steru wysokości	2	1000 ... 2000	Sygnal kontrolny napędu serwo
Komenda PWM dla steru kierunku	2	1000 ... 2000	Sygnal kontrolny napędu serwo
Tryb lotu i wymiana danych			
Tryb kontroli	1	Obejmuje kilka różnych parametrów trybu kontroli lotu	–
Typ trajektorii	1		
Częstotliwość odświeżania	1	Obejmuje kilka różnych parametrów częstotliwości odświeżania danych	–
Częstotliwość odświeżania danych dotyczących położenia	1		–
Częstotliwość odświeżania łącza danych	1		–
Parametry nawigacyjne			
Bieżący docelowy kąt kursu	2	+ — 90°	–
Bieżący docelowy pułap	2	0 ... 3000 M	–
Bieżąca docelowa prędkość	2	0 ... 120 m/s	Jeden bit odpowiada 0,1 m/s
Współrzędne punktu początkowego bieżącej trajektorii	8	WGS	–
Współrzędne punktu końcowego bieżącej trajektorii	8	WGS	–
Moc i temperatura			
Napięcie akumulatora zasilającego	2	–	Jeden bit odpowiada 0,1 V
Napięcie akumulatora	1	–	

kontrolnego			
Natężenie prądu zasilającego	2	0 ... 60 A	–
Zużycie energii	2	0 ... 65 000 mAh	–
Bieżąca temperatura wewnętrzna	1	–40 ... +120° C	–

Typowe zadania systemu kontrolnego UAV podczas lotu obejmują umieszczenie statku na wyznaczonej trajektorii lotu w trybie ręcznym, przejście na tryb automatyczny w określonym punkcie i lądowanie w trybie ręcznym z wykorzystaniem stabilizatora wznoszenia i nachylenia.

Lot automatyczny przebiegał wzdłuż linii prostych łączących punkty o podanych współrzędnych [336]. Zwrot w kierunku kolejnego punktu wykonywany był w ramach podanych ograniczeń dotyczących minimalnego promienia zwrotu. Strumień danych telemetrycznych przesyłany z pokładu dzielony był w odbierającej kontrolnej stacji naziemnej na trzy obszary: obraz sztucznego horyzontu na monitorze, mapowanie parametrów w formie wykresów, rejestracja danych w pliku do dalszej analizy [335].

Narzędzie wizualizacji i przetwarzania danych lotu

Centralną jednostką programu służącą do przetwarzania i analizy danych lotu jest blok dekodujący dane zawarte w tabeli. Odkodowane dane przedstawiane są w formie wykresów parametrów w czasie. Algorytm działania narzędzia wizualizacji i obróbki danych lotu przedstawiony jest na ilustracji 4.14.

Dodatkowo możliwe jest wyświetlenie trójwymiarowych projekcji trajektorii, stworzonych z wykorzystaniem mapowania satelitarnego Google Earth, umożliwiających statystyczną obróbkę danych (określenie średniej ruchomej, zmienności czy dryfu, a także wykonanie analizy harmonicznej składników okresowych) [337].

Interfejs narzędzia (ilustracja 4.16) zapewnia możliwość łączenia wykresów dowolnych parametrów.

W tym celu należy wyświetlić okno parametrów i zaznaczyć interesujący nas okres.

Wykorzystując narzędzie analizy danych lotu do analizy i obróbki zarejestrowanych danych, należy wybrać plik zawierający mapy z siatką kartograficzną prezentujące wartości wyjściowe parametrów.

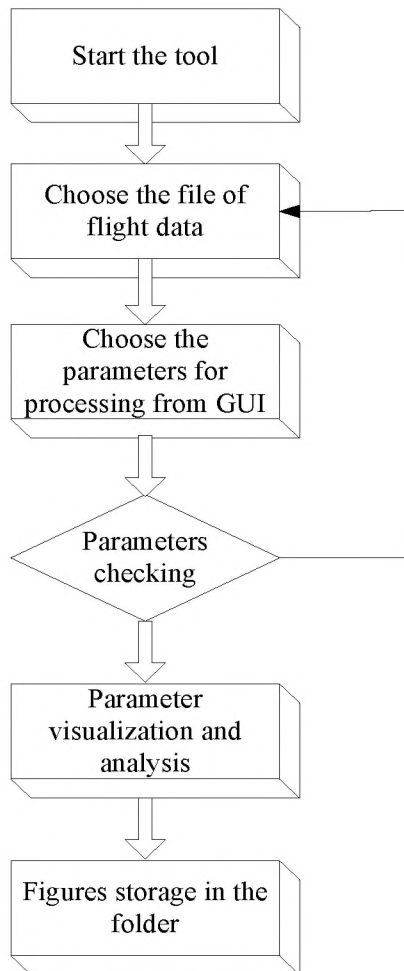
Użytkownik może interaktywnie zmieniać układ parametrów, z wykorzystaniem specjalnej etykiety pojawiającej się na wszystkich wykresach.

Ilustracje 4.16, 4.17 i 4.18 pokazują zaczerpnięte z programu przykłady wykresów odkodowanych telemetrycznych danych lotu.

Analizowany lot trwał ok. 400 s i obejmował wznoszenie w trybie ręcznym, kontrolowany automatycznie przelot po trasie „ósemki”, kontrolowany automatycznie przelot po trasie okręgu, którego środek znajdował się w tym samym punkcie co środek „ósemki”, oraz lądowanie w trybie ręcznym z użyciem stabilizatora kąta zniżania i nachylenia.

Połączenie technologii przesyłu danych z możliwością graficznej prezentacji trajektorii lotu UAV umożliwia analizę dowolnie wybranych parametrów w każdej fazie lotu statku powietrznego.

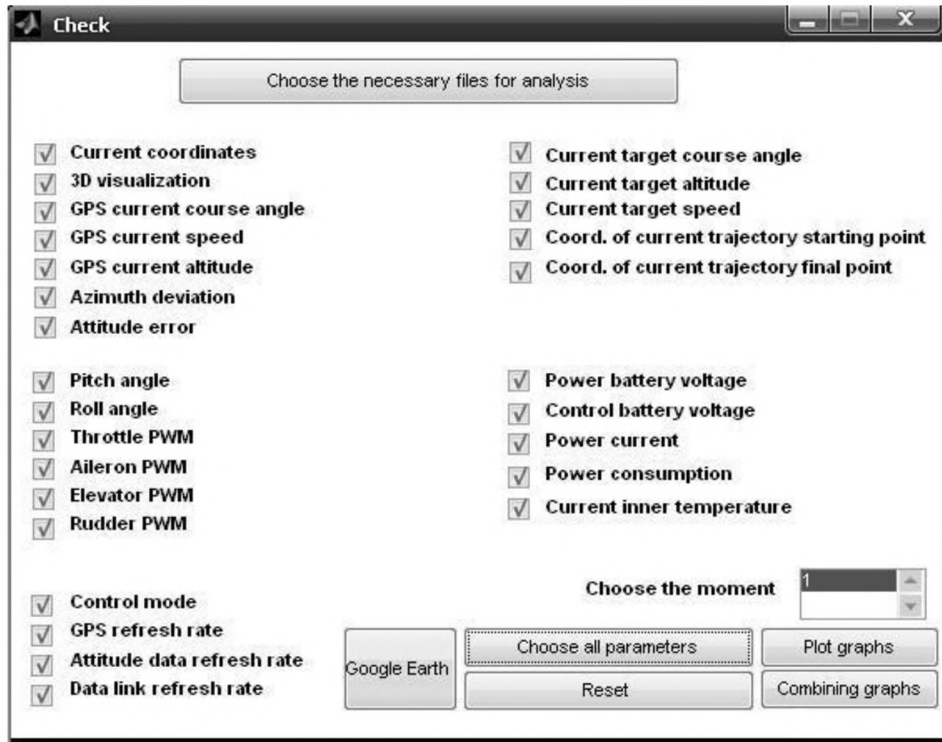
Możliwość równoczesnej obserwacji pozycji przestrzennej i kątowej statku bezzałogowego pozwala zweryfikować i skorygować wartości wskaźników systemu śledzenia UAV. Parametry lotu przesyłane były z pokładu drona do naziemnej stacji kontroli wąskopasmowym łączem radiowym z szybkością 1,2 kb/s. Stworzone narzędzie umożliwia odtworzenie parametrów lotów eksperymentalnych nawet w przypadku utraty drona, oznaczającej utratę danych zapisanych w pamięci urządzeń pokładowych. Seria pomiarów wymienionych w tabeli pozwoliła wyznaczyć zakres maksymalnych prędkości UAV, maksymalny kąt natarcia, manewrowalność oraz optymalne ustawienia automatycznego systemu kontroli. Cykl eksperymentów można przyspieszyć, rezygnując z części doświadczeń przeprowadzanych w tunelu aerodynamicznym [338].



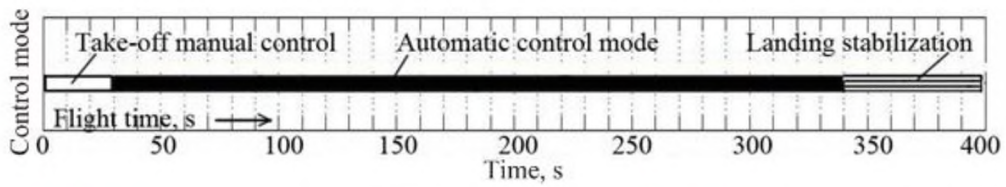
Uruchomienie narzędzia
Wybór pliku z danymi lotu
Wybór parametrów do analizy i obróbki
Weryfikacja parametrów
Wizualizacja i analiza parametrów
Rejestracja i przechowywanie danych w folderze

Ilustracja 4.14. Algorytm działania narzędzia wizualizacji i obróbki danych lotu [338]

Sprawdź			
Wybierz pliki do analizy			
Bieżące współrzędne Wizualizacja 3D Bieżący kąt kursu wg GPS Bieżąca prędkość wg GPS Bieżący pułap wg GPS Odchylenie azymutu Błąd pozycji	Bieżący docelowy kąt kursu Bieżący docelowy pułap Bieżąca docelowa prędkość Współrzędne punktu początkowego bieżącej trajektorii Współrzędne punktu końcowego bieżącej trajektorii		
Kąt wznoszenia / zniżania Kąt nachylenia PWM dla przepustnicy PWM dla lotek PWM dla steru wysokości PWM dla steru kierunku	Napięcie akumulatora zasilającego Napięcie akumulatora kontrolnego Natężenie prądu zasilającego Zużycie energii Aktualna temperatura wewnętrzna		
Tryb kontroli Częstotliwość odświeżania GPS Częstotliwość odświeżania danych dot. położenia Częstotliwość odświeżania łącza danych	Wybierz moment		
	Google Earth	Wybierz wszystkie parametry	Wykresy
		Resetuj	Łączenie wykresów

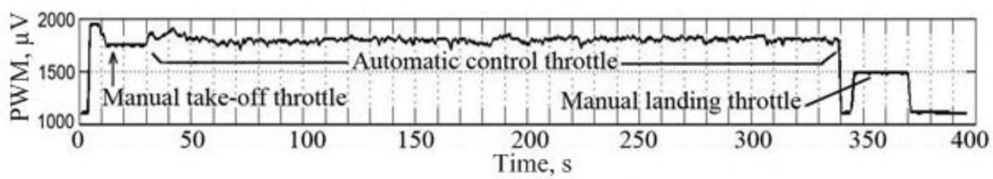


Ilustracja 4.15. Interfejs narzędzia wizualizacji i obróbki danych lotu [338]



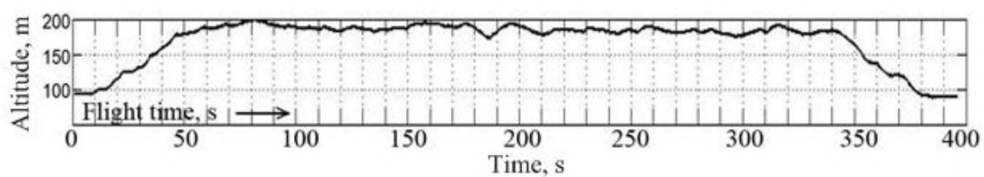
Control mode	Tryb kontroli
Take-off manual control	Tryb ręczny podczas startu
Automatic control mode	Tryb automatyczny
Landing stabilization	Stabilizacja podczas lądowania
Flight time	Czas lotu, s
Time	Czas, s

a



Manual take-off throttle	Ręczna kontrola przepustnicy podczas startu
Automatic control throttle	Automatyczne kontrola przepustnicy
Manual landing throttle	Ręczna kontrola przepustnicy podczas lądowania
Time	Czas, s

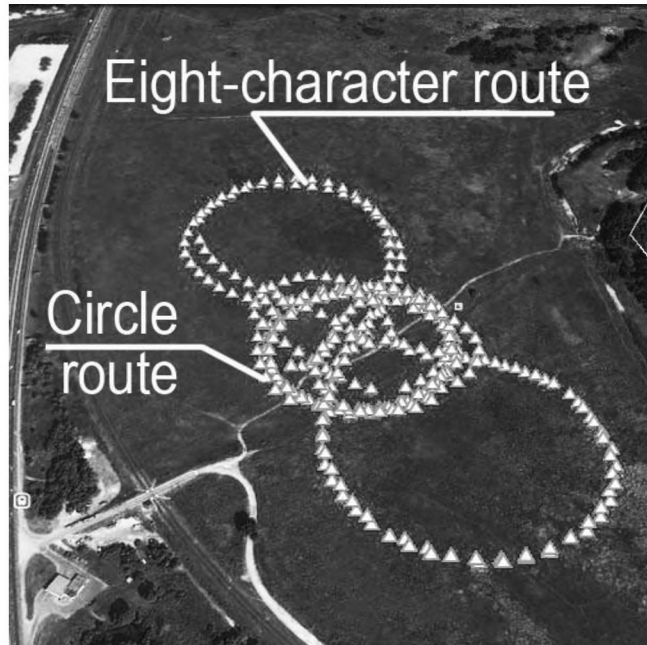
b



Altitude	Pułap, m
Flight time	Czas lotu, s
Time	Czas, s

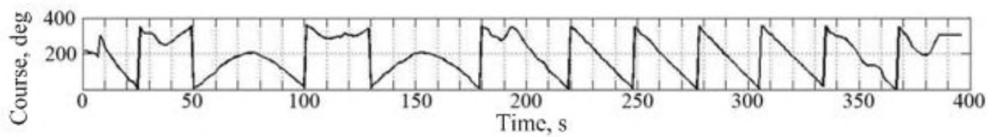
c

Ilustracja 4.16. Połączone wykresy trybu kontroli, sterowanie przepustnicą i pulapu [338]:
 a – tryb kontroli,
 b – komenda PWM dla przepustnicy,
 c – aktualny pulap wg GPS



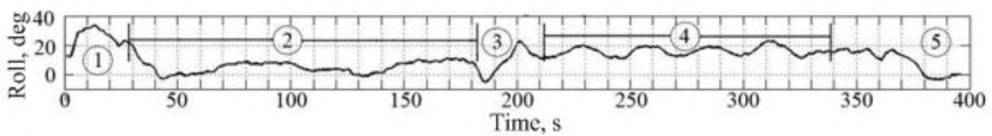
Eight-character route	Trasa w kształcie cyfry 8
Circle route	Trasa okrężna

Ilustracja 4.17. Trasy lotu przedstawione przy użyciu Google Earth [338]



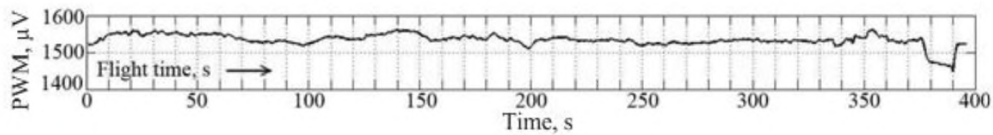
Course, deg	Kurs, °
Time, s	Czas, s

a



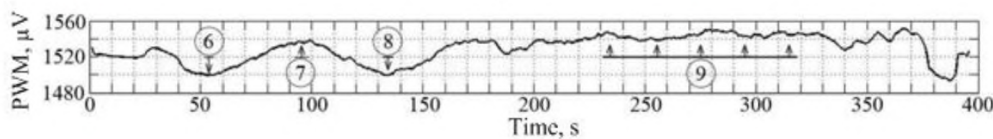
Roll, deg	Wznoszenie / zniżanie, °
Time, s	Czas, s

b



Flight time, s	Czas lotu, s
Time, s	Czas, s

c



Time, s	Czas, s
---------	---------

d

Ilustracja 4.18. Połączone wykresy kursu, wznoszenia / zniżania, pozycji lotek i steru [338]:

- a* – aktualny kąt kursu wg GPS,
- b* – kąt wznoszenia/ zniżania,
- c* – komenda PWM dla lotek,
- d* – komenda PWM dla steru,
- 1 – obszar startu w trybie ręcznym,
- 2 – dwa cykle przelotu po trasie zamkniętej „ósemki”,
- 3 – automatyczne przejście do przelotu po trasie okręgu,
- 4 – przelot po trasie okręgu, cztery cykle,
- 5 – lądowanie,
- 6, 7, 8 – położenie steru umożliwiające lot po trasie „ósemki”,
- 9 – położenie steru umożliwiające lot po trasie okręgu

4.4.2. Analiza czynników wpływających na maksymalny zasięg lotu bezałogowych statków powietrznych

Osiągnięcie maksymalnego zasięgu lotu przy ograniczonej ilości paliwa jest możliwe pod warunkiem minimalizacji jego zużycia. Z kolei zużycie paliwa zależy od takich czynników, jak charakterystyka techniczna i osiągi bezałogowego statku powietrznego oraz warunki meteorologiczne. Mówiąc o charakterystyce technicznej, mamy na myśli specyfikację, wyposażenie i rozkład wagi statku powietrznego, a także jego indywidualną konfigurację. Najważniejsze warunki meteorologiczne zaś to kierunek i siła wiatru, opady oraz temperatura.

Celem niniejszego rozdziału jest analiza czynników, które mogą wpływać na zasięg lotu drona.

Naszym zadaniem jest określenie zależności rozkładu wagi od zakresu odchylenia stabilizatorów pionowych \bar{y}_p od środka masy i płaszczyzny ogniskowej.

Dla dużych wartości odchylenia \bar{y}_p istotna może być konieczność czasowego równoważenia dodatkowego oporu, co może się przełożyć na zwiększone zużycie paliwa.

Analiza publikacji na ten temat przyniosła kilka istotnych spostrzeżeń.

Jednym z najskuteczniejszych sposobów rozwiązania tego problem jest metoda zaproponowana przez Louisa Charlesa Bregueta, który sformułował jedno z podstawowych praw lotnictwa. Słynne równanie Bregueta pokazuje, że odległość, jaką może pokonać statek powietrzny, zależy od trzech głównych czynników – osiągow silnika, cech aerodynamicznych konstrukcji oraz względnej masy paliwa (tzn. stosunku masy paliwa na pokładzie do całkowitej masy startowej urządzenia). Równanie to stosowane było do zwiększania odległości i czasu lotu poprzez zmniejszanie zużycia paliwa w trakcie lotu.

Maksymalny zasięg lotu można również osiągnąć, maksymalizując doskonałość aerodynamiczną statku powietrznego – współczynnika ilustrującego wpływ właściwości aerodynamicznych statku powietrznego na jego prędkość, jeśli oczywiście pozostałe warunki są jednakowe.

Wraz ze zwiększeniem prędkości, właściwości aerodynamiczne początkowo także wzrastają, a następnie zaczynają się pogarszać. Maksymalną wartość VK osiągamy przy optymalnej prędkości lotu. Jeśli przyjmiemy, że maksymalna wartość $VK_{\max} = 100\%$, możemy pokazać, jakie jest względne znaczenie prędkości lotu $\overline{VK} = (VK)/VK_{\max} \cdot 100\%$. W praktyce oznacza to określenie zakresu prędkości, w którym możemy utrzymać wartość $VK = 99\%$, oznaczający pogorszenie się efektywności aerodynamicznej o nie więcej niż jeden procent. Jest to najkorzystniejszy zakres prędkości, pozwalający maksymalizować zasięg lotu statku powietrznego.

Zmniejszenie zużycia paliwa i wydłużenie zarówno czasu, jak i odległości lotu można osiągnąć, wyznaczając optymalne sposoby równoważenia odchylenia urządzeń kontrolnych, zapewniające najwyższą ekonomikę lotu. Jednym z badaczy aktywnie poszukujących rozwiązania tego problemu jest Stanislaw Y. Skrypnichenko (1988) [343].

Analizując tryb lotu, wykorzystujemy równoważenie polaryzacji statku powietrznego. Rodzi to problem wyznaczenia optymalnego zakresu odchylenia kontroli lub sposobu wznoszenia, który będzie powodował najmniejszy opór. Problem ten można rozwiązać z wykorzystaniem tzw. zasady superpozycji, która mówi, że optymalne odchylenie kontroli lub sposobu wznoszenia można określić bez względu na równania ruchu punktu, na podstawie najniższych współczynników oporu i punktów

równowagi dla każdej wartości współczynnika wznoszenia. Wynikiem tych obliczeń jest optymalne równoważenie polaryzacji.

Dlatego chcąc wyznaczyć optymalne wartości kątów odchylenia elementów sterowania, należy wziąć pod uwagę płaszczyznę polaryzacji lub płaszczyznę statecznika poziomego, pod warunkiem że dla każdego współczynnika wznoszenia statku powietrznego istnieje kąt odchylenia lotek, w którym minimalna wartość współczynnika oporu wynosi C_x .

Z pewnością by osiągnąć największą ekonomikę lotu, należy utrzymać optymalną konfigurację elementów sterowania statku powietrznego, zapewniającą najniższy współczynnik oporu i umożliwiającą zachowanie równowagi statku powietrznego. Jeśli ten warunek zostanie spełniony, wówczas, po pierwsze, optymalne położenie środka masy znajduje się zazwyczaj w tylnej części statku powietrznego, a po drugie, minimalna wartość współczynnika oporu statecznika poziomego osiągnięta jest przy optymalnej wysokości koła pozycyjnego.

Właściwą ocenę poszczególnych metod poprawy ekonomiki lotu umożliwia analiza dynamiki problemów pojawiających się podczas lotu. Znając rozwiązania analityczne, możemy łatwiej zbadać wpływ zmian głównych parametrów statku powietrznego i silnika, a także zmian warunków zewnętrznych na charakterystykę lotu statku powietrznego.

Zmiany te mogą wpływać na odchylenia masy statku powietrznego lub na realizację hipotezy Ciołkowskiego dotyczącej stałej prędkości względnej gazów wylotowych. Dzięki stosunkowo dużej liczbie opartych na mechanice nieliniowej zbadanych metod optymalizacji dostępnych funkcji możemy sformułować następujące, w pełni empiryczne twierdzenie: jeśli układ nieliniowych równań mechanicznych nie zawiera funkcji dowolnych, do jednej z metod należy wprowadzić określone funkcje, obejmujące fizyczne cechy aspektu problemu. Oczywiście wprowadzenie nowych funkcji zazwyczaj powoduje zwiększenie złożoności układu, jednak możliwość wykorzystania układu zamkniętego działającego w warunkach optymalnych to dobry sposób na uzyskanie rozwiązań analitycznych.

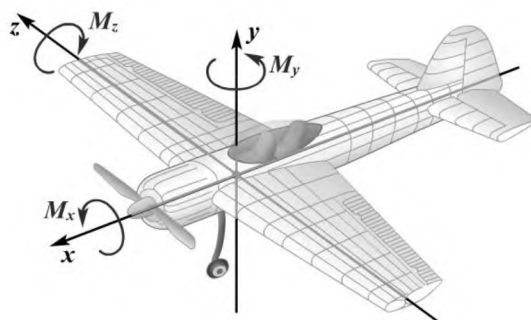
Analizując dynamikę problemów związanych z trajektorią lotu, zakładamy zazwyczaj, że wszystkie siły oddziałujące na statek powietrzny są przyłożone do jego środka masy. Pozwala nam to obliczyć główne parametry lotu, ale nie umożliwia określenia wszystkich warunków lotu, które należy brać pod uwagę, by ocenić aktualny stan lotu.

By to osiągnąć, musimy wziąć pod uwagę również momenty obrotowe M_x , M_y , M_z , oddziałujące na statek powietrzny podczas lotu, oraz wpływ, jaki wywiera na niego ruch obrotowy samolotu (ilustracja 4.19).

Wartości momentów aerodynamicznych obliczamy za pomocą wzorów podobnych do wzorów na siły aerodynamiczne (Lebedev, Chernobrovkin 1962) [340]:

$$M_x = m_x \frac{\rho v^2}{2} S l; \quad (4.2.1)$$

$$M_y = m_y \frac{\rho v^2}{2} S l; \quad (4.2.2)$$



Ilustracja 4.19. Momenty: przechyłu (roll) M_x , odchylenia (yaw) M_y i pochylenia (pitch) M_z

$$M_z = m_z \frac{\rho v^2}{2} S l, \quad (4.2.3)$$

gdzie:

m_x, m_y, m_z – to odpowiednio współczynniki momentów przechyłu, odchylenia i pochylenia;

ρ – to gęstość powietrza;

v – to prędkość niezakłóconego przepływu;

S – to powierzchnia skrzydeł;

l – to rozpiętość skrzydeł.

W przypadku współczynników siły nośnej i oporu ich wartości zależą od charakterystyki geometrycznej statku powietrznego, jego konfiguracji, odchylenia steru, kątów natarcia i ześlizgu, a także aerodynamicznych kryteriów podobieństwa. Dodatkowo, jak pokazują powyższe wielkości, momenty aerodynamiczne zależą od gęstości powietrza, prędkości lotu, powierzchni i charakterystyki geometrycznej skrzydeł.

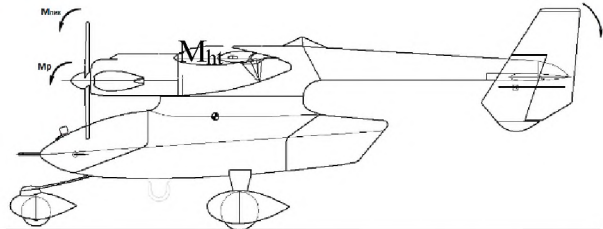
W odróżnieniu od samych momentów, współczynniki momentów obrotowych są bezwymiarowe i nie zależą od gęstości powietrza, prędkości lotu ani geometrii skrzydeł. Dlatego w obliczeniach znacznie wygodniej jest korzystać ze współczynników momentu obrotowego, a wartość momentów dla nich można zawsze wyznaczyć ze wzorów (4.4.2.1), (4.4.2.2) i (4.4.2.3).

W niniejszym rozdziale analizujemy przypadek symetrycznego przepływu wokół statku powietrznego, którego M_x i M_y są stałe. W tej sytuacji widoczne będzie tylko oddziaływanie spowodowane zmianami M_z .

Siła nośna skrzydeł y_w wytwarza moment pochylenia dziobu w dół M_{zw} . Nośność statecznika poziomego y_{ht} wyrównuje lot i wytwarza moment pochylenia M_{zht} . W niektórych przypadkach, kiedy wektor siły ciągu silnika przyłożony jest w odległości \bar{y}_p powyżej lub poniżej środka masy, siła ciągu generuje moment M_{zp} . Oddziaływanie tej siły, w zależności od tego, czy wektor przyłożony jest powyżej, czy poniżej środka masy, może być, odpowiednio pozytywne lub negatywne (ilustracja 4.20).

M_{div}

M_p



Ilustracja 4.20. Moment oddziałujący na statek powietrzny w przypadku symetrycznego przepływu [344]

Jest to jedna z indywidualnych cech charakterystycznych każdego statku powietrznego. Przyjrzyjmy się tej kwestii nieco dokładniej.

Zależność momentu wzdłużnego śmigłowego statku powietrznego wyrażona jest wzorem (Skripnichenko 1981, 1988) [343]:

$$M_z = M_{zw} + M_{zht} + M_{zp} \quad (4.4.2.4)$$

Ponieważ zazwyczaj wykorzystujemy nie sam moment pochylenia M_z , lecz jego bezwymiarowy współczynnik m_z , zatem dzieląc obie strony wzoru (4.4.2.4) przez wynik ciśnienia dynamicznego i powierzchni skrzydeł $\frac{\rho v^2}{2} S b_a$, otrzymujemy wzór na współczynnik momentu pochylenia:

$$m_z = m_{zw} + m_{zht} + m_{zp}.$$

Współczynniki momentów wzdłużnych oraz siłę ciągu samolotu śmigłowego ze statecznikiem poziomym możemy wyznaczyć z poniższych wzorów:

$$\begin{aligned}
m_{zw} &= m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F)C_y; \\
m_{zht} &= m_{zht}^\varphi \varphi; \\
m_{zp} &= -C_x \bar{y}_p + 0.05 \frac{x_v i D^2}{S b_a} C_y.
\end{aligned}
\tag{4.4.2.5}$$

Ze wzoru (4.4.2.5) możemy wyciągnąć pierwsze wnioski dotyczące wpływu wartości \bar{y}_p na przebieg lotu, wskazujące, że im większa jest wartość \bar{y}_p , tym większy jest moment i siła ciągu silnika.

Zbadajmy tę kwestię dokładniej. Ponieważ w przypadku zrównoważonego lotu $m_z = 0$, zatem:

$$m_z = m_{zw} + m_{zht} + m_{zp} = 0.$$

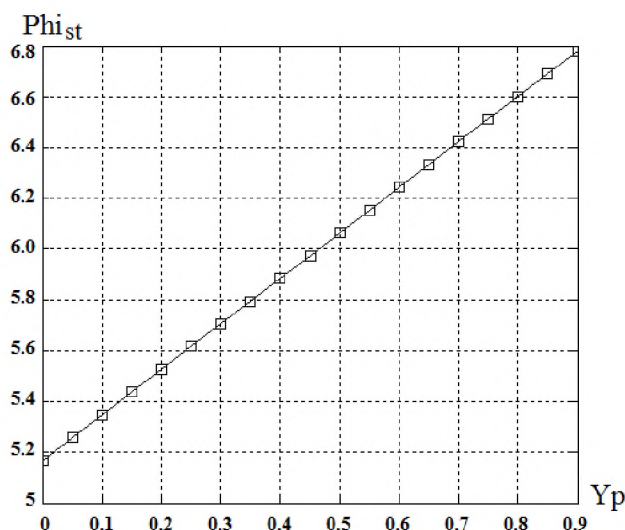
Stąd możemy wyciągnąć równanie:

$$\begin{aligned}
m_{zht}^\varphi \varphi &= m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F - \\
&- 0.05 \frac{x_v i D^2}{S b_a}) C_y - C_x \bar{y}_p.
\end{aligned}
\tag{4.4.2.6}$$

I wyliczyć równoważący kąt odchylenia stabilizatora:

$$\varphi = \frac{m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F - 0.05 \frac{x_v i D^2}{S b_a}) C_y - C_x \bar{y}_p}{m_{zht}^\varphi}.
\tag{4.4.2.7}$$

Z równań (4.4.2.5), (4.4.2.6) i (4.4.2.7) wynika, że długość odcinka \bar{y}_p ma znaczący wpływ na równoważące momenty pochylenia, a także na równoważenie odchylen elementów regulujących, w celu zapewnienia maksymalnej równowagi lotu (ilustracja 4.21).



Ilustracja 4.21. Zależność kąta odchylenia stabilizatora od odległości pomiędzy środkiem masy statku powietrznego i punktem przyłożenia wektora siły ciągu [344]

W większości przypadków podczas lotu poziomego statek powietrzny musi być równoważony nie tylko wzdłużnie – za pomocą stabilizatora i steru wysokości – ale również poprzecznie. Konieczność równoważenia poprzecznego wynika zazwyczaj z cech charakterystycznych konstrukcji statku powietrznego, nierównomiernego rozłożenia paliwa w zbiornikach lub asymetrii siły ciągu silnika. Należy przy tym pamiętać, że podczas równoważenia poprzecznego wzrasta opór statku powietrznego, co powoduje zwiększone zużycie paliwa.

Współczynnik siły nośnej zrównoważonego statku powietrznego wyznaczamy ze wzoru:

$$C_{y_{bal}} = C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) \pm \Delta C_{y_{ht}}.$$

Współczynnik dodatkowej siły nośnej generowanej przez powierzchnię statecznika poziomego możemy wyrazić jako:

$$\Delta C_{y_{ht}} = C_y^{\varphi_{st}} \varphi_{st} + C_y^{\delta_e} \delta_e,$$

gdzie φ_{st} to kąt stabilizatora,

a δ_e to równoważenie kąta odchylenia steru wysokości.

Wartość równoważenia steru wysokości możemy wyznaczyć również ze wzoru na moment aerodynamicznego pochylenia służącego zrównoważeniu statku powietrznego:

$$\begin{aligned} m_z = m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F) C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) + m_{zht} = \\ m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F) C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) + \\ + C_y^{\varphi_{st}} \varphi_{st} \bar{L}_{st} + C_y^{\delta_e} \delta_e \bar{L}_{\delta_e}, \end{aligned} \quad (4.4.2.8)$$

gdzie \bar{L}_{st} i \bar{L}_{δ_e} to ramiona względne przyłożenia siły nośnej stabilizatora i steru wysokości:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{st} &= \frac{L_{st}}{b_a}; \\ \bar{L}_{\delta_e} &= \frac{L_{\delta_e}}{b_a}. \end{aligned}$$

Wyrównanie równania (8) do zera (lot zrównoważony) możemy wyrazić jako (Udartsev i in. 1998) [342]:

$$\delta_e = - \frac{m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F) C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) + C_y^{\varphi_{st}} \varphi_{st} \bar{L}_{st}}{C_y^{\delta_e} \bar{L}_{\delta_e}}.$$

Stąd wartość współczynnika zrównoważenia siły nośnej możemy zapisać jako:

$$\begin{aligned} C_{y_{bal}} = C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) = C_y^{\varphi_{st}} \varphi_{st} - \\ - \frac{m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F) C_y^\alpha (\alpha - \alpha_0) + C_y^{\varphi_{st}} \varphi_{st} \bar{L}_{st}}{\bar{L}_{\delta_e}}. \end{aligned}$$

Dodatkowy opór równoważenia jest sumą oporu profilowego, indukowanego oraz dodatkowego oporu czołowego:

$$C_{x_{bal}} = \Delta C_{x_i} + \Delta C_{x_{ht}} + \Delta C_{x_a} + \Delta C_{x_{vt}}.$$

Dodatkowy opór równoważenia wynikający z odchylenia steru wysokości to:

$$\Delta C_{x_i} = C_y^{\delta_e} \delta_e a_{bal} = \frac{m_{z0} - (\bar{x}_T - \bar{x}_F) C_y^\alpha \alpha_{bal}^2}{\bar{L}_{\delta_e}}.$$

Dodatkowy opór równoważenia wynikający z odchylenia stabilizatora poziomego można wyliczyć ze wzoru:

$$\Delta C_{x_{ht}} = k_{ht} C_{y_{ht}}^a \frac{2 (a_{ht} + n_e \delta_e)^2}{\pi \lambda_{htef}}.$$

Dodatkowy opór równoważenia lotki i steru kierunku statecznika pionowego można wyliczyć, wykorzystując wzory: $\Delta C_{x_a} = 0.5 \delta_a S_a (C_y^a)^2 (a_{bal} \frac{\delta_a S_a}{S_{ua}})^2 \frac{1}{\pi \lambda_{htw}}$;

$$a_{bal} = \frac{C_y}{C_y^a} - a_0 + \Delta a_0.$$

Opór równoważenia klap zależy od odchylenia przełącznika wartości granicznych klap od pozycji zerowej. Zmiana kąta natarcia przy odchyleniu przełącznika wartości granicznej klap o wartości h jest równa:

$$\Delta\alpha_0 = 0.55\bar{h},$$

gdzie

$$\bar{h} = \frac{h}{b_{flaps}};$$

$$\Delta C_{xvt} = k_{vt}(C_{zvt}^\beta)^2 \frac{(a_{ht} + n_r \delta_r)^2}{\pi \lambda_{vt ef}};$$

$$C_{zvt}^\beta = -1.26(1 + 0.5\lambda_{vt})(1 + 0.27M^2) \cos \chi_{vt}.$$

Wartość efektywnego wydłużenia możemy wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$\lambda_{vt vt ef} = \lambda_{vt vt} \frac{K_\chi}{1 + \frac{S_i}{S_{vt vt}}},$$

gdzie $K_\chi \approx 0.9$ – współczynnik uwzględniający skos powierzchni sztywnej płata,

a S_i to powierzchnia odpowiadającego mu koła.

Ocena aerodynamiczna uwzględnia również dodatkowe rodzaje oporu wynikające z równoważenia statku powietrznego, powodujące wzrost zużycia paliwa podczas lotu poziomego, a tym samym zmniejszenie całkowitego zasięgu lotu.

Obliczenie wartości równoważenia C_x i C_y pozwala oszacować również efektywność aerodynamiczną, ze stratą równoważoną według wzoru:

$$K_{bal} = \frac{C_{y bal}}{C_{x bal}}.$$

By zweryfikować wpływ cech aerodynamicznych, a także przeanalizować i zrównoważyć wpływ odchylenia na zasięg lotu, warto wykorzystać poniższy algorytm obliczania zasięgu (Andreevsky, Derkach 1987) [339].

Na początek należy obliczyć zużycie paliwa na kilometr:

$$q_{km} = \frac{q_t}{V} = \frac{C_e PV}{V} = \frac{C_e mg}{K},$$

gdzie q_{km} to zużycie paliwa na kilometr – ilość paliwa zużywana przez jeden silnik na kilometr lotu;

q_t to zużycie paliwa na godzinę – ilość paliwa zużywana przez jeden silnik statku powietrznego na godzinę lotu,

V to prędkość lotu,

C_e to zużycie paliwa w kilogramach na kilowatogodzinę,

a K to współczynnik właściwości aerodynamicznych.

Znając zużycie paliwa na kilometr lotu, możemy obliczyć jego zasięg:

$$L = \int_{m_0}^{m_1} \frac{dm}{q_{km}} = \int_{m_0}^{m_1} \frac{dmK}{C_e mg}.$$

Ponieważ $\frac{K}{C_e g} = \text{const}$ przez cały lot, możemy ją wyciągnąć spod znaku całki i otrzymujemy:

$$L = \frac{dmK}{C_e g} \ln \frac{m_0}{m_1}.$$

Po przeanalizowaniu całej kwestii możemy wciągnąć wniosek, że odchylenie elementów sterujących UAV ma bezpośredni wpływ na zużycie paliwa, a im większe jest to odchylenie, tym krótszy dystans może pokonać statek powietrzny.

Rezultaty naszych badań mogą być przydatne zarówno w procesie projektowania statków powietrznych, jak i podczas optymalizacji lotów oraz wykonywania obliczeń nawigacyjnych [344].

4.4.3. Minimalizacja odchylen trajektorii lotu bezzałogowych statków powietrznych podczas przelotu nad przeszkodami lotniczymi

Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych (UAV) stale się zwiększa. Wiele z tych maszyn potrafi samodzielnie planować swoją trajektorię lotu pomiędzy wyznaczonymi miejscami, a także unikać przeszkód znajdujących się na trasie tego lotu.

Kolejnym krokiem w rozwoju tej technologii jest wyprowadzenie systemów bezzałogowych poza obszary zastrzeżone i wprowadzenie ich do ogólnej przestrzeni powietrznej. Dlatego UAV muszą być przystosowane nie tylko do unikania stałych przeszkód lotniczych, ale także do przelotu przez rejony, w których znajdują się przeszkody ruchome.

Zmiana planowania w sposób umożliwiający unikanie ruchomych przeszkód lotniczych oznacza zmianę natury problemu – ze statycznego (zakaz wlotu do określonych stref zastrzeżonych) na dynamiczny (zakaz wlotu do stref zastrzeżonych w określonym czasie, z uwzględnieniem możliwości zmiany miejsca położenia w czasie).

Jeśli chodzi o możliwość wykrywania sytuacji konfliktowych, jednym z rozwiązań, które można wykorzystać do ich przewidywania, jest model umożliwiający symulację projektowania przyszłych zagrożeń na podstawie stanu bieżącego. Trzy najczęściej stosowane metody ekstrapolacji stanu bieżącego to metoda nominalna, metoda najgorszego scenariusza oraz metoda probabilistyczna.

Do unikania kolizji bezzałogowych statków powietrznych wykorzystuje się również inne metody, np.:

- metody oparte na informacji o stanie przestrzeni (w płaszczyźnie poziomej, pionowej, trójwymiarowej);
- progi wykrywania sytuacji konfliktowych;
- metody rozwiązywania konfliktów (zalecane, optymalizowane, metoda pola siły [345] lub ręczne rozwiązywanie konfliktów);
- manewrowanie (zmiany prędkości, manewry w poziomie i pionie lub manewry łączone);
- zarządzanie zwiłokrotnionymi konfliktami w powietrzu (zagrożenia podwójne lub wielokrotne).

Dodatkowo w zakresie metod unikania kolizji przez UAV należy brać pod uwagę specyfikę sytuacji bieżącej oraz wskaźników stosowanych w procesie wykrywania i unikania konfliktów, sposoby zarządzania niepewnością w modelu oraz stopień koordynacji działań statków powietrznych ujętych w modelu.

Żadna z tych metod jednak nie bierze pod uwagę dokładnych kształtów przeszkód, które przedstawione są zazwyczaj w formie figur geometrycznych, np. kół lub elips.

Celem niniejszego rozdziału jest opracowanie metod wyboru trajektorii lotu z zachowaniem minimalnych odchylen niezbędnych do uniknięcia kolizji z przeszkodami o skomplikowanej formie.

Jednym z typów metod unikania kolizji bezzałogowych statków powietrznych z przeszkodami są metody probabilistyczne oparte na zmianach kierunku lotu i szybkości zwrotów statku powietrznego. Pozwalają one wyznaczyć kilka trajektorii lotu UAV, umożliwiających szybką zmianę położenia w przypadku pojawienia się potencjalnej sytuacji konfliktowej.

Model ruchu UAV

Istnieje wiele modeli ruchu bezzałogowych statków powietrznych. Są one wykorzystywane w różnych zadaniach obejmujących symulację trajektorii lotu UAV. Wybór modelu zależy również od typu UAV i jego cech szczególnych. Każdy z tych modeli możemy scharakteryzować za pomocą minimalnych i maksymalnych dopuszczalnych wartości parametrów. By rozwiązać zadanie

nawigacyjne polegające na wyznaczeniu minimalnych odchyień od planowanej trajektorii lotu, można zastosować model uproszczony, który opisujemy następującym wzorem:

$$X_i = X_{i-1} + \begin{pmatrix} V \sin(\psi) \\ V \cos(\psi) \end{pmatrix},$$

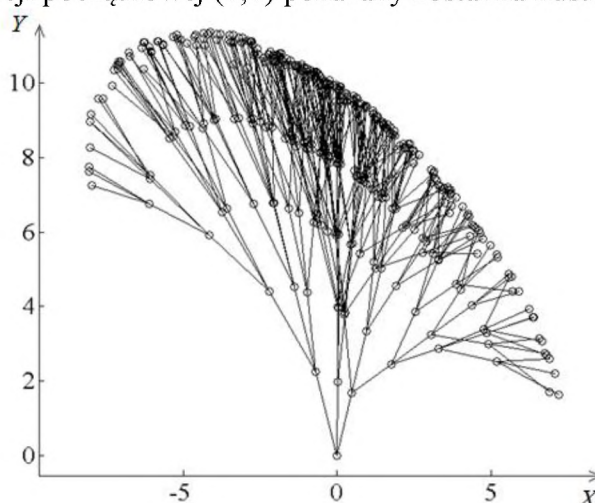
gdzie X_i to współrzędne lokalizacji w momencie i ,
 V to prędkość UAV,
a Ψ to kierunek UAV.

Należy przy tym wziąć pod uwagę, że

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max},$$

$$\Psi_{\min} \leq \Psi \leq \Psi_{\max}.$$

W każdym momencie możemy określić pozycję UAV na podstawie zmian jego prędkości i kierunku lotu [347]. Trajektorie lotu UAV możliwe w przypadku losowych zmian prędkości i kierunku w każdym momencie w czasie możemy przedstawić w formie drzewa. Przykład takiego drzewa dla modelu lotu o pozycji początkowej (0,0) pokazany został na ilustracji 4.22.



Ilustracja 4.22. Możliwe przebiegi trajektorii lotu UAV w przypadku automatycznego unikania kolizji [348]

Wskazówki dotyczące zapobiegania kolizjom

Podstawowym elementem zadań związanych z modelowaniem i analizą trajektorii lotu UAV jest określenie współrzędnych punktu początkowego oraz punktu docelowego misji statku powietrznego. Współrzędne punktu początkowego można wyznaczyć za pomocą systemów nawigacyjnych – satelitarnych lub wewnętrznych (inercyjne systemy nawigacyjne, dostosowane do lokalnych układów współrzędnych). Współrzędne punktu docelowego określamy na podstawie celu misji. Współrzędne obu pozycji możemy przedstawić w formie macierzy:

$$XL = \begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \end{pmatrix},$$

$$YL = \begin{pmatrix} y_{01} \\ y_{02} \end{pmatrix},$$

gdzie x_{01}, y_{01} to współrzędne pozycji początkowej,

a x_{02}, y_{02} to współrzędne punktu docelowego.

Po uzyskaniu tych danych możliwe jest wyznaczenie trajektorii lotu UAV, którą możemy opisać za pomocą równania:

$$Ax + By + C = 0,$$

gdzie A, B, C to współczynniki liniowe wyznaczone w następujący sposób:

$$A = \frac{1}{x_{02} - x_{01}},$$

$$B = \frac{-1}{y_{02} - y_{01}},$$

$$C = -Ax_{01} - By_{01}.$$

Bezpieczeństwo lotnictwa wymaga jednak wykrycia i uwzględnienia przeszkód lotniczych, jakie mogą występować na planowanej trasie lotu.

Położenie przeszkód możemy określić za pomocą wiersza wektora górnych współrzędnych

$$XO = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$YO = (y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Jeśli planowana trajektoria przecina obszar przeszkody lub styka się z nim, konieczne jest wprowadzenie takich zmian, by umożliwić przelot nad tym obszarem (przeszkodą), przy minimalnym odchyleniu od pierwotnej trajektorii, z uwzględnieniem właściwości aerodynamicznych UAV.

Tworząc nową trajektorię, należy wyznaczyć maksymalne współrzędne najwyższych punktów przeszkody w miejscach wlotu i wylotu z obszaru przeszkody.

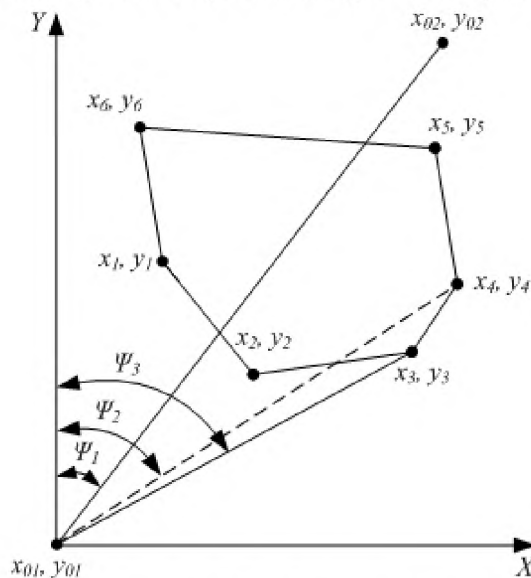
By wykonać to działanie, konieczne jest stworzenie macierzy odległości pomiędzy najwyższymi punktami przeszkody i linią trajektorii lotu (ilustracja 4.23):

$$d = \frac{A \cdot XO + B \cdot YO + C}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

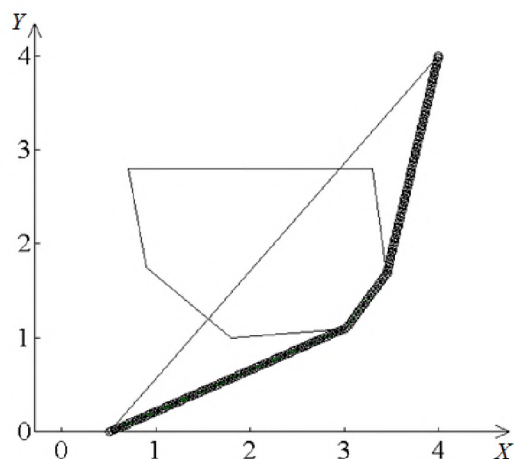
Znak d wskazuje położenie najwyższych punktów w odniesieniu do linii trajektorii.

W ten sposób możemy określić, po której stronie linii znajdują się najwyższe punkty przeszkody.

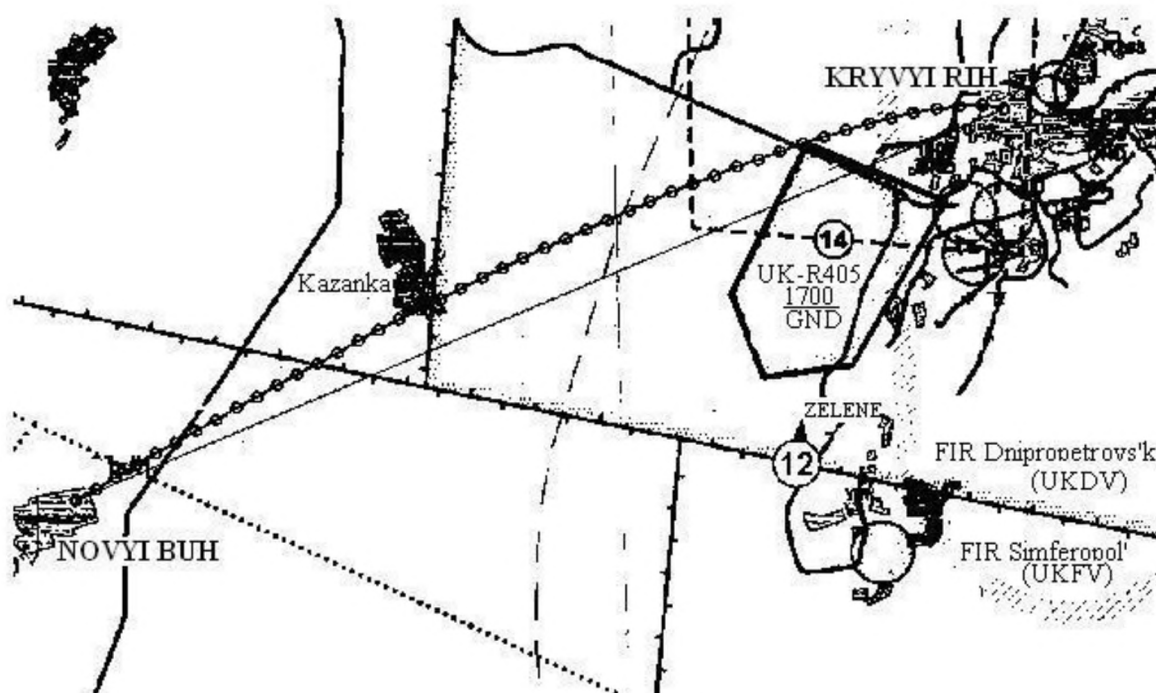
Opracowując nową trajektorię, musimy również wybrać kierunek przelotu ponad przeszkodą. Wybór zależy będzie od zakresu odchylenia od pierwotnie planowanej trajektorii.



Ilustracja 4.23. Zasada tworzenia trajektorii przelotu nad przeszkodą [348]



Ilustracja 4.24. Uzyskana trajektoria przelotu nad przeszkodą o skomplikowanej formie [348]



Ilustracja 4.25. Przelot nad strefą zastrzeżoną na mapie lotniczej [348]

Należy zatem wyznaczyć maksymalne odchylenia po obu stronach linii trajektorii, a następnie wybrać ich minimum:

$$d_{\min} = \min \left(\left(\begin{array}{c} \max(d) \\ \min(d) \end{array} \right) \right)$$

Wykorzystując d_{\min} , można określić współrzędne punktu średniego odchylenia.

Kolejnym krokiem jest zmiana kierunku planowanej trajektorii uwzględniająca położenie najwyższego punktu przeszkody. Jednak ponieważ napotkana przeszkoda ma skomplikowaną formę, może się zdarzyć tak, że również nowa, zmieniona trajektoria może przecinać jej obszar.

Wówczas należy powtórzyć wcześniejszą procedurę, tym razem biorąc za dane wejściowe aktualne położenie oraz zmodyfikowaną trajektorię lotu i odnosząc je do potencjalnych punktów przecięcia z obszarem przeszkody / kolizji z przeszkodą (ilustracja 4.23).

W przypadku wykrycia najwyższych punktów przeszkody ze znakiem dodatnim, należy wprowadzić kolejne modyfikacje trajektorii.

Pierwszą z nich będzie wyznaczenie pierwszego punktu przelotu nad przeszkodą, określającego zmianę kierunku lotu, zgodnie ze wzorem:

$$\psi_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{-A_i}{B_i}\right),$$

gdzie A_i i B_i to współczynniki liniowe łączące UAV z punktem przelotu nad przeszkodą. Procedurę wyboru kierunku lotu pokazuje ilustracja 4.23.

Trajektoria przelotu nad przeszkodą uzyskana w wyniku wykonania tej procedury dla każdego punktu lotu przedstawiona została na ilustracji 4.24. Modelowanie tego typu można zastosować dla map lotniczych zawierających strefy zakazane (prohibited, P), niebezpieczne (dangerous, D) oraz zastrzeżone (restricted, R).

Modelowanie przelotu nad strefą zastrzeżoną znajdującą się na mapie lotniczej Ukrainy pokazuje ilustracja 4.25. Pozycją początkową w tym przypadku jest Novyi Buh, a punktem docelowym Kryvyi Rih. Przeszkodą na planowanej trasie jest strefa zastrzeżona o numerze UK-R405.

Bezzałogowe statki powietrzne mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w lotnictwie cywilnym, ale również w innych działaniach. W związku z tym należy zapewnić pełne bezpieczeństwo (omijanie wszelkich zakazanych, niebezpiecznych i zastrzeżonych stref) i prędkość lotu UAV, przy zachowaniu minimalnego zużycia zasobów.

Dlatego dziś wybór tras lotu o minimalnym odchyleniu od optymalnej trajektorii, umożliwiających przelot nad skomplikowanymi przeszkodami lotniczymi stanowi jedno z najważniejszych wyzwań sterowania ruchem statków bezzałogowych [348].

4.4.4. Wykorzystanie cyfrowych modeli terenu do zapobiegania kolizjom bezzałogowych statków powietrznych

Rynek usług bezzałogowych statków powietrznych (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) rozwija się bardzo dynamicznie. Ich powszechne zastosowanie uznaje się za kolejny wielki krok w ogólnym rozwoju lotnictwa cywilnego. W porównaniu z załogowymi odpowiednikami największymi zaletami UAV są niewielka waga i wielkość, niższe koszty operacyjne, dobre maskowanie, duża wytrzymałość i elastyczność. Wszystkie te cechy sprawiają, że UAV są znakomitym narzędziem realizacji monotonnych, brudnych i niebezpiecznych zadań.

Tego typu statki powietrzne mogą samodzielnie planować trajektorię lotu pomiędzy wyznaczonymi punktami, omijając występujące na trasie przeszkody.

Wiele badań naukowych poświęcono również opracowaniu skutecznej metody zapobiegania kolizjom bezzałogowych statków powietrznych (Gardiner, Waseem 2011 [350]; Loe 2007 [352]; Han, Bang 2004 [346]; Liao 2012 [351]; Kharchenko, Kuzmenko 2012 [348]). Jednak we wszystkich tych metodach brak pełnych informacji na temat samych przeszkód, które zazwyczaj przedstawiane są w formie figur geometrycznych. Dlatego żadna z tych metod nie pozwala określić precyzyjnie kształtu i położenia przeszkody, co sprawia, że są one w niewielkim stopniu przydatne w warunkach rzeczywistych.

Analiza dostępnych źródeł wskazuje na potrzebę opracowania skuteczniejszej metody zapobiegania kolizjom UAV, wykorzystującej dokładne dane na temat środowiska lotu.

Jednym ze sposobów na dostarczenie potrzebnych informacji, stanowiących kluczowy element zachowania bezpieczeństwa lotnictwa, jest wykorzystanie cyfrowych modeli ukształtowania terenu (Digital Elevation Models, DEM; Digital Terrain Models, DTM; Digital Surface Models, DSM).

Celem niniejszego rozdziału jest analiza istniejących internetowych źródeł cyfrowych modeli terenu (DEM) i opracowanie geometrycznej metody zapobiegania kolizjom UAV w płaszczyźnie pionowej, wykorzystującej te modele.

Cyfrowy model terenu to cyfrowa prezentacja obszaru powierzchni ziemi, księżycy lub asteroidy w formacie 3D, stworzona na podstawie zgromadzonych danych na temat ukształtowania danego terenu.

Jednym z rodzajów takiego modelu jest cyfrowy model powierzchni (Digital Surface Model, DSM) przedstawiający także wszystkie obiekty na modelowanym obszarze.

W odróżnieniu od DSM cyfrowy model ukształtowania terenu przedstawia tylko powierzchnię ziemi, bez znajdujących się na niej obiektów, takich jak drzewa lub budynki.

Termin „cyfrowy model terenu” (DEM) to określenie najbardziej ogólne, oznaczające zazwyczaj model będący reprezentacją wysokości topograficznej danego terenu, bez dokładnego opisu jego powierzchni.

Do stworzenia DEM możemy wykorzystać następujące techniki:

- LIDAR;
- Stereofotogrametria na podstawie pomiarów lotniczych;
- Dopasowanie blokowe obrazów satelitarnych;
- Interferometria danych z radarów;
- Globalne systemy pozycjonowania kinematycznego w czasie rzeczywistym;
- Mapy topograficzne;
- Radar Dopplera;
- Fotografia zmiennoogniskowa;
- Badania inercyjne;
- Drony geodezyjne i kartograficzne.

Najważniejsze zastosowania DEM obejmują:

- Określanie parametrów terenu;
- Tworzenie map przestrzennych;
- Tworzenie wizualizacji 3D;
- Przygotowanie planów lotów w formacie 3D;
- Tworzenie modeli fizycznych;
- Geograficzne systemy informacyjne (GIS);
- Projektowanie i budowa infrastruktury;
- Globalne systemy pozycjonowania;
- Analiza pola widzenia;
- Tworzenie map bazowych;
- Symulacje lotów;
- Analiza powierzchni.

Źródła danych do tworzenia cyfrowych modeli terenu

Źródła internetowe zawierające dane przydatne w tworzeniu DEM obejmują:

1. NASA Reverb (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>). Archiwum danych ASTER. Użytkownicy mogą bezpłatnie korzystać z następujących produktów: dane ASTER L1B dotyczące USA i terytoriów zależnych, ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM), oraz obejmującą Amerykę Północną ASTER Land Surface Emissivity Database (NAALSED).

2. GDS IMS (<http://ims.aster.ersdac.jp/ims/html/>). Pełne archiwum danych ASTER. Wszystkie płatne zamówienia na dane ASTER należy składać przez system GDS IMS.

3. Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Bezpłatne dane ASTER dla wszystkich użytkowników: dane ASTER L1B dotyczące USA i terytoriów zależnych, produkty ASTER GDEM i NAALSED.

4. GloVis (<http://glovis.usgs.gov/>). Pełne archiwum danych ASTER, przeszukiwane za pomocą mapy przeglądarki. Użytkownicy mogą bezpłatnie korzystać z następujących produktów: dane ASTER L1B dotyczące USA i terytoriów zależnych (dzień i noc).

5. GDEx (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) Bezpłatny dostęp do danych ASTER GDEM dla wszystkich użytkowników. Przyjazny dla użytkownika interfejs geograficzny.

6. Data Pool (https://lpdaac.usgs.gov/get_data/data_pool). Bezpłatny dostęp do danych ASTER L1B dotyczących USA terytoriów zależnych dla wszystkich użytkowników.

7. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3). Bezpłatny dostęp do danych SRTM.

8. Bluesky (<http://www.bluesky-world.com/>). LiDAR 1m DSM.

Bazy danych dostępne są w jednej z poniższych rozdzielczości:

- dane 30-metrowe: wartości punktów trygonometrycznych na siatce 30-metrowej;
- 1-sekundowe: wartości punktów trygonometrycznych na siatce 1-sekundowej (ok. 30–33 m);
- 3-sekundowe: wartości punktów trygonometrycznych na siatce 3-sekundowej (ok. 90–100 m);
- 30-sekundowe punktowe: wartości punktów trygonometrycznych na siatce 30-sekundowej (ok. 1 km);
- 30-sekundowe uśrednione: uśrednione wartości trygonometryczne na siatce 30-sekundowej (ok. 1 km).

Rozszerzenie plików zawierających cyfrowe modele terenu

Dane można uzyskać z plików o rozszerzeniu .xyz, .las, .hgt. Tego typu pliki można przekształcić na pliki .txt za pomocą różnego rodzaju programów konwertujących, takich jak LASUtility czy VTBuilder.

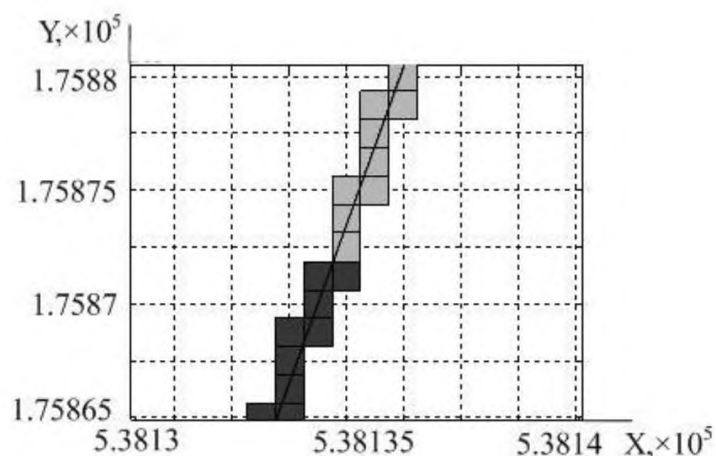
Uzyskane dane zawarte są w 3 kolumnach i wskazują dane x, y oraz z w lokalnym układzie współrzędnych, które można z łatwością wykorzystać do dalszej obróbki.

Wskazówki dotyczące zapobiegania kolizjom

Podstawą zbadania możliwości zapobiegania kolizjom UAV jest określenie danych wejściowych, czyli współrzędnych pozycji początkowej oraz punktu docelowego lotu UAV, a także obowiązkowych punktów lotu w formie zestawu danych obejmujących współrzędne geograficzne (długość i szerokość) oraz topograficzne (wysokość).

Następnie należy przygotować odpowiedni model cyfrowy (DEM) rejonu, nad którym odbywa się lot, a także przystosować dane zawarte w planie lotu do lokalnego układu współrzędnych, zgodnego z formatem DEM.

Metoda zapobiegania kolizjom opiera się na wykrywaniu sytuacji konfliktowych, przedstawionym na ilustracji 4.26.

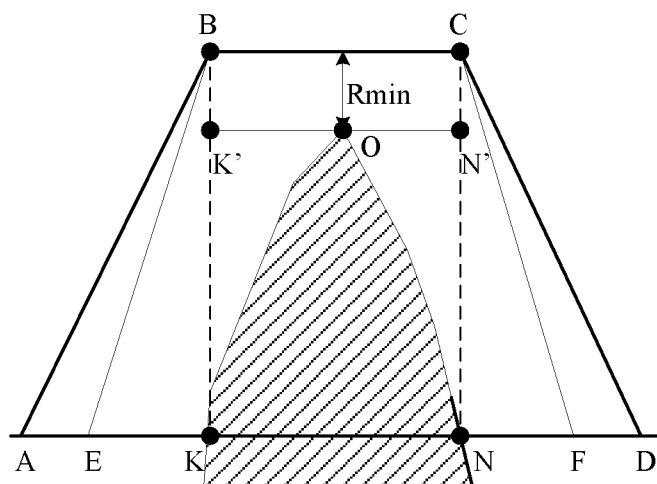


Ilustracja 4.26. Komórkowe wykrywanie sytuacji konfliktowych w planowanej trajektorii lotu [354]

Dzięki wykorzystaniu współrzędnych komórkowych modelu cyfrowego można określić przebieg planowanej trajektorii przez kolejne komórki.

Następnie, by wyznaczyć dokładne punkty przecięcia trajektorii z występującymi na trasie przeszkodami lotniczymi, wykorzystujemy algorytm wskazujący potencjalny przebieg trajektorii lotu przez kolejne komórki i możliwość przecięcia obszaru przeszkód lub kolizji z ich najwyższymi punktami. Krok ten powtarzamy dla wszystkich komórek objętych planem lotu.

W przypadku wykrycia punktów przecięcia i ryzyka sytuacji konfliktowej do pierwotnego planu lotu należy dodać trasę przelotu ponad przeszkodą, tak jak to pokazuje ilustracja 4.27.



Ilustracja 4.27. Modyfikacja planu lotu o przelot nad wykrytą przeszkodą [354]:

AD – pierwotna trajektoria lotu,

KON – przeszkoda,

K, N – punkty początkowy i końcowy przecięcia trajektorii lotu i obszaru przeszkody,

O – maksymalna wysokość przeszkody,

K', N' – punkty początkowy i końcowy przecięcia trajektorii lotu i obszaru przeszkody przesunięte na poziom równy maksymalnej wysokości przeszkody,

B, C – punkty początkowy i końcowy przecięcia trajektorii lotu i obszaru przeszkody przesunięte na poziom zapewniający bezpieczną odległość (*Rmin*) od punktu maksymalnej wysokości przeszkody,

E, F – krytyczne punkty rozpoczęcia i zakończenia przelotu ponad przeszkodą, uwzględniające prędkość i kierunek lotu UAV

Dopuszczalne wartości prędkości i kierunku lotu UAV mieszczą się w przedziałach:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} ,$$

$$\Psi_{\min} \leq \Psi \leq \Psi_{\max} ,$$

gdzie *V, Ψ* oznaczają prędkość i kierunek lotu UAV.

By zwiększyć bezpieczeństwo lotu, należy wyznaczyć punkty *A* i *D* (początkowy i końcowy punkt planu lotu) jako punkty rozpoczęcia i zakończenia procedury przelotu ponad wykrytą przeszkodą. W ten sposób można z łatwością wyznaczyć punkty *B* i *C*, a następnie dodać je do zmodyfikowanego planu lotu, uwzględniając charakterystykę techniczną UAV. Zmodyfikowany plan lotu może teraz zostać wykorzystany w działaniach UAV.

Istnieje wiele modeli ruchu bezzałogowych statków powietrznych. Są one wykorzystywane w różnych zadaniach obejmujących symulację trajektorii lotu UAV. Wybór modelu zależy również od typu UAV i jego cech szczególnych.

W symulacji ruchu UAV można wykorzystać uproszczony model uwzględniający wpływ wiatru. Opisują go poniższe wzory nawigacyjne (Chawla, Padhi 2011) [349]:

$$\dot{x}_i = U \cos \theta \cos \psi + V(\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + W(\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) ;$$

$$\dot{y}_i = U \cos \theta \sin \psi + V(\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + W(\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) ;$$

$$\dot{h}_i = U \sin \theta - V \sin \phi \cos \theta - W \cos \phi \cos \theta ,$$

gdzie *U, V, W* to składniki prędkości.

Parametry prędkości możemy określić na podstawie całkowitej prędkości UAV jako:

$$U = V_T \cos \alpha \cos \beta ,$$

$$V = V_T \sin \beta ,$$

$$W = V_T \sin \alpha \cos \beta,$$

gdzie V_T to prędkość UAV,

α – kąt natarcia,

β – kąt spływu bocznego.

Wpływ różnych sił działających na UAV opisują poniższe równania różniczkowe (Singh, Padhi 2009) [353]:

$$\dot{U} = RV - QW - g \sin \theta + X_a + X_t,$$

$$\dot{V} = RW - RU + g \sin \phi \cos \theta + Y_a,$$

$$\dot{W} = QU - PV + g \cos \phi \cos \theta + Z_a,$$

gdzie P , Q , R to odpowiednio wskaźniki momentów obrotowych osi przechyłu, pochylenia i odchylenia (roll, pitch, yaw) statku powietrznego,

X_a , Y_a , Z_a to siły aerodynamiczne w przeliczeniu na jednostkę masy,

X_t to siła działająca na jednostkę masy w kierunku X, wynikająca z siły ciągu.

Równania momentów obrotowych w tym przypadku to:

$$\dot{P} = c_1 RQ + c_2 PQ + c_3 L_a + c_4 N_a,$$

$$\dot{Q} = c_5 PR + c_6 (P^2 - R^2) + c_7 (M_a + M_t),$$

$$\dot{R} = c_8 PQ - c_2 RQ + c_4 L_a + c_9 N_a,$$

gdzie L_a , M_a , N_a to momenty aerodynamiczne poszczególnych osi bryły statku,

M_t to moment obrotowy osi Y wywołany odchyleniem siły ciągu od środka ciężkości UAV,

c_1 - c_9 to współczynniki inercji.

Z kolei równania kinematyczne ruchu UAV wyglądają następująco:

$$\dot{\phi} = P + Q \sin \phi \tan \theta + R \cos \phi \tan \theta,$$

$$\dot{\theta} = Q \cos \phi - R \sin \phi,$$

$$\dot{\psi} = Q \sin \phi \sec \theta + R \cos \phi \sec \theta,$$

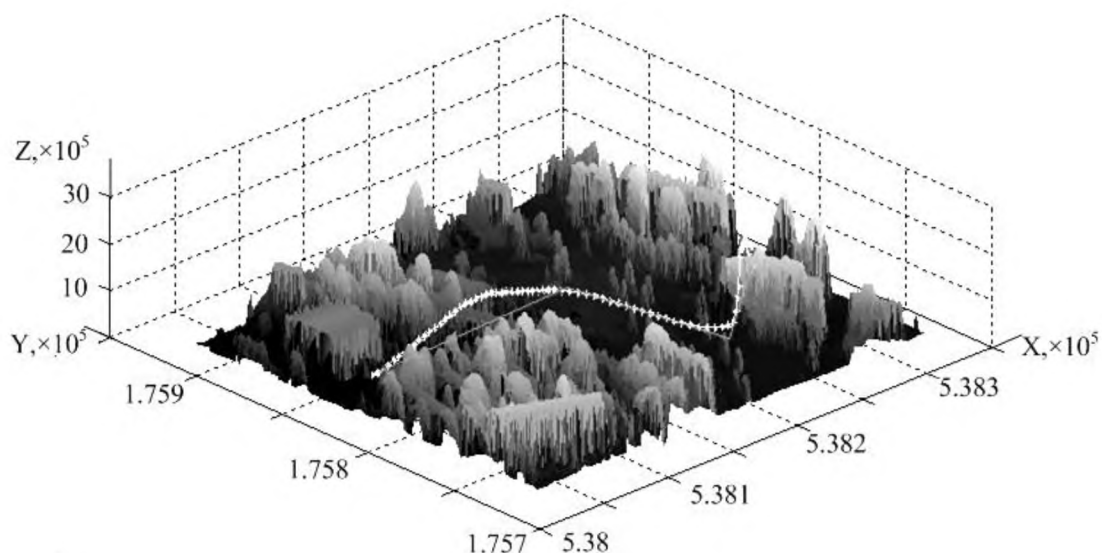
$$\dot{h} = U \sin \theta - V \sin \phi \cos \theta - W \cos \phi \cos \theta,$$

gdzie ϕ , θ , ψ to kąty Eulera,

a h to wysokość nad ziemią.

Modelowanie opracowanej metody geometrycznej zapobiegania kolizji UAV w płaszczyźnie pionowej za pomocą cyfrowych modeli terenu przedstawione zostało na ilustracji 4.28. Modelowanie wykonano w programie Matlab, dla regionu brytyjskiego.

Metody zapobiegania kolizjom mają liczne wady wynikające z nieprecyzyjnego określenia kształtu skomplikowanych przeszkód w formacie 3D. Przedstawiona tutaj geometryczna metoda zapobiegania kolizjom umożliwia uzyskanie dokładnych danych na temat środowiska lotu i wyznaczenie odpowiedniej trajektorii lotu umożliwiającej bezpieczny przelot statku powietrznego nad wykrytymi przeszkodami [354].



Ilustracja 4.28. Prezentacja działania metody zapobiegania kolizjom z wykorzystaniem DEM [354]

4.4.5. Obróbka danych lotu bezzałogowych statków powietrznych metodą funkcji sklejaných

Wykorzystywane obecnie bezzałogowe statki powietrzne (UAV) wykonują rozmaite misje o różnych poziomach autonomii. Uczestniczą w akcjach poszukiwawczych i ratunkowych, a także służą jako narzędzia monitorowania i ochrony zarówno terenów zewnętrznych, jak i przestrzeni wewnątrz rozmaitych obiektów. Stosowane są również w walce z pożarami, działaniach policyjnych, zwalczaniu skutków katastrof naturalnych, teledetekcji, badaniach naukowych czy pomiarach geodezyjnych. UAV realizują zadania, które są zbyt monotonne, szkodliwe lub niebezpieczne dla ludzi.

Podczas lotu działanie UAV mogą zakłócać rozmaite czynniki. Mogą pojawić się błędy, usterki, defekty lub poważne awarie kluczowych elementów, uszkodzenia platformy, błędy i zakłócenia przepływu informacji, nietypowe zachowania lub ekstremalne warunki pogodowe. Zastąpienie człowieka przez skomplikowane systemy informatyczne niesie ze sobą określone implikacje dla bezpieczeństwa operacji.

W trakcie lotu systemy pokładowe UAV wymieniają niezbędne informacje poprzez sieć komunikacyjną. W przypadku usterki któregoś z elementów napędowych UAV, jeśli jego system kontrolny nie jest wyposażony w rozwiązania zapobiegające tego typu awariom lub umożliwiające ich usunięcie, UAV może utracić stabilność i zacząć się zachowywać w sposób nieprzewidywalny.

Wadliwe statki powietrzne nie są w stanie realizować wyznaczonych zadań i stanowią zagrożenie dla ludzi, dlatego właśnie stałe monitorowanie przepływu danych od UAV ma ogromne znaczenie i jest kluczowym elementem sterowania predykcyjnego.

Istnieją rozmaite metody odtwarzania danych w przypadku awarii systemów łączności UAV [355–357]. Dzięki temu w każdej sytuacji możemy wybrać najodpowiedniejsze rozwiązanie, uwzględniające dane wejściowe, możliwości technologiczne oraz cele badania.

Większość badaczy dzieli metody odtwarzania danych na kilka grup: metody wyłączenia niepełnych elementów; metody uzupełniania danych; metody ważenia oraz metody oparte na modelowaniu [355].

Bardzo często badacze muszą radzić sobie z problemem brakujących danych źródłowych. Przyczynami takiej sytuacji mogą być trudności z transmisją lub odbiorem danych, zakłócenia lub chęć ukrycia danych.

Większość znanych metod analizy danych nie oferuje możliwości przetwarzania tego typu informacji, zatem niezbędne staje się odtworzenie i uzupełnienie brakujących danych. W przypadku bezzałogowych statków powietrznych, które są systemami dynamicznymi i transmitują zróżnicowane dane lotu, istniejące metody analizy zazwyczaj nie zapewniają możliwości odtworzenia danych w czasie rzeczywistym.

Głównym celem niniejszego rozdziału jest wybór najodpowiedniejszej metody odtwarzania i obróbki danych lotu UAV.

Przegląd metod odtwarzania danych

Ogólnie mówiąc, odtwarzanie danych to elastyczna metoda rozwiązywania problemów brakujących danych podczas przetwarzania szeregów danych.

Wyróżniamy cztery grupy metod odzyskiwania danych:

1. Metody usuwania niepełnych elementów. W przypadku braku pewnych wartości jakiegoś elementu można zastosować proste rozwiązanie polegające na usunięciu takiego niepełnego analizowanego elementu i obróbce pozostałych, posiadanych danych. Metody te są stosunkowo proste w realizacji i przydatne w przypadku niewielkich ilości brakujących danych. Czasami jednak mogą powodować poważne przesunięcia danych, co wpływa negatywnie na ich efektywność.
2. Metody uzupełniania danych. W metodach tego typu uzupełnia się otrzymane brakujące dane i uzyskane w ten sposób „kompletne” dane poddawane są obróbce w użyciu konwencjonalnych metod. By zapewnić prawidłowe wyniki tej obróbki, należy wprowadzić odpowiednie modyfikacje do standardowych metod przetwarzania, umożliwiające odróżnienie danych rzeczywistych od uzupełnionych.
3. Metody ważenia. W metodach tego typu wnioski z badanych próbek zawierających brakujące dane oparte są zazwyczaj na wadze poszczególnych planów, która jest odwrotnie proporcjonalna do prawdopodobieństwa wyboru. W metodach tych waga może się zmieniać w zależności od typu brakujących danych.
4. Metody oparte na modelowaniu. Duża grupa metod obejmuje tworzenie modeli brakujących danych. W tym przypadku wnioski wyciągane są na podstawie prawdopodobieństwa, wynikającego z warunków i parametrów zbudowanego modelu. Najważniejszymi zaletami tego typu metod są ich elastyczność i możliwość odrzucenia metod opracowanych dla poszczególnych pojedynczych przypadków.

Metody odtwarzania brakujących danych w analizowanych próbach losowych obejmują:

1. Uzupełnienie o wartość średnią danych zawartych w próbie. Wartości średnie można wyznaczać w grupach, które są podobne do grup tworzonych w procesie ważenia. W metodach tego typu uzupełnianie o wartości średnie prowadzi do wyników podobnych do osiągniętych w metodzie ważenia wykorzystującej stałą wagę próbek w poszczególnych klasach ważenia.
2. Procedurę wyboru i uzupełniania brakujących danych możemy zasadniczo opisać jako metodę, w której wybiera się odpowiednie dane, które uzupełniają brakujące wartości, szacując odpowiednio ich rozkład, w odróżnieniu od uzupełniania brakujących danych średnimi wartościami, stosowanego w przypadku rozkładu normalnego.
3. Uzupełnianie bez wyboru. Brakujące dane zastępowane są stałą wartością ze źródła zewnętrznego, np. wcześniejszych obserwacji tej samej próby.
4. Zastąpienie – metoda obróbki brakujących danych w fazie gromadzenia danych w celu obserwacji. Opiera się na zastąpieniu elementu w przypadku braku odpowiedzi na inny element, który nie jest częścią obserwowanej próby.
5. Uzupełnianie przez regresję oparte na zastępowaniu brakujących danych wartością stanowiącą resztę z wyniku odzwierciedlającą niepewność dotyczącą prognozowanej wartości. Uzupełnianie o wartość średnią można uznać za specjalny przypadek uzupełniania przez regresję [356].
6. Metoda interpolacji funkcji sklejaney to metoda matematyczna, umożliwiająca osiągnięcie dobrych wyników.
7. W metodach wielokrotnego uzupełniania brakujące dane zastępuje się różnymi wartościami. Główną zaletą tego rozwiązania jest fakt, iż pozwala ono przezwyciężyć niedoskonałości metod pojedynczego uzupełniania w zakresie zwiększenia rozpiętości estymacji wariancji.
8. Metody łączone wykorzystują rozwiązania zaczerpnięte z kilku metod.
9. Ocena ML – odnosi się do kategorii metod modelowania. Ich cechą wyróżniającą jest wykorzystanie modelu generowania brakujących danych, którego wyniki oceniane są za pomocą funkcji prawdopodobieństwa.
10. Metody oparte na analizie czynnikowej. Nie wymagają uzupełnienia brakujących danych *a priori*, ale potrzebna jest wcześniejsza normalizacja danych i uwzględnienie wymagań dotyczących analizy czynnikowej.

11. Metody oparte na analizie klastrowej. Ich wykorzystanie nie jest oparte na modelach probabilistycznych i nie dają one możliwości oszacowania danych pod względem statystycznym.

12. Metody wykorzystujące sieci neuronowe. Głównym warunkiem zastosowania tych metod są dostrzegalne zależności probabilistyczne pomiędzy danymi i oraz odpowiednio duża liczba obserwacji, na podstawie których odtwarzane są brakujące dane.

Obróbka danych z wykorzystaniem metody funkcji sklepanych

Metoda interpolacji funkcjami sklepanymi to uniwersalne narzędzie odtwarzania i przetwarzania danych na temat parametrów za pomocą technik komputerowych. Funkcja sklejana (splajn) to funkcja ciągła definiowana przez odcinki (przedziały) funkcji S , która składa się z odcinków będących funkcjami tego samego typu o specjalnych punktach styku. Miejsca styku odcinków nazywamy węzłami funkcji sklepanej.

Podstawowym warunkiem łączenia odcinków jest ciągłość wartości i pochodnych w miejscach styku.

Metoda interpolacji funkcjami sklepanymi ma wiele zalet:

Po pierwsze własności różniczkowe, przybliżeniowe i algorytmiczne.

Po drugie, dane eksperymentalne mają charakter dyskretny (np. wartości procesu w różnych momentach w czasie), a dzięki wykorzystaniu funkcji sklepanych można je przedstawić w formie funkcji ciągłej, odzwierciedlającej w przybliżeniu proces rzeczywisty.

Po trzecie, dane eksperymentalne zawsze zawierają błędy, bez względu na sposób ich pozyskania. Wykorzystanie takich danych jako danych wejściowych w różnego rodzaju obliczeniach może w istotny sposób wypaczyć końcowe wyniki. Wygładzenie pozwala w wielu przypadkach przekształcić początkowe informacje do formy ułatwiającej dalsze wykorzystanie.

Do zalet interpolacji funkcjami sklepanymi należy zaliczyć również dużą szybkość przetwarzania danych przez algorytmy obliczeniowe, ponieważ funkcja sklepania to odcinkowa interpolacyjna funkcja wielomianowa i przetwarzane dane pochodzą z kilku punktów pomiaru znajdujących się w analizowanym odcinku.

Model badawczy może mieć postać modelu regresyjnego o przedziale $[0, T]$ i k parametrach obserwacji: $\bar{y}_i = \bar{S}_0(t_i) + \bar{E}_i, i = \overline{1, n}$,

gdzie $\bar{S}_0(t) = (S_0^{(1)}(t), \dots, S_0^{(k)}(t))^T$.

Komponenty $S_0^{(j)}(t)$ to sześciennicze C^2 – funkcje sklepane wygładzające o znanych węzłach

$$\tau_0 = 0 < \tau_1 < \dots < \tau_N = T.$$

Kolejność momentów obserwacji to:

$$0 = t_1 < t_2 < \dots < t_n < T, \text{ i } t_n > \tau_{N-1}.$$

Błędy losowe \bar{E}_i są nieobciążone: $E\bar{E}_i = \vec{0}, i \geq 1$, gdzie E to matematyczna wartość oczekiwana.

Jedną z najodpowiedniejszych krzywych sklepanych jest krzywa B . Oferuje ona bardzo dobre możliwości interpolacji i przybliżania, co ułatwia odtwarzanie oraz obróbkę danych lotu UAV. Prowadzi także przez najważniejsze punkty, co zapewnia możliwość precyzyjnego dopasowania.

Interpolacja funkcją B-sklepaną opiera się na podziale danych na kilka (N) przedziałów i odpowiedniej interpolacji każdego z tych przedziałów. Otrzymana krzywa to suma funkcji sklepanych wszystkich przedziałów. Krzywą B-sklepaną zapisujemy zazwyczaj za pomocą poniższego wzoru:

$$S(t) = \sum_{j=1}^N B_j(t)x_j, 0 \leq t \leq T,$$

gdzie $B_j(t)$ to funkcja B-sklepana dla określonego momentu w czasie t , a x_j to współrzędne punktów kontroli.

Funkcje B-sklepane mogą być funkcjami różnego rzędu, a do ich obliczania możemy wykorzystać wzory Coxa-de Boora [4]. Równoczesna obróbka danych dotyczących większej liczby parametrów zawsze rodzi wiele wyzwań. W takich przypadkach interpolację funkcją B-sklepaną

można zastosować w prosty sposób, dodając nowe punkty kontroli i włączając funkcje B-sklejane do głównego wzoru.

Jedną z najważniejszych kwestii w stosowaniu interpolacji funkcjami sklejanymi jest wyznaczenie przedziałów. Zazwyczaj przedziały interpolowane są rozłożone równomiernie, a główne zadanie polega na określeniu ich optymalnej wielkości. Jednak by osiągnąć bardziej precyzyjne dopasowanie, należy wykorzystać nierównomiernie rozłożone przedziały. W takich sytuacjach najbardziej odpowiednimi metodami obliczania wielkości przedziałów są metody oparte na długości cięciwy i sile dośrodkowej [358].

Podczas lotu bezałogowe statki powietrzne transmitują cały zestaw danych lotu. Zazwyczaj obejmują one wszystkie dane gromadzone przez czujniki UAV. Jedną z najważniejszych jest informacja o położeniu UAV w określonym układzie współrzędnych. Błąd w ocenie położenia to jedno z największych zagrożeń dla bezpieczeństwa operacji.

W procesie modelowania wykorzystano rzeczywiste dane lotu UAV. Lot wykonywany był w trybie automatycznym, przy minimalnym wietrze, po zaplanowanej trajektorii o kształcie cyfry 8.

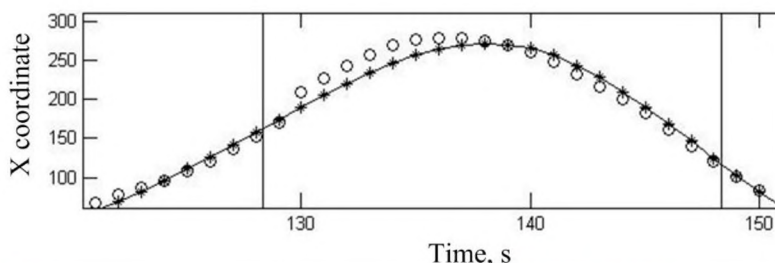
Dane zostały przedstawione w lokalnym układzie współrzędnych NED. Współrzędne przedstawione są jako odległość od punktu początkowego, mierzona w metrach. Na ilustracjach 4.29–4.31 oznaczone zostały gwiazdkami. Oś Z skierowana jest w dół.

Podczas symulacji błędów usunięto dane obejmujące krótki okres – pomiędzy 128 i 148 sekundą lotu. Usunięte dane odtworzono za pomocą interpolacji funkcjami sklejanymi. Wyniki interpolacji przedstawiono na ilustracjach 4.29–4.31 w postaci okręgów.

Błędy danych pozycjonowania wynikające z interpolacji funkcjami sklejanymi przedstawiono na ilustracji 4.32. Maksymalne odchylenie jest mniejsze niż 23 m.

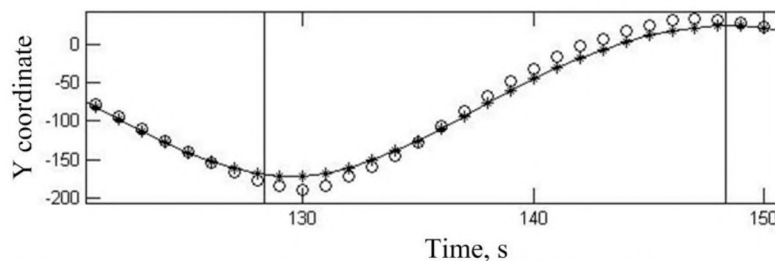
Podczas lotu UAV mogą wystąpić błędy informacyjne, wynikające z różnych przyczyn.

By zapewnić bezpieczeństwo lotu, konieczne jest stałe monitorowanie danych nadawanych przez UAV, będące kluczowym elementem sterowania predykcyjnego. Interpolacja funkcjami sklejanymi to uniwersalne narzędzie odtwarzania i obróbki danych lotu UAV. Wyniki symulacji odtwarzania brakujących danych dotyczących rzeczywistej pozycji UAV wskazują na wystarczającą dokładność metody interpolacji i zasadność wykorzystania tej metody w przetwarzaniu danych lotu bezałogowych statków powietrznych [359].



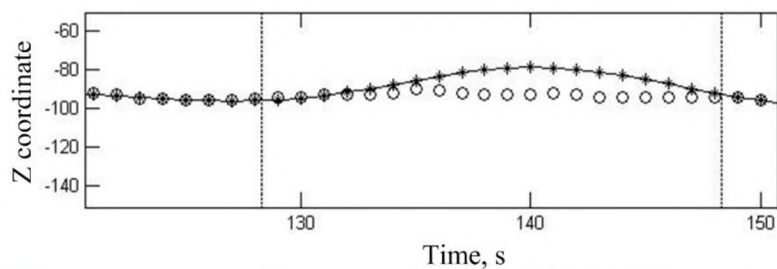
X coordinate	Współrzędna X
Time	Czas, s

Ilustracja 4.29. Wykres współrzędnej X [359]



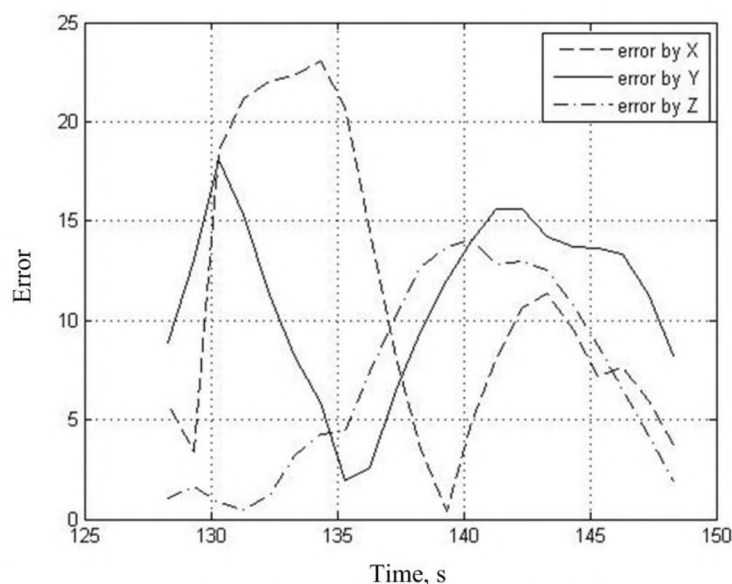
Y coordinate	Współrzędna Y
Time	Czas, s

Ilustracja 4.30. Wykres współrzędnej Y [359]



Z coordinate	Współrzędna Z
Time	Czas, s

Ilustracja 4.31. Wykres współrzędnej Z [359]



Error	Błąd
Time	Czas, s
error by X	błąd na współrzędnej X
error by Y	błąd na współrzędnej Y
error by Z	błąd na współrzędnej Z

Ilustracja 4.32. Błędy danych pozycjonowania wynikające z interpolacji funkcjami sklejanymi [359]

4.4.6. Budowa i testowanie zintegrowanych układów nawigacyjnych dla wielozadaniowych zdalnie sterowanych systemów latających

Postęp naukowy i technologiczny jest zawsze nierozzerwalnie związany z nowymi osiągnięciami naukowymi i wdrażaniem kolejnych zaawansowanych technologii. Zdalnie sterowane systemy latające (RPAS) należą do nowego obszaru w lotnictwie, który obecnie rozwija się bardzo dynamicznie dzięki możliwości wykorzystania nowoczesnych rozwiązań elektronicznych i surowców, a także zaawansowanych technologii informatycznych i komunikacyjnych. Zastosowanie RPAS w wykonywaniu rozmaitych zadań, militaryznych oraz cywilnych, stanowi istotną kwestię, wymagającą rozwiązania wielu problemów.

Obecnie RPAS wykorzystywane są przede wszystkim w celach wojskowych, ale mają one również wielki potencjał zastosowań cywilnych, służących realizacji interesów państwa i podmiotów komercyjnych. Zastosowania te obejmują kontrolę granic, walkę z pożarami, rolnictwo i rybołówstwo, monitorowanie obiektów i infrastruktury, usługi komunikacyjne i nadawcze, wsparcie łączności bezprzewodowej i wzmocnienie sygnałów w systemach satelitarnych, zarządzanie terenami i środowiskiem czy monitorowanie jakości powietrza. Już dziś znamy setki potencjalnych zastosowań cywilnych RPAS, a ich liczba stale rośnie wraz z rozwojem i upowszechnianiem tej technologii [360]. Jednym z sektorów, gdzie można wykorzystać zdalnie sterowane systemy latające, jest logistyka [361–362].

Stale doskonała technologia zdalnie sterowanych systemów latających, stosowana powszechnie w sektorach cywilnych, przyniesie znaczące korzyści obywatelom krajów europejskich i

całej europejskiej gospodarce. Obecnie jednak rynek usług świadczonych z użyciem RPAS jest bardzo niewielki, przede wszystkim z powodu trudności z uzyskaniem pozwolenia na lot RPAS i ograniczeniem ich operacji do wydzielonych obszarów przestrzeni powietrznej. Dlatego niezbędne wydaje się opracowanie i wdrożenie koncepcji operacyjnych oraz odpowiednich rozwiązań technicznych i regulacyjnych umożliwiających wykorzystanie zdalnie sterowanych systemów w nieograniczonej przestrzeni powietrznej. Powszechnie uważa się, że po usunięciu barier utrudniających operacje RPAS potencjalni użytkownicy w krótkim czasie zrozumieją i docenią ich potencjał, tworząc nowe rynki usług lotniczych [361].

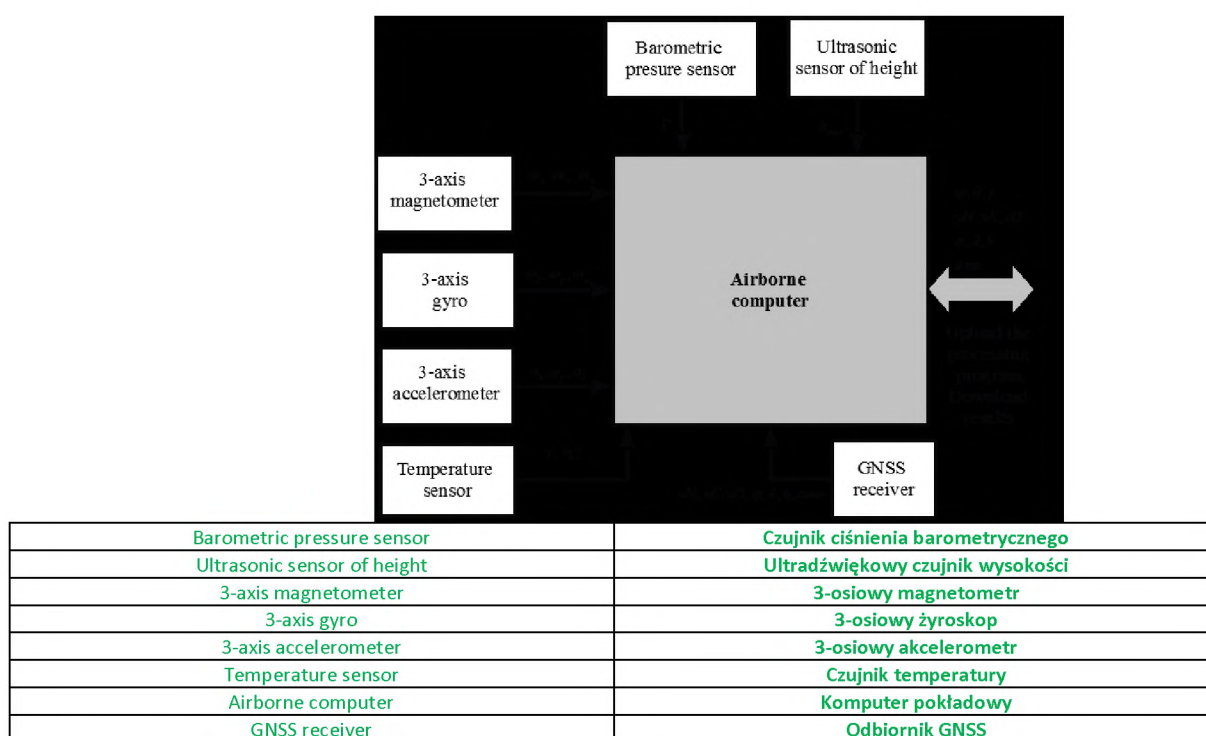
Program rozwoju zarządzania ruchem lotniczym w jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej (SESAR) wspomina wiele istotnych kwestii, jakie należy uwzględnić, by umożliwić bezzałogowym statkom powietrznym efektywne i bezpieczne korzystanie z europejskiej przestrzeni powietrznej. Jedną z nich jest kwestia interoperacyjnych systemów dozoru operacji RPAS w zakresie kontroli, łączności, nawigacji oraz monitorowania parametrów lotu.

Skutecznym rozwiązaniem tego problem może być wprowadzenie narzędzi łącznościowo-nawigacyjnych eliminujących zagrożenia związane z włączeniem RPAS do wspólnej przestrzeni powietrznej, dotyczące utraty kontroli, błędów nawigacyjnych czy zdolności dozoru.

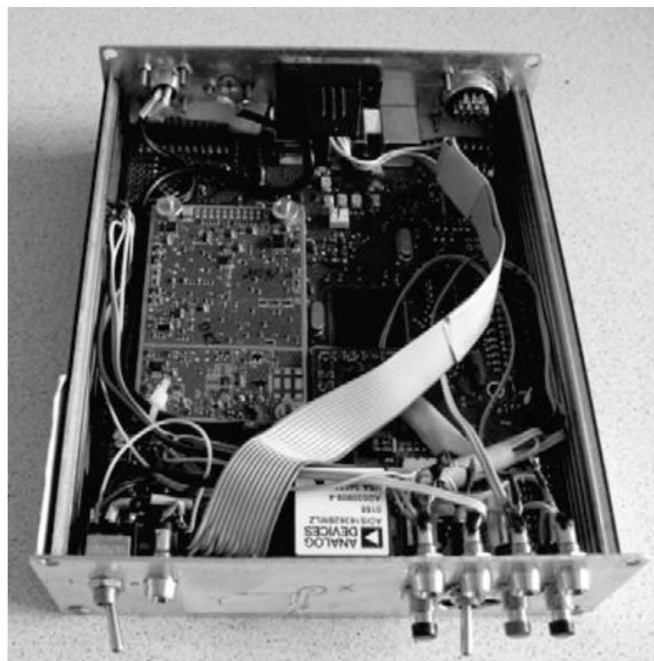
Budowa zintegrowanych układów nawigacyjnych

Stworzenie skutecznych zintegrowanych układów nawigacyjnych to istotna kwestia, biorąc pod uwagę realizację podstawowego celu, jakim jest ogólne zwiększenie precyzji, niezawodności i odporności na zakłócenia pokładowych systemów nawigacyjnych, przy jednoczesnym utrzymaniu ich relatywnie niskiej ceny i wagi. Na podstawie międzynarodowych rozwiązań i doświadczeń w tym zakresie specjaliści centrum badawczego przy National Aviation University w Kijowie postanowili wykorzystać układy MAMS IMU wyposażone w 3-osiowe akcelerometry, żyroskopy i magnetometry, wysokościomierz barometryczny oraz odbiornik GNSS (globalnego systemu nawigacji satelitarnej) jako podstawowy element prototypu małego zintegrowanego układu nawigacyjnego (ilustracja 4.33).

Prototyp układu zawiera: analogową inercyjną jednostkę pomiarową ADIS16362 [363], 3-osiowe magnetometry Honeywell HMC5843 [364], czujnik ciśnienia barometrycznego Bosch Sensortec BMP085 [365] oraz odbiornik GNSS Novatel OEM-V1 [366].



Ilustracja 4.33. Schemat zintegrowanej nawigacji [369]



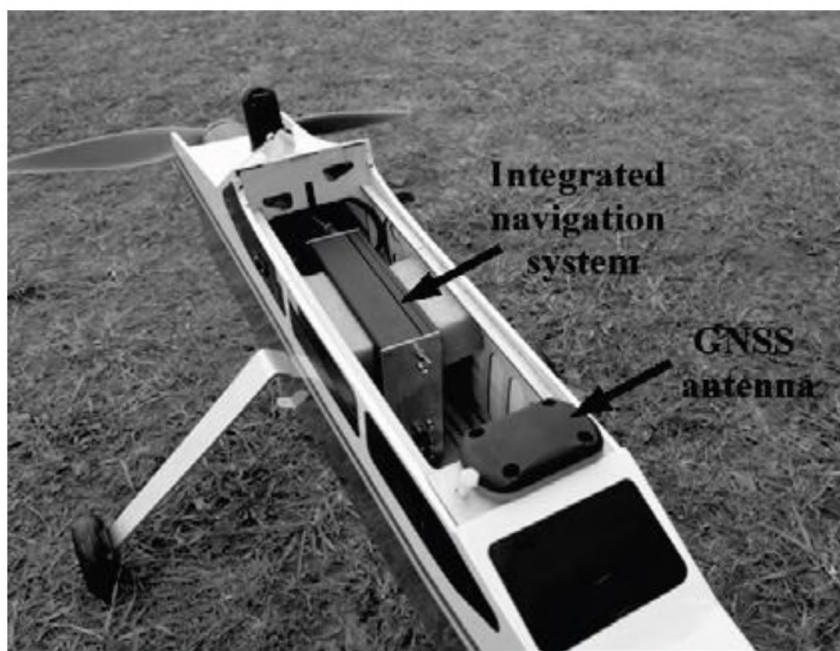
Ilustracja 4.34. Zdjęcie układu nawigacyjnego [369]

Doświadczalna weryfikacja działania zintegrowanego układu nawigacyjnego

W celu zweryfikowania efektywności wykorzystania algorytmów i metod zastosowanych w skonstruowanym zintegrowanym układzie nawigacyjnym specjaliści NAU przeprowadzili serię doświadczeń i badań laboratoryjnym. Ostatnim z nich był przelot RPAS wyposażonego w zbudowany układ wokół lotniska.



Ilustracja 4.35. Zdjęcie malego RPAS [369]



Integrated navigation system	Zintegrowany układ nawigacyjny
GNSS antenna	Antena GNSS

Ilustracja 4.36. Zdjęcie RPAS wyposażonego w zintegrowany układ nawigacyjny [369]

Podczas pierwszych 2 min doświadczenia gromadzono dane statyczne umożliwiające wstępne dostrojenie urządzeń, a następnie niewielki RPAS wyposażony w zintegrowany układ nawigacyjny wykonał lot w rejonie lotniska. Dane z czujników układu zarejestrowano na karcie pamięci, a następnie poddano analizie.

Analiza danych

Zarejestrowane dane binarne w języku programowania C zostały przekształcone na format tekstowy do dalszej obróbki i analizy z wykorzystaniem oprogramowania pakietu Matlab. Dla każdego z czujników utworzono oddzielny plik z tabelą, w której kolumny pokazują poszczególne parametry, a rzędy – wyniki kolejnych pomiarów. Wewnętrzny zegar urządzenia został zsynchronizowany z globalnym czasem GNSS za pomocą sygnału z odbiornika satelitarnego. Rozdzielczość czasowa zegara wynosiła 1 ms.

Plik danych GNSS zawierał czas GNSS (sekundy tygodnia), współrzędne XYZ w układzie ECEF (Earth Centered Earth Fixed), szacunkowe współrzędne RMS (m), prędkości w układzie ECEF, szacunkowe prędkości RMS (m/s), status rozwiązań oraz typ zadań nawigacyjnych zgodnie z [5]. Plik danych IMU zawierał czas (sekundy tygodnia), prędkości kątowe (rad/s) oraz siłę właściwą (m/s^2) wzdłuż osi pomiaru. Plik danych magnetometru zawierał czas (sekundy tygodnia) oraz wartości natężenia pola magnetycznego (mG) wzdłuż osi pomiaru. W takiej formie dane zostały przekazane do obróbki i analizy w programie Matlab. Algorytmy wykorzystane do przetwarzania danych z czujników zostały opisane w [366–368].

Częstotliwość danych magnetometru i IMU wynosiła 50 Hz (zatem $\Delta t = 2 \cdot 10^{-2} c$), a danych GNSS – 1 Hz. Pomiary magnetometru zawierały błędy będące zmiennymi losowymi o rozkładzie zgodnym z rozkładem Gaussa $N_{mag}(M_{mag}, \sigma_{mag})$, gdzie M_{mag} to oczekiwana wartość matematyczna, a σ_{mag} to RMS pomiarów magnetometru w trybie statycznym:

$$M_{mag} = [-242.31 \quad 70.66 \quad 597.94] mG;$$

$$\sigma_{mag} = [5.88 \quad 5.45 \quad 4.36] mG$$

Oczekiwane wartości matematyczne pomiarów czujników, o której mowa tutaj i poniżej w niniejszym rozdziale, zostały określone na podstawie średnich wartości w trybie statycznym, z wykorzystaniem komendy „mean”, zaś RMS – z wykorzystaniem komendy „std” w programie Matlab.

Wysokość mierzona przy użyciu wysokościomierza barometrycznego zawierała błędy będące zmiennymi losowymi o rozkładzie zgodnym z rozkładem Gaussa $N_{baro}(M_{baro}, \sigma_{baro})$, przy oczekiwanej wartości matematycznej równej zero $M_{baro} = 0 \text{ m}$ oraz $\sigma_{baro} = 0.5 \text{ m}$. Pomiarzy żyroskopu zawierały błędy będące zmiennymi losowymi o rozkładzie zgodnym z rozkładem Gaussa $N_{gyro}(M_{gyro}, \sigma_{gyro})$, gdzie M_{gyro} to matematyczna wartość oczekiwana, a σ_{gyro} to RMS pomiarów żyroskopu w trybie statycznym:

$$M_{gyro} = [-0.0025 \ 0.0014 \ -0.0029] \text{ rad / s};$$

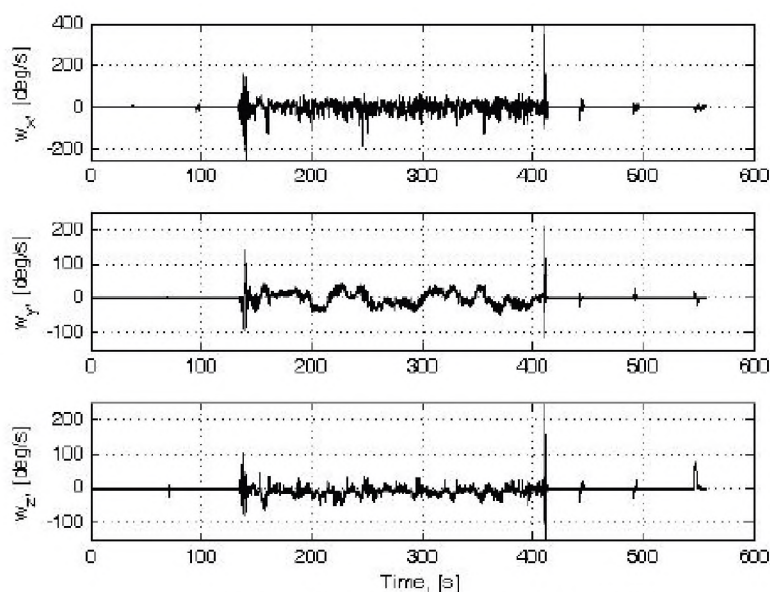
$$\sigma_{gyro} = [0.0151 \ 0.0121 \ 0.0128] \text{ rad / s}.$$

Pomiary akcelerometru zawierały błędy będące zmiennymi losowymi o rozkładzie zgodnym z rozkładem Gaussa $N_{accel}(M_{accel}, \sigma_{accel})$, gdzie M_{accel} to matematyczna wartość oczekiwana, a σ_{accel} to RMS pomiarów akcelerometru w trybie statycznym:

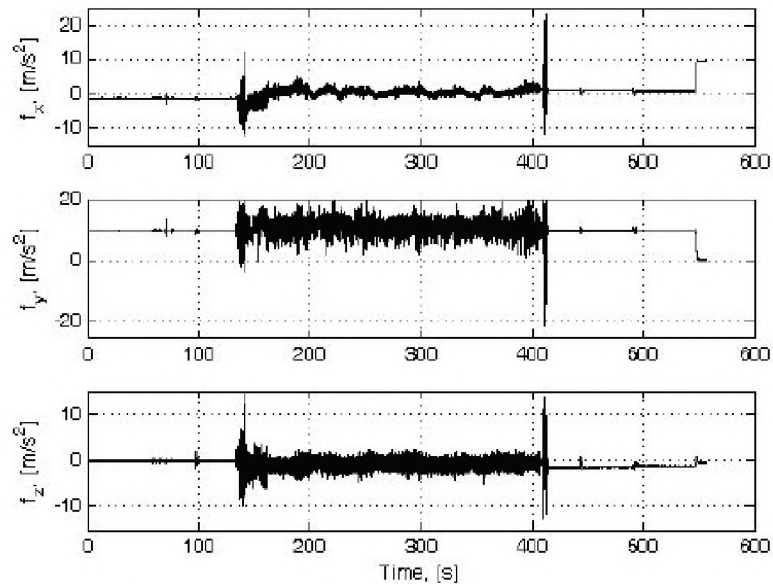
$$M_{accel} = [-1.2701 \ 9.7096 \ -0.161] \text{ m / s}^2;$$

$$\sigma_{accel} = [0.0192 \ 0.0181 \ 0.0224] \text{ m / s}^2.$$

Pomiary żyroskopu w $^{\circ}/\text{s}$ ($\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$) przedstawione zostały na ilustracji 4.37. Pomiarzy akcelerometru w m/s^2 wykonane wzdłuż osi pomiaru ($f = [f_x \ f_y \ f_z]$) przedstawione zostały na ilustracji 4.38.



Ilustracja 4.37. Pomiarzy żyroskopu [$^{\circ}/\text{s}$] [369]

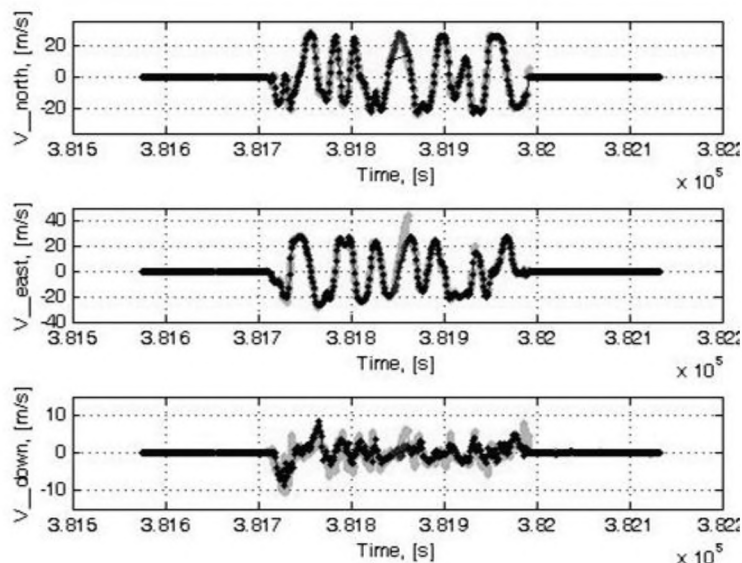


Ilustracja 4.38. Pomiary akcelerometru [m/s²] [369]

Wszystkie obliczenia wykonano w układzie współrzędnych NED, o początku w punkcie startu w WGS-84, dlatego przed uruchomieniem algorytmów określających parametry nawigacyjne wszystkie dane z pliku GNSS i pliku referencyjnego trajektorii zostały dostosowane do układu NED.

Doświadczenie trwało ok. 500 s, podczas których w warunkach normalnych inercyjny system nawigacyjny korygowany był co sekundę, na podstawie sygnałów odbiornika GNSS, magnetometru oraz wysokościomierza barometrycznego. W przypadku braku sygnałów GNSS system nawigacyjny działał w trybie autonomicznym.

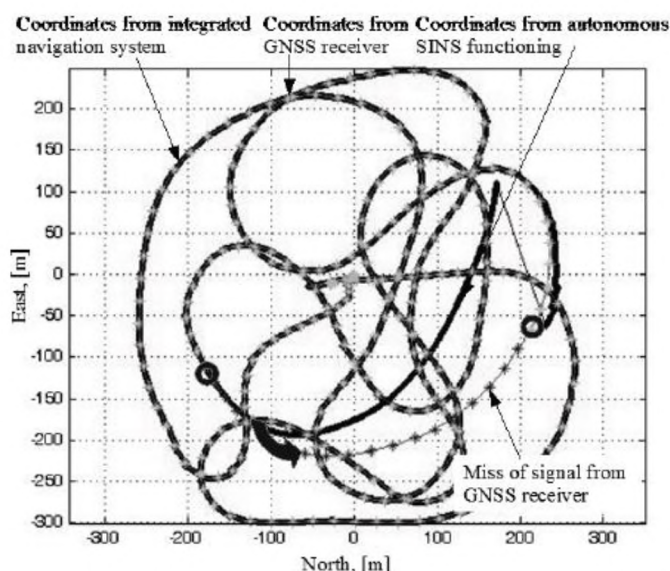
Wyniki analizy danych w NED przedstawione zostały na ilustracjach 4.39 i 4.40. Zależności czasowe oszacowanych prędkości liniowych w NED przedstawione zostały na ilustracji 4.39. Czarna linia ciągła z kropkami w punktach pomiaru oznacza wartości zmierzone przez odbiornik GNSS, zaś szara linia ciągła – prędkości liniowe oszacowane przez SINS. Jak pokazuje ilustracja, w normalnym trybie funkcjonowania SINS prędkości te są praktycznie jednakowe, a składnik ruchu w dół (V_{down}) oszacowany przez SINS jest najbardziej wygładzony. Należy również zauważyć, że po wznowieniu odbioru sygnałów GNSS SINS skorygował swoje szacunki zgodnie z nowymi pomiarami i powrócił do działania w normalnym trybie.



Ilustracja 4.39. Prędkości w NED [369]

Ilustracja 4.40 przedstawia trajektorię ruchu niewielkiego RPAS w płaszczyźnie poziomej (północ, wschód). Szare gwiazdki oznaczają tu współrzędne wyznaczone przez odbiornik GNSS, a czarne linie ciągłe współrzędne określone przez zintegrowany układ nawigacyjny. Na ilustracji widać, że w normalnym trybie szacunki zintegrowanego układu nawigacyjnego pokrywają się z szacunkami GNSS. By przetestować działanie zintegrowanego układu nawigacyjnego w trybie autonomicznym, z wykorzystaniem układu inercyjnego, podczas obróbki danych zasymulowano 20-sekundową przerwę w odbiorze sygnałów GNSS. Na ilustracji początek i koniec tej przerwy wyznaczają niewielkie okręgi, zaś strzałka wskazuje kierunek lotu. Pod koniec 20-sekundowej przerwy współrzędne oszacowane w autonomicznym trybie działania układu różniły się od ścieżki referencyjnej o 120 m, a kierunek obrotu został określony poprawnie. Po wznowieniu odbioru sygnałów GNSS układ SINS skorygował swoje szacunki zgodnie z pomiarami pozycji i prędkości wykonanymi przez odbiornik GNSS.

Coordinates from integrated navigation system	Współrzędne wyznaczone przez zintegrowany układ nawigacyjny
Coordinates from GNSS receiver	Współrzędne wyznaczone przez odbiornik GNSS
Coordinates from autonomous SINS functioning	Współrzędne wyznaczone przez SINS w trybie autonomicznym
Miss of signal from GNSS receiver	Przerwa w odbiorze sygnałów GNSS
East	Wschód
North	Północ



Ilustracja 4.40. Trajektoria lotu w płaszczyźnie poziomej [369]

Jak pokazują wyniki przedstawione na ilustracjach 4.39 i 4.40, algorytmy wspierające inercyjny układ nawigacyjny (INS) działają efektywnie nawet w przypadku występowania szumów oraz innych systemowych składników błędów w pomiarach czujników inercyjnych. Jednak obserwacja ta jest prawdziwa tylko w sytuacji stałej dostępności pomiarów GNSS. W przeciwnym razie szacunki prędkości i pozycjonowania tracą dokładność po ok. 10 s działania INS w trybie autonomicznym, w wyniku pojawienia się składników błędów w pomiarach czujników inercyjnych MEMS.

Celem doświadczalnego lotu niewielkiego RPAS w rejonie lotniska była ocena funkcjonowania prototypu zintegrowanego układu nawigacyjnego. Wyniki analizy danych zgromadzonych podczas lotu potwierdziły efektywność zintegrowanego systemu w normalnym trybie nawigacji. Otrzymane rezultaty mogłyby zostać wykorzystane w produkcji zintegrowanych układów nawigacyjnych przeznaczonych dla różnego rodzaju ruchomych obiektów, w tym zdalnie sterowanych systemów latających. Zastosowanie skutecznych pokładowych systemów nawigacyjnych może ułatwić włączenie RPAS do grupy użytkowników jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej, co mogłoby przynieść znaczące korzyści dla obywateli państw europejskich i dla całej europejskiej gospodarki [369].

4.4.7. Synergia załogowych, zdalnie sterowanych i bezzałogowych statków powietrznych w jednej przestrzeni nawigacyjnej

Solidarność wszystkich członków współczesnego światowego systemu transportu lotniczego to jeden z fundamentów osiągnięcia maksymalnych korzyści ekonomicznych i bezpieczeństwa. Istnieje jednak kilka obiektywnych czynników, które w zasadniczy sposób wpływają na procesy organizacji ruchu lotniczego:

- Stale obserwowany wzrost natężenia ruchu lotniczego. Prowadzi to do zwiększenia liczby sytuacji konfliktowych i ryzyka kolizji w powietrzu, a także pojawienia się nowego typu konfliktu – „konfliktu zwielokrotnionego”.

- Światowa społeczność lotnicza formułuje wymagania [370, 371] dotyczące odejścia od regulowanych trajektorii lotu na rzecz swobodnego lotu i zwiększenia autonomii załóg statków powietrznych (konceptje „Free Flight”, „Free Route” czy „A³”). Oznaczałoby to przekazanie załogom prawa i możliwości wyboru ścieżki, prędkości oraz profilu lotu na podstawie interesów ekonomicznych i innych, a także zwiększenie inwestycji w rozwój zaawansowanych narzędzi rozwiązywania sytuacji konfliktowych (takich jak ASAS – pokładowy system wspomagania separacji lub pokładowy system wsparcia dozoru oraz ADS-B – automatyczne zależne dozоровanie–rozgłaszanie). Według prognoz specjalistów EUROCONTROL stopniowa redystrybucja wykrywania sytuacji konfliktowych ze służb kontroli ruchu lotniczego na załogi statków powietrznych będzie się utrzymywać. Wspólny plan działań FAA i EUROCONTROL sięgający 2030 r. [372] przewiduje pełne przejście przez załogi wszystkich zadań związanych z rozwiązywaniem sytuacji konfliktowych w powietrzu.

- Nowe technologie organizacyjne i komputerowe wprowadzane w procesach kontroli ruchu lotniczego na całym świecie. Ich celem jest zwiększenie elastyczności i większa koordynacja (ale nie regulacja) wykorzystania przestrzeni powietrznej, z uwzględnieniem interesów wszystkich użytkowników CNS/ATM.

- Tworzenie i wykorzystanie nowych lotniczych systemów robotycznych działających bez udziału pilota, takich jak UAV (bezzałogowe statki powietrzne), UAS (bezzałogowe autonomiczne systemy latające) czy RPAS (zdalnie sterowane systemy latające) [373–376].

Wszystkie wspomniane wyżej procesy wskazują na potrzebę opracowania nowych sposobów organizacji ruchu lotniczego na poziomie systemu globalnego.

Niniejszy rozdział omawia wykorzystanie zasad samoorganizacji (synergii) w celu stworzenia nowego obrazu przestrzeni żeglugi powietrznej, pozwalającej na swobodne i autonomiczne operacje statków powietrznych.

Przegląd metod synergicznych

Koncepcję samodzielnego rozwiązywania sytuacji konfliktowych między statkami powietrznymi operującymi we wspólnej przestrzeni powietrznej (Single Air Navigation Space, SANS) jako pierwszy przedstawił M. Eby [377]. Jego zdaniem samodzielna organizacja działań statków powietrznych w środowisku lotniczym oznacza serię pojedynczych działań każdego statku powietrznego wykonywanych dla realizacji wyznaczonych celów przy utrzymaniu ustalonego poziomu bezpieczeństwa, jednak bez żadnego narzuczonego z zewnątrz planu. Eby proponuje wykorzystanie potencjalnych właściwości pól elektrycznych jako modelu samoorganizacji działań w SANS. Najważniejszą z tych właściwości jest obecność siły przyciągania pomiędzy cząstkami pola o przeciwnych ładunkach i siły odpychania pomiędzy cząstkami o jednakowych ładunkach. Przedstawia statki powietrzne jako cząstki o takich samych ładunkach, zaś ich punkty docelowe (lotniska, punkty pośrednie na trasie itp.) jako cząstki o ładunku przeciwnym.

Znana jest również zaprezentowana przez A. Kolesnikowa metoda synergiczna umożliwiająca syntezę zasad kontroli nieliniowych obiektów dynamicznych [378]. Jest ona oparta na procesach „rozszerzania” i „kurczenia” przestrzeni fazowej. Proponowane w niej rozwiązania wykorzystują prawa zachowania energii. Jako proces fizyczny „rozszerzanie” wymaga odpowiednich zasobów

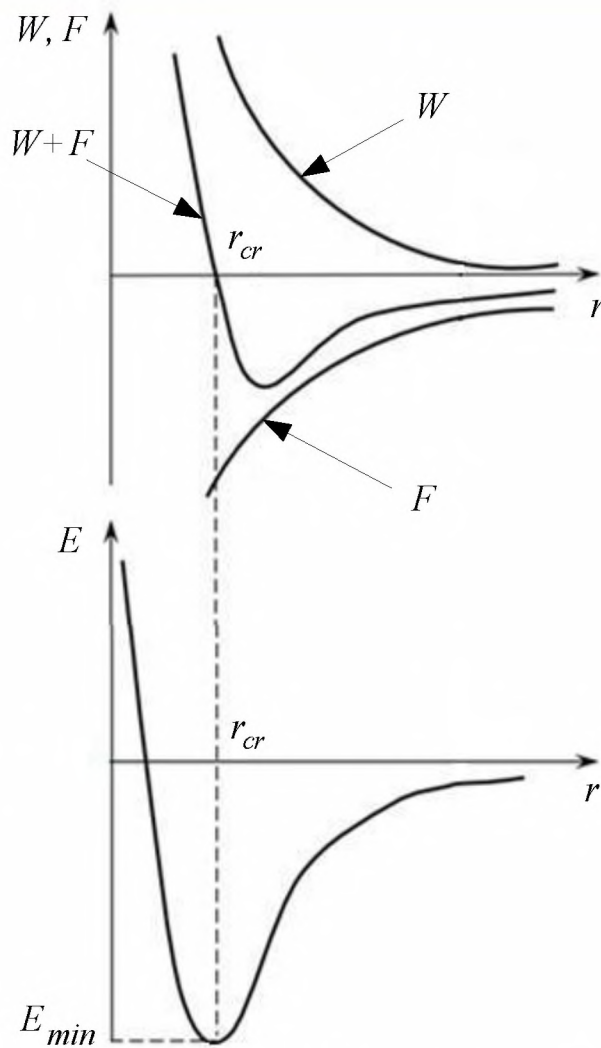
(zazwyczaj zasobów energii), by zainicjować pożądany (zakładany) ruch danego układu. System zasobów energii musi wypełnić swoją funkcję i doprowadzić do osiągnięcia wyznaczonych celów. Dlatego wprowadzenie energii jako dodatkowej współrzędnej fazowej do modelu kontrolnego jest niezbędnym elementem „rozszerzania” przestrzeni fazowej. Jednocześnie wprowadzenie dodatkowych współrzędnych fazowych nadaje systemowi nowe właściwości dynamiczne. We wzbogaconym systemie zmniejsza się liczba dostępnych stopni swobody, tzn. zostaje wprowadzony w asymptotycznie stabilny ruch do czasu osiągnięcia pożądanego stanu fazy pod działaniem syntetycznych metod synergicznych. Z kolei „kurczenie” przestrzeni fazowej systemu nieliniowego to proces kontroli systemu prowadzący do powrotu do jego pierwotnych wewnętrznych właściwości dynamicznych.

W termodynamice G. Haken [379] i I. Prigozhyn [380] jako pionierzy metod synergicznych postulowali wybór spośród wszystkich parametrów złożonego systemu tych, które decydują o jego uporządkowaniu. Za najważniejsze z tych parametrów uznali energię i entropię, dowodząc, że oba te zjawiska stanowią kluczowy aspekt samoorganizacji każdego systemu.

Analiza istniejących metod synergicznych pokazuje, że dążąc do osiągnięcia efektu samoorganizacji we wspólnej przestrzeni powietrznej, należy wykorzystać charakterystykę wzajemnego oddziaływania energetycznego jej elementów.

Samoorganizacja w układach fizycznych

Materia sama w sobie jest typowym przykładem samoorganizacji w przyrodzie. Przyjrzyjmy się bliżej modelowi „ruchów Browna” cząsteczek gazu, jako prototypowi wdrożenia koncepcji „swobodnego lotu”. W tym przykładzie ruch cząsteczek gazu jest analogiczny do swobodnego autonomicznego ruchu statków powietrznych we wspólnej przestrzeni powietrznej. Poruszające się chaotycznie cząsteczki gazu stale się ze sobą zderzają. Jednak w fizyce molekularnej termin „zderzenie” w odniesieniu do cząstek nie oznacza tego samego co w przypadku ciał twardych. Zderzenia cząsteczek to proces wzajemnego oddziaływania pomiędzy nimi, z zachowaniem pewnej odległości, w której cząsteczki zmieniają zarówno kierunek, jak i prędkość poruszania się [381]. Cząsteczki oddziałują na siebie w podobny sposób w również substancjach o innym stanie skupienia (stałym lub ciekłym). Interakcje pomiędzy cząsteczkami uzależnione są od sił przyciągania i odpychania. Istotne jest, że obie te siły działają równocześnie. Ogólny charakter siły przyciągania działającej pomiędzy poszczególnymi cząsteczkami jest podobny – siła przyciągania dominuje przy większych odległościach między cząsteczkami, zaś siła odpychania działa po zmniejszeniu odległości między nimi. Na ilustracji 4.41 przedstawiamy zależność jakościową sił oddziaływania pomiędzy cząsteczkami oddalonymi od siebie o odległość r , gdzie W i F to odpowiednio siły przyciągania i odpychania, zaś $W+F$ to wypadkowa tych sił.



Ilustracja 4.41. Zależności pomiędzy siłami przyciągania i odpychania oraz wzajemnym oddziaływaniem energetycznym cząsteczek a odległością między nimi [382]

Przy odległości krytycznej $r = r_{cr}$ siła wypadkowa równa jest zero, tzn. siły przyciągania i odpychania znoszą się. Odległość r_{cr} odpowiada odległości równowagowej pomiędzy cząsteczkami, przy której nie występuje ruch termiczny. Parametr r_{cr} jest istotny dla strukturalnych elementów mikroukładu, ponieważ przy tej odległości wzajemne oddziaływanie energetyczne między nimi osiąga minimalny poziom. Krzywa energii potencjalnej $E(r)$ ma określoną formę (ilustracja 4.41) i nazywana jest „studnią potencjału” [383], stąd stabilność strukturalna właściwości synergicznych elementów mikrokosmosu wynikająca ze zminimalizowania poziomu oddziaływania energetycznego pomiędzy cząsteczkami oddalonymi o r_{cr} ma istotne znaczenie dla funkcjonowania układu [384]:

$$\min E = \min(E(W) + E(F)) = \min \left(-\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n} \right),$$

gdzie a, b to współczynniki modelu, a m, n to liczby naturalne.

By zapewnić równowagę pomiędzy elementami mikroukładu, konieczne jest spełnienie podstawowego warunku $m > n$. Warunek ten określa ogólny stan synergii w mikroukładzie fizycznym.

Zapewnienie synergicznych właściwości obiektów w środowisku żeglugi powietrznej

Opisaną powyżej zdolność samoorganizacji mikroukładu należy wykorzystać do zapewnienia synergicznych właściwości obiektów znajdujących się w środowisku żeglugi powietrznej [385].

Na początek wyznaczymy ograniczony obszar przestrzeni powietrznej, w której znajdują się poruszające się obiekty dynamiczne (załogowe i bezzałogowe statki powietrzne) o określonych pozycjach docelowych oraz twarde, elastyczne, statyczne i dynamiczne przeszkody. Tę grupę obiektów uznajemy za układ fizyczny, którego elementy mają ułatwić rozwiązanie problemów systemowych związanych z zapewnieniem pełnych korzyści i bezpieczeństwa autonomicznych lotów statków powietrznych w tym obszarze przestrzeni.

Ogólnie ruch statku powietrznego możemy przedstawić w postaci układu równań kinematycznych:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{1i}}{dt} &= f(x_{1i}(t), u_{1i}(t), \xi_{1i}(t)); \\ \frac{dx_{2i}}{dt} &= f(x_{2i}(t), u_{2i}(t), \xi_{2i}(t)); \end{aligned} \quad (4.4.7.1)$$

$$\{u_{1i}, u_{2i}\} \Leftrightarrow \{\Psi_i, V_i\}; 0 \leq \Psi_i \leq 2\pi; 0 \leq V_i \leq V_{i \max}; \frac{d\Psi_i}{dt} \leq \max\left(\frac{d\Psi_i}{dt}\right),$$

gdzie x_{1i} , x_{2i} to współrzędne statku powietrznego i ; u_{1i} , u_{2i} to wymagane działania kontroli lotów, zapobiegające sytuacjom konfliktowym i zapewniające bezpieczne dotarcie statku powietrznego do punktu docelowego; V_i to wektor prędkości ścieżki lotu statku powietrznego i ; $V_{i \max}$ to maksymalna dopuszczalna wartość prędkości lotu statku powietrznego i ; Ψ_i to pozycja kątowa wektora V_i ; $\max\left(\frac{d\Psi_i}{dt}\right)$ to maksymalna dopuszczalna wartość wektora prędkości kątowej V_i ; a ξ_{1i} , ξ_{2i} to zakłócenia wpływające na zachowanie samolotu (odpowiednio w zakresie współrzędnych x_{1i} i x_{2i}).

Wartość (moduł) wektora prędkości oraz kąt jego kierunku (kąt kursu) to parametry kontrolne w kinematycznym modelu ruchu statku powietrznego (4.4.7.1). W procesie wdrożenia warunków swobodnego lotu, pozycja kątowa wektora prędkości w modelu (4.4.7.1) określana jest na podstawie sumy:

$$\Psi_i = \Psi_{i g} + \Delta\Psi_{i nc}, \quad (4.4.7.2)$$

gdzie $\Psi_{i g}$ to kąt kursu określający kierunek wektora prędkości w stronę punktu docelowego lotu (lotniska, punktu pośredniego itd.); $\Delta\Psi_{i nc}$ to zmiana kąta kursu umożliwiająca bezkonfliktowy ruch statku powietrznego, zapobiegający sytuacjom konfliktowym w powietrzu, a także unikanie przeszkód oraz innych ograniczeń istniejących w przestrzeni powietrznej (autonomiczne zachowanie minimum separacyjnych od innych statków powietrznych, zjawisk meteorologicznych oraz przeszkód).

Prędkość swobodnego lotu (szczególnie w fazie przelotu) określana jest przez operatorów statku powietrznego na podstawie parametrów ekonomicznych lotu, takich jak współczynnik kosztów (cost index, CI). Częste zmiany prędkości lotu w celu rozwiązania zwiłokrotnionych konfliktów prowadzą do zwiększenia kosztów paliwa i zmniejszenia efektywności (rentowności) lotu. Dlatego uniezależnienie (autonomia) pętli sterowania od wektora prędkości i jego pozycji kątowej to jedno z głównych wymagań, jakie muszą spełniać metody rozwiązywania sytuacji zwiłokrotnionego konfliktu.

Sformalizujmy teraz układ jako wirtualny model grawitacyjny [386]. Każdy obiekt we wspólnej przestrzeni powietrznej (statki powietrzne, pozycje docelowe, przeszkody, obszary zastrzeżone) przedstawiony jest w modelu jako jedna z i cząstek materialnych (lub ich połączenie), o masie m i potencjałach grawitacyjnych U_i^+ – przyciągania oraz U_i^- – odpychania:

$$U_i^+ = \frac{Gm_i}{r_{ij}}, U_i^- = -\frac{Gm_i}{r_{ij}}. \quad (4.4.7.3)$$

gdzie G jest stałe, a r_{ij} to odległość pomiędzy cząstkami materialnymi.

Pomińmy wzajemne oddziaływanie stałych cząstek. Nie będziemy analizować wpływu cząstki materialnej i na ruch cząstek sił grawitacyjnych pozycji docelowej innej cząstki materialnej.

W takim przypadku na zmienną cząstkę materialną i oddziaływać będą następujące siły odpychania i przyciągania:

$$F_{ij} = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^m} = U_i^+ \frac{m_j}{r_{ij}^{(m-1)}}; W_{ij} = \frac{Gm_i m_j r_{cr}}{r_{ij}^n} = U_i^- \frac{m_j r_{cr}}{r_{ij}^{(n-1)}}. \quad (4.4.7.4)$$

Obraz graficzny pełnego pola grawitacyjnego wytwarzanego przez jedną cząstkę materialną przedstawiony został na ilustracji 4.42.

Każdą cząstkę modelu grawitacyjnego charakteryzują takie cechy, jak całkowity potencjał sztucznego pola grawitacyjnego oraz kierunek ruchu cząstki materialnej w tym polu, odpowiadający kierunkowi ruchu środka masy statku powietrznego we wspólnej przestrzeni powietrznej, wywołanego oddziaływaniem na niego sił przyciągania i odpychania wytwarzanych przez inne cząstki materialne.

By zapewnić dotarcie do celu każdej cząstki materialnej i , siła przyciągania jej punktu docelowego w odległości $r_{ij} \geq r_{cr}$ musi być większa niż całkowita siła przyciągania N innych cząstek

$$F_{ig}^+ > \max \sum_{j=1}^N F_{ij}^+, i \neq j. \quad (4.4.7.5)$$

W świetle (4.4.7.4) możemy zapisać (4.4.7.5) w formie rozszerzonej

$$\frac{Gm_i m_{ig}}{r_{ig}^n} > \max \sum_{j=1}^N \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^n}, i \neq j, \quad (4.4.7.6)$$

gdzie m_{ig} to masa pozycji docelowej cząstki dynamicznej i ; a r_{ig} to odległość pomiędzy cząstką dynamiczną i i jej pozycją docelową.

Pod warunkiem $m_i = m_j = 1$ uzyskujemy wymagane wartości mas pozycji docelowych cząstek dynamicznych

$$m_{ig} > \max \sum_{j=1}^N \frac{r_{ig}^n}{r_{ij}^n}, i \neq j. \quad (4.4.7.7)$$

Jeśli zaś $m_i \neq m_j$, nierówność (4.4.7.7) wyglądać będzie jak poniżej:

$$m_{ig} > \max \sum_{j=1}^N \frac{m_i m_j r_{ig}^n}{r_{ij}^n}, i \neq j. \quad (4.4.7.8)$$

Warunki (4.4.7.6) i (4.4.7.7) eliminują takie wady pól sił, jak obecność minimów lokalnych, „kurs”, „wypłaszczenie” i zapewniają osiągnięcie pozycji docelowych.

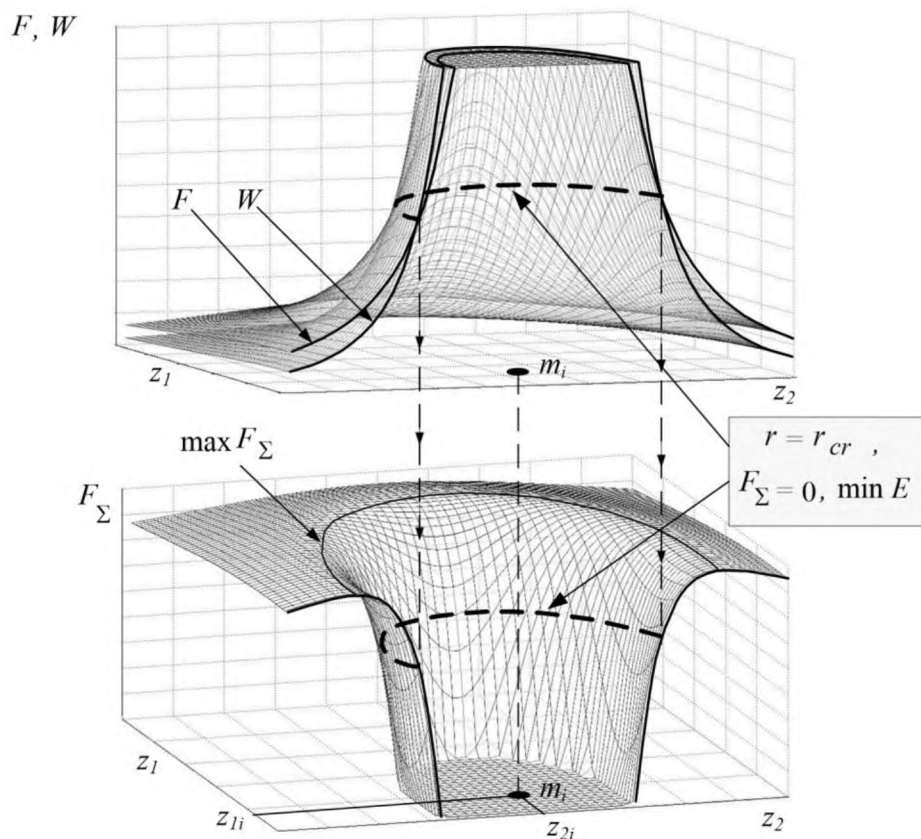
Nachylone linie zsyntetyzowanego pola sił charakteryzują rozkład energii oddziaływania pomiędzy cząstkami materialnymi. Kierunek nachylenia pola w określonym momencie wyznacza

kierunek ścieżek lotu wszystkich poruszających się cząstek tego pola, umożliwiając uniknięcie sytuacji konfliktowych.

W chwili dotarcia cząstki materialnej do odległości krytycznej r_{cr} działająca na nią siła wypadkowa ma wartość zerową, tzn. siły przyciągania i odpychania znoszą się. To podstawowa zasada i zaleta takiego pola sił.

Odległość krytyczna r_{cr} wyznacza zasięg strefy ochronnej (strefy bezpieczeństwa) każdego statku powietrznego w SANS. Wielkości stref ochronnych muszą być zgodne z wymogami współczesnych standardów separacyjnych obowiązujących w danym obszarze przestrzeni powietrznej [387].

Brak naruszeń stref ochronnych poszczególnych statków powietrznych pozwala zapewnić wymagany poziom bezpieczeństwa ruchu powietrznego w obszarach swobodnego lotu.



Ilustracja 4.42. Poziomy powierzchni sztucznego pola grawitacyjnego wytwarzanego przez cząstkę materialną i [388]

Według założeń fizyki klasycznej potencjał grawitacyjny to funkcja skalarna, stanowiąca stosunek energii potencjalnej danego ciała do jego masy.

Ruch ciała o określonej masie w polu grawitacyjnym określany jest przez funkcję Lagrange'a, którą w inercyjnym układzie odniesienia przedstawiamy jako

$$L = \frac{m\dot{\Psi}^2}{2} + m U , \quad (4.4.7.9)$$

gdzie m to masa ciała; Ψ to kąt kierunku gradientu pola grawitacyjnego, a U to potencjał pola grawitacyjnego.

Podstawienie (4.4.7.9) do równania Lagrange'a $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\Psi}} - \frac{\partial L}{\partial \Psi} = 0$ pozwala obliczyć dynamikę kątową wektora prędkości statku powietrznego, umożliwiając zapobieganie sytuacjom konfliktowym:

$$\frac{d^2\Psi}{dt^2} = -\text{grad}(U). \quad (4.4.7.10)$$

Warunki autonomii załogi i urządzeń pokładowych

Osiągnięcie właściwości synergicznych wspólnej przestrzeni powietrznej opisanych równaniami (4.4.7.1), (4.4.7.2) i (4.4.7.10) nie jest możliwe bez koordynacji ruchu wszystkich obiektów w tej przestrzeni. Autonomiczne rozwiązywanie sytuacji zwielokrotnionego konfliktu z poziomu pokładu samolotu zależy od stopnia zaawansowania systemów pokładowych.

Autonomia działań pokładowych oznacza możliwość rozwiązywania sytuacji zwielokrotnionego konfliktu bez udziału kontrolerów ruchu lotniczego. W takim przypadku cała odpowiedzialność za planowanie bezkonfliktowych ścieżek lotu i za manewry służące zapobieganiu kolizji spoczywa na załodze statku powietrznego i urządzeniach pokładowych.

Wdrożenie autonomicznych działań pokładowych wymaga wyposażenia statku powietrznego w odpowiedni sprzęt i oprogramowanie komputerowe, umożliwiające samodzielne rozwiązywanie problemów związanych z lotem, w tym problemów dotyczących ścieżki swobodnego lotu i sytuacji zwielokrotnionego konfliktu.

Nasz tekst omawia synergiczne podejście do zarządzania ruchem lotniczym w środowisku żeglugi powietrznej. Rozwiązania synergiczne mogą zostać wdrożone zarówno w systemach pokładowych, jak i w naziemnych urządzeniach automatycznej kontroli lotów.

W niniejszym rozdziale omówiliśmy synergię załogowych i bezzałogowych statków powietrznych operujących we wspólnej przestrzeni powietrznej.

Metoda rozwiązywania konfliktów pomiędzy statkami powietrznymi odgrywa kluczową rolę w określeniu ich właściwości synergicznych.

Wykorzystane podejście oparte na stworzeniu sztucznych pól grawitacyjnych statków powietrznych znajdujących się w sytuacji konfliktowej w ograniczonej przestrzeni powietrznej umożliwia:

- przewyciężenie problemu „przekleństwa wymiarowości” oraz eliminację „efektu domina” w rozwiązywaniu zwielokrotnionych konfliktów;
- stworzenie autonomicznych pętli sterowania i wyznaczenie bezkonfliktowych ścieżek lotu w sposób pozwalający na minimalizację kosztów energii;
- określenie priorytetów ruchu statków powietrznych;
- zapewnienie bezpieczeństwa ruchu różnych klas obiektów dynamicznych, takich jak załogowe i bezzałogowe statki powietrzne, pojazdy kosmiczne, naziemne i podwodne, a także mobilne roboty [388].

5. Nowe technologie w światowym kształceniu w dziedzinie transportu lotniczego

Nowe technologie i metody nauczania umożliwiają kształcenie wysoko wykwalifikowanych specjalistów w branży lotniczej i kosmicznej. Projektowane i wdrażane nowoczesne technologie powinny spełniać trzy główne wymagania, istotne dla tych obszarów:

- obejmować regulacje i zasady przyjęte w branży lotniczej i kosmicznej;
- uwzględniać szybki rozwój technologiczny branży lotniczej i kosmicznej;
- umożliwić obecnym oraz przyszłym absolwentom skuteczne konkurowanie na krajowym i międzynarodowym rynku pracy.

W związku z powyższym najważniejsze podejścia dydaktyczne do kształcenia specjalistów w dziedzinie lotnictwa obejmują:

- zapewnienie przyszłym specjalistom w dziedzinie lotnictwa wiedzy na temat regulacji i zasad obowiązujących w tym obszarze;
- rozwój umiejętności praktycznych poprzez szkolenia i warsztaty w nowoczesnych laboratoriach wyposażonych w najnowocześniejsze narzędzia badawczo-naukowe.

W niniejszym rozdziale omawiamy następujące kwestie:

- *Struktura regulacji lotniczych na poziomie światowym;*
- *Najważniejsze aspekty kształcenia w dziedzinie transportu lotniczego w National Aviation University;*
- *Nowe technologie w kształceniu w dziedzinie transportu lotniczego.*

5.1. Struktura światowych regulacji lotniczych

Zgodnie z zapisami międzynarodowych regulacji w dziedzinie lotnictwa cywilnego kształcenie personelu w branży lotniczej regulowane jest na trzech poziomach hierarchicznych – światowym, regionalnym i krajowym [282].

5.1.1. Ogólnoświatowe regulacje w dziedzinie transportu lotniczego

Struktura wielostronnie uzgadnianych przepisów regulujących międzynarodowy transport lotniczy zawiera następujące składniki:

- składnik organizacyjny, obejmujący regulacje wprowadzane przez liczne istniejące i powstające organizacje międzynarodowe, międzyrządowe i pozarządowe, ogólnoświatowe transregionalne i regionalne, formalne i nieformalne;
- składnik prawny, obejmujący traktaty międzynarodowe oraz inne podobne instrumenty, a także różnego rodzaju rezolucje, rekomendacje i decyzje rozmaitych organizacji międzynarodowych, zarówno wiążące, jak i niewiążące dla ich członków [282].

Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) i Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym

Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aviation Organization, ICAO) została powołana w 1944 r., na mocy Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (konwencji chicagowskiej). Jej celem jest promowanie bezpiecznego i uporządkowanego rozwoju międzynarodowego lotnictwa cywilnego na całym świecie. Jest to wyspecjalizowana agencja Organizacji Narodów Zjednoczonych, która pełni funkcję forum współpracy w zakresie wszystkich kwestii związanych z lotnictwem cywilnym dla swoich 192 krajów członkowskich, a także wyznacza międzynarodowe normy i tworzy regulacje niezbędne do utrzymania i rozwoju bezpiecznego, wydajnego, zrównoważonego ekonomicznie i ekologicznego sektora lotnictwa cywilnego. ICAO,

wspierana przez państwa członkowskie, odgrywa rolę lidera w dziedzinie bezpieczeństwa i ochrony lotnictwa, realizując swój cel strategiczny zwiększenia ogólnego bezpieczeństwa branży lotniczej na całym świecie. W tym celu organizacja skupia się przede wszystkim na tworzeniu i wdrażaniu globalnych polityk i ram prawnych umożliwiających właściwe reagowanie na pojawiające się nowe zagrożenia. Najważniejszą funkcją regulacyjną ICAO jest opracowywanie i wprowadzanie norm i zalecanych metod postępowania (Standards and Recommended Practices, SARPs) dla branży lotniczej. ICAO tworzy i promuje wdrożenie SARPs w obszarach bezpieczeństwa i ochrony lotnictwa, efektywności i regularności działań, a także ochrony środowiska naturalnego przed negatywnym wpływem operacji lotniczych.

Norma – każdy wymóg dotyczący cech fizycznych, konfiguracji, materiału, działania, personelu lub procedur, którego jednolite zastosowanie uznaje się za *KONIECZNE* dla zachowania bezpieczeństwa lub regularności międzynarodowej żeglugi powietrznej i do którego Umawiające się Państwa będą się stosować zgodnie z Konwencją.

Zalecana metoda postępowania – każdy wymóg dotyczący cech fizycznych, konfiguracji, materiału, działania, personelu lub procedur, którego jednolite zastosowanie uznaje się za *POŻĄDANE* w interesie bezpieczeństwa, regularności lub efektywności międzynarodowej żeglugi powietrznej, i którego Umawiające się Państwa podejmą próbę stosowania zgodnie z Konwencją.

Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (art. 44) określa następujące cele ICAO:

- a) zapewnienie bezpiecznego i prawidłowego rozwoju lotnictwa cywilnego na całym świecie;
- b) popieranie umiejętności konstruowania i eksploataowania statków powietrznych dla celów pokojowych;
- c) popieranie rozwoju dróg lotniczych, portów lotniczych i udogodnień dla żeglugi powietrznej do użytku międzynarodowego lotnictwa cywilnego;
- d) zapewnienie potrzebnego narodom świata bezpiecznego, regularnego, sprawnego i ekonomicznego transportu lotniczego;
- e) zapobieganie marnotrawstwu gospodarczemu spowodowanemu nierozsądną konkurencją;
- f) zapewnienie, że prawa umawiających się państw będą w pełni szanowane i każde umawiające się państwo będzie miało należytą możliwość eksploataowania międzynarodowych linii lotniczych;
- g) unikanie dyskryminacji między umawiającymi się państwami;
- h) zwiększanie bezpieczeństwa lotów w międzynarodowej żegludze powietrznej;
- i) popieranie ogólnego rozwoju międzynarodowej żeglugi powietrznej pod każdym względem [389].

Trzydzieste ósme Zgromadzenie ICAO określiło następujące obszary strategiczne organizacji na lata 2014–2016: Bezpieczeństwo; Efektywność i przepustowość żeglugi powietrznej; Ochrona i ułatwienie procesów; Rozwój ekonomiczny transportu lotniczego oraz Ochrona środowiska [3].

Najważniejsze dokumenty ICAO

Konwencja chicagowska

Konferencja w Chicago, trwająca od 1 listopada do 7 grudnia 1944 r., zakończyła się podpisaniem m.in. trzech ważnych porozumień wielostronnych o istotnym znaczeniu dla regulacji międzynarodowego transportu lotniczego. Najważniejszym z nich była *Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym*, zwana również po prostu *konwencją chicagowską* (Doc 7300), podpisana 7 grudnia 1944 r. Stanowi ona najważniejszą podstawę prawną, na której opierają się działania lotnictwa cywilnego na całym świecie. Służy również jako statut Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) [390].

Załącznik 1 – Licencjonowanie personelu [391]

Załącznik 2 – Przepisy ruchu lotniczego

Przepisy zawarte w Załączniku 2 obejmują ogólne zasady, zasady lotów z widocznością oraz zasady lotów według wskazań przyrządów. Obowiązują one w przypadku wszystkich lotów nad pełnym morzem lub nad terytoriami krajowymi, pod warunkiem że nie będą one sprzeczne z przepisami państwa, nad którego terytorium odbywa się dany lot [391].

Załącznik 3 – Służba meteorologiczna dla międzynarodowej żeglugi powietrznej

Część I – Część główna NIZMP (SARPs)

Część II – Dodatki i załączniki

Załącznik 3 zawiera normy i zalecane metody postępowania, a także dodatkowe wskazówki regulujące działania służb meteorologicznych w międzynarodowej żegludze powietrznej [391].

Załącznik 4 – Mapy lotnicze

Załącznik zawiera normy i zalecane metody postępowania dotyczące map lotniczych. Wydanie 11, poprawione [391].

Załącznik 5 – Jednostki miar do wykorzystania podczas operacji powietrznych i naziemnych

Załącznik 5 zawiera normy i zalecane metody postępowania dotyczące jednostek i wymiarów stosowanych podczas operacji w powietrzu i na lądzie. Załącznik reguluje standardowe zastosowania poszczególnych jednostek, a także sposób zakończenia wykorzystywania jednostek alternatywnych, spoza układu SI. W Dodatkach do Załącznika znajdują się informacje na temat Międzynarodowego Układu Jednostek (SI), wskazówki dotyczące stosowania SI, opisy współczynników zamiany, a także informacje dotyczące Uniwersalnego Czasu Skoordinowanego (UTC) oraz metod przedstawiania daty i godziny w postaci całkowicie liczbowej [391].

Załącznik 6 – Eksploatacja statków powietrznych

Część I – Międzynarodowy, komercyjny transport lotniczy – samoloty

Dokument ten określa międzynarodowe normy i zalecane metody postępowania dotyczące samolotów wykorzystywanych w komercyjnych operacjach przewozu lotniczego pasażerów oraz ładunków. Załącznik omawia takie kwestie, jak operacje lotnicze; ograniczenia operacyjne samolotu; przyrządy i wyposażenie samolotu oraz dokumentacja lotnicza; wyposażenie samolotu w urządzenia łączności, nawigacyjne i nadzoru; obsługa techniczna samolotu; oficerowie operacji lotniczych / dyspozytorzy lotniczy; instrukcje, dzienniki i rejestry; personel pokładowy; ochrona; światła zewnętrzne samolotu, wymagane podczas lotu i operacji naziemnych; zawartość instrukcji operacyjnej; a także wymagania dotyczące czasów lotu oraz ograniczeń użytkowych samolotu.

Część II – Międzynarodowe lotnictwo ogólne – samoloty

Dokument definiuje międzynarodowe normy i zalecane metody postępowania dotyczące samolotów wykorzystywanych w międzynarodowym lotnictwie ogólnym. Załącznik omawia takie zagadnienia, jak przygotowanie do lotu i procedury podczas lotu; ograniczenia operacyjne samolotu; przyrządy i wyposażenie samolotu; urządzenia łączności i nawigacyjne; obsługa techniczna; załoga lotnicza; światła zewnętrzne wymagane podczas lotu i operacji naziemnych; rejestratory lotu; oraz przewóz i wykorzystanie tlenu.

Część III – Operacje międzynarodowe – śmigłowce

Dokument podzielony jest na trzy działy. Dział pierwszy zawiera definicje i zasady zastosowania regulacji. Dział drugi prezentuje międzynarodowe normy i zalecane metody postępowania dotyczące wykorzystania śmigłowców w międzynarodowym komercyjnym transporcie

lotniczym, zaś dział trzeci – normy i zalecane metody postępowania dotyczące wykorzystania śmigłowców w międzynarodowym lotnictwie ogólnym.

Załącznik 7 – Znaki przynależności państwowej oraz rejestracyjne

Załącznik 7 zawiera normy przyjęte przez ICAO jako minimalne normy regulujące rozmieszczenie znaków określających przynależność państwową oraz znaków rejestracyjnych wyznaczonych zgodnie z art. 20 Konwencji. Postanowienia Załącznika obejmują definicje, rozmieszczenie oraz wymiary znaków przynależności państwowej i rejestracyjnych, a także standardowy formularz świadectwa rejestracji [391].

Załącznik 8 – Zdarność do lotu statków powietrznych

Załącznik 8 prezentuje normy i zalecane metody postępowania dotyczące zapewnienia zdarności do lotu statków powietrznych. W części I Załącznika znalazły się definicje. Część II opisuje procedury certyfikacji i zapewnienia ciągłej zdarności do lotu statków powietrznych, a także zawiera standardowy formularz certyfikatu zdarności do lotu. Część IIIA przedstawia minimalne wymagania zdarności do lotu dotyczące samolotów o ciężarze ponad 5700 kg, zgłoszonych do certyfikacji 13 czerwca 1960 r. lub później. Część IIIB zawiera minimalne wymagania dotyczące samolotów o ciężarze powyżej 5700 kg, zgłoszonych do certyfikacji 2 marca 2004 r. lub po tej dacie. Część IVA opisuje minimalne wymagania dotyczące śmigłowców zgłoszonych do certyfikacji 22 marca 1991 r. lub później, a część IVB – minimalne wymagania dotyczące śmigłowców zgłoszonych do certyfikacji 13 grudnia 2007 r. lub później. Ostatnia część, V, zawiera minimalne wymagania zdarności do lotu dotyczące małych samolotów – o ciężarze pomiędzy 750 i 5700 kg [391].

Załącznik 9 – Ułatwienia

Załącznik 9 zawiera normy i zalecane metody postępowania, a także związane z nimi definicje i dodatki, dotyczące ułatwień wprowadzanych w międzynarodowym przewozie lotniczym. Wynikają one z art. 37 Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, nakładającego na ICAO obowiązek sformułowania takich norm i zaleceń, dotyczących m.in. procedur celnych i imigracyjnych oraz innych podobnych kwestii zapewniających bezpieczeństwo, regularność oraz efektywność żeglugi powietrznej [391].

Załącznik 10 – Łączność lotnicza

Ten pięciotomowy załącznik zawiera normy i zalecane metody postępowania, procedury służb żeglugi powietrznej oraz wskazówki dotyczące systemów łączności, nawigacji i dozoru powietrznego.

Tom I – Pomoce radionawigacyjne

Tom I Załącznika 10 prezentuje normy i zalecane metody postępowania, a także wytyczne dotyczące działania i obsługi światowych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS) oraz pozostałych pomocy nawigacyjnych, takich jak systemy lądowania na przyrządach (ILS), mikrofalowe systemy lądowania (MLS), radiolatarnie VHF (VOR), radiolatarnie bezkierunkowe (NDB) oraz radiooległościomierze UHF (DME).

Tom II – Procedury telekomunikacyjne

Tom II Załącznika 10 zawiera ogólne, administracyjne oraz operacyjne procedury regulujące działania stałej i ruchomej lotniczej służby telekomunikacyjnej [391].

Tom III – Systemy łączności

(Część I – Cyfrowe systemy transmisji danych; Część II – Systemy łączności głosowej)

Tom III Załącznika 10 omawia normy i zalecane metody postępowania, a także wytyczne dotyczące rozmaitych systemów łączności głosowej i transmisji danych powietrze–ziemia oraz ziemia–ziemia. Najważniejsze z nich to sieć komunikacyjna ATN, ruchoma satelitarna służba lotnicza (AMSS), wtórne radary dozoru (SSR), łącze transmisji danych w trybie S powietrze–ziemia, łącze cyfrowe powietrze–ziemia o bardzo wysokiej częstotliwości (VDL), stała telekomunikacyjna sieć lotnicza (AFTN), system przyznawania adresów statkom powietrznym, łącze transmisji danych wysokiej częstotliwości (HFDDL), lotnicza służba ruchoma, system selektywnego wywoływania (SELCAL), lotnicze obwoływanie mowy oraz nadajnik sygnałów niebezpieczeństwa (ELT).

Tom IV – Systemy dozoru i unikania kolizji

Tom IV Załącznika 10 zawiera normy i zalecane metody postępowania oraz wytyczne dotyczące wtórnych radarów dozoru (SSR) i pokładowych systemów zapobiegania kolizjom (ACAS), w tym SARP dla radarów SSR działających w trybach A, C i S, a także charakterystykę techniczną systemów ACAS.

Tom V – Wykorzystanie zakresu radiowych częstotliwości lotniczych

Tom V Załącznika 10 omawia normy i zalecane metody postępowania oraz wytyczne dotyczące wykorzystania radiowych częstotliwości lotniczych [391].

Załącznik 11 – Służby ruchu lotniczego

Załącznik 11 definiuje służby ruchu lotniczego, a także określa światowe normy i zalecane metody postępowania dla tych służb [391].

Załącznik 12 – Poszukiwanie i ratownictwo

Załącznik 12 zawiera zapisy regulujące tworzenie i wyposażenie służb poszukiwawczo-ratowniczych przez Umawiające się Państwa, a także działania tych służb, zarówno na terytorium własnego kraju, jak i na obszarach pełnego morza. Uzupełnieniem Załącznika 12 jest trzypięciowy Podręcznik międzynarodowych służb ratownictwa morskiego i lotniczego (Doc 9731), który zawiera wytyczne na temat organizacji i prowadzenia lotniczych oraz morskich działań poszukiwawczo-ratowniczych [391].

Załącznik 13 – Badanie wypadków i incydentów statków powietrznych

Załącznik 13 prezentuje międzynarodowe normy i zalecane metody postępowania w sytuacjach badania wypadków oraz incydentów lotniczych [391].

Załącznik 14 – Lotniska

Tom I – Projektowanie i eksploatacja lotnisk

Tom I Załącznika 14 zawiera normy i zalecane metody postępowania obejmujące fizyczną charakterystykę, wymagania w zakresie ograniczania przeszkód oraz opisy pomocy wzrokowych, które powinny się znajdować na płycie lotniska, a także opisuje niektóre obiekty i służby techniczne funkcjonujące na lotniskach.

Tom II – Lotniska dla śmigłowców

Tom II Załącznika 14 określa normy i zalecane metody postępowania obejmujące różne aspekty planowania, projektowania i eksploatacji lotnisk dla śmigłowców [391].

Załącznik 15 – Służby informacji lotniczej

Załącznik zawiera normy i zalecane metody postępowania dotyczące działania służb informacji lotniczej [391].

Załącznik 16 – Ochrona środowiska

Tom I – Hałas statków powietrznych

Tom I omawia normy i zalecane metody postępowania dotyczące certyfikacji statków powietrznych w zakresie hałasu. Prezentuje również międzynarodowe procedury pomiaru oraz metody oceny hałasu wytwarzanego przez statki powietrzne.

Tom II – Emisje z silników statków powietrznych

Tom II zawiera normy i zalecane metody postępowania dotyczące certyfikacji emisji z silników statków powietrznych [391].

Załącznik 17 – Ochrona

Załącznik 17 określa normy i zalecane metody postępowania dotyczące ochrony i bezpieczeństwa międzynarodowego transportu lotniczego. Jest on regularnie aktualizowany, w odpowiedzi na pojawiające się nowe wyzwania i zagrożenia. Załącznik 17 to kompleksowy dokument, ułatwiający opracowanie i wdrożenie odpowiednich środków bezpieczeństwa. Jako taki zawiera dodatki w postaci fragmentów z innych Załączników, z Technicznych instrukcji bezpiecznego transportu materiałów niebezpiecznych drogą powietrzną (Doc 9284) oraz z Procedur Służb Żeglugi Powietrznej, opisujące działania, jakie powinny podejmować Państwa, by zapobiec aktom bezprawnej ingerencji w działania lotnictwa cywilnego lub gdy taka ingerencja nastąpi [391].

Załącznik 18 – Bezpieczny transport materiałów niebezpiecznych drogą powietrzną

Załącznik 18 opisuje ogólne zasady regulujące międzynarodowy transport lotniczy towarów niebezpiecznych. By zapewnić zgodność z innymi typami transportu, zapisy tego Załącznika oparte są na materiałach opracowanych przez Organizację Narodów Zjednoczonych i Międzynarodową Agencję Energii Atomowej [391].

Załącznik 19 – Zarządzanie bezpieczeństwem

Załącznik 19 zawiera nadrzędne przepisy regulujące zarządzanie bezpieczeństwem, odnoszące się, bezpośrednio lub pośrednio, do bezpiecznej eksploatacji statków powietrznych, a także wskazuje na odpowiedzialność państwa za zarządzanie bezpieczeństwem w rozmaitych obszarach sektora lotniczego. Załącznik został uzupełniony o dodatki obejmujące omówienie Krajowego Programu Bezpieczeństwa (SSP), systemu zarządzania bezpieczeństwem (SMS) oraz zasad gromadzenia, analizy, wymiany i ochrony informacji [391].

Dokumenty i okólniki ICAO

38 sesja Zgromadzenia ICAO

Doc 10022, Obowiązujące uchwały Zgromadzenia (z dnia 4 października 2013 r.)

PROCEDURY SŁUŻB ŻEGLUGI POWIETRZNEJ

Doc 4444 – ATM – Zarządzanie Ruchem Lotniczym

Doc 8168 – OPS – Operacje Statków Powietrznych

Doc 8400 – ABC – Skroty i Kody ICAO

Doc 9868 – Szkolenia

AGA – LOTNISKA

- Doc 9137 – Podręcznik Służb Portu Lotniczego
- Doc 9150 – Podręcznik Stolport
- Doc 9184 – Podręcznik planowania portu lotniczego
- Doc 9476 – Podręcznik kierowania ruchem naziemnym i kontroli (SMGCS)
- Doc 9774 – Podręcznik certyfikacji lotnisk
- Doc 9977 – Podręcznik dotyczący zaopatrzenia lotnictwa cywilnego w paliwo
- Cir 305 – Obsługa nowych, większych samolotów na istniejących lotniskach
- Cir 329 – Pomiar, ocena i raportowanie warunków na powierzchni drogi startowej

AIG – BADANIE WYPADKÓW LOTNICZYCH

- Doc 9756 – Podręcznik badania wypadków i incydentów statków powietrznych
- Doc 9946 – Podręcznik dotyczący regionalnej organizacji badań wypadków i incydentów
- Doc 9962 – Podręcznik dotyczący zasad i procedur badania wypadków i incydentów
- Doc 9973 – Podręcznik dotyczący pomocy ofiarom wypadków lotniczych i ich rodzinom
- Doc 9998 – Polityka ICAO w zakresie pomocy dla ofiar wypadków lotniczych i ich rodzin
- Cir 298 – Wytyczne szkoleniowe dla inspektorów wypadków lotniczych
- Cir 315 – Zagrożenia na miejscach wypadków lotniczych

ATM – ZARZĄDZANIE RUCHEM LOTNICZYM

- Doc 9426 – Podręcznik planowania służb ruchu lotniczego
- Doc 9432 – Podręcznik radiotelefonicznej frazeologii lotniczej
- Doc 9433 – Podręcznik dotyczący przechwytywania samolotów cywilnych
- Doc 9554 – Podręcznik dotyczący środków bezpieczeństwa odnoszących się do działań wojskowych, potencjalnie groźnych dla lotów cywilnych
- Doc 9574 – Podręcznik wdrażania 300 m (1 000 stóp) jako minimalnej separacji pionowej pomiędzy FL 290 i FL 410 włącznie
- Doc 9643 – Podręcznik operacji jednoczesnych na drogach startowych równoległych lub prawie równoległych w locie na przyrządach
- Doc 9689 – Podręcznik metodologii planowania przestrzeni powietrznej dla określenia minimów separacji
- Doc 9694 – Podręcznik wykorzystania łączy danych w działaniach służb ruchu lotniczego
- Doc 9731 – Podręcznik międzynarodowych służb poszukiwawczo-ratunkowych, lotniczych i morskich (IAMSAR)
- Doc 9750 – Globalny plan żeglugi powietrznej
- Doc 9830 – Rozszerzony podręcznik kierowania ruchem naziemnym i kontroli (A-SMGCS)
- Doc 9854 – Koncepcja operacyjna globalnego zarządzania ruchem lotniczym
- Doc 9869 – Podręcznik dotyczący wymaganej charakterystyki łączności (RCP)
- Doc 9870 – Podręcznik zapobiegania wtargnięciu na drogę startową
- Doc 9882 – Podręcznik wymogów zarządzania ruchem lotniczym
- Doc 9883 – Podręcznik działania globalnego systemu żeglugi powietrznej
- Doc 9896 – Podręcznik dotyczący lotniczych sieci telekomunikacyjnych (ATN) wykorzystujących Internet Protocol Suite (IPS)
- Doc 9931 – Podręcznik płynnego podejścia do lądowania (CDO)
- Doc 9937 – Procedury operacyjne i metody działania dla regionalnych agencji monitorujących w związku z wykorzystaniem odległości 300 m (1 000 stóp) jako minimalnej separacji pionowej pomiędzy FL 290 i FL 410 włącznie
- Doc 9965 – Podręcznik dotyczący lotu i przepływu – Informacja dla środowiska otwartego (FF-ICE)
- Doc 9971 – Podręcznik zarządzania przepływem ruchu lotniczego opartego na współpracy
- Doc 9985 – zastrzeżony – Podręcznik zarządzania bezpieczeństwem ruchu lotniczego

- Cir 185 – Działania poszukiwawczo-ratunkowe z wykorzystaniem satelitów – system COSPAS-SARSAT
- Cir 211 – Lotniskowe służby informacyjne (AFIS)
- Cir 213 – Umiejętności pilotów ułatwiające unikanie kolizji w warunkach widoczności
- Cir 278 – Krajowy plan dla systemów CNS/ATM
- Cir 319 – Ujednolicony sposób modelowania ryzyka kolizji uzupełniający Podręcznik metodologii planowania przestrzeni powietrznej dla określenia minimów separacji (Doc 9689)
- Cir 321 – Wytyczne dla wdrożenia wzdłużnych minimów separacji w GNSS
- Cir 324 – Wytyczne dla określenia separacji poziomej statków powietrznych startujących i lądujących według opublikowanych procedur lotu według wskazań przyrządów
- Cir 326 – Ocena dozoru w systemach ADS-B i multilateracji, wspomagająca służby ruchu lotniczego i uzupełniająca wytyczne wdrożenia
- Cir 328 – Bezzałogowe systemy latające (UAS)
- Cir 330 – Współpraca cywilno-wojskowa w zarządzaniu ruchem lotniczym

CMO – STAŁE MONITOROWANIE I NADZÓR

- Doc 9734 – Podręcznik nadzorowania bezpieczeństwa
- Doc 9735 – Podręcznik stałego monitorowania programu kontroli ogólnego nadzoru bezpieczeństwa

DGS – ŁADUNKI NIEBEZPIECZNE

- Doc 9284 – Instrukcje techniczne bezpiecznego przewozu lotniczego ładunków niebezpiecznych
- Doc 9284 – Uzupełnienie Instrukcji technicznych bezpiecznego przewozu lotniczego ładunków niebezpiecznych
- Doc 9375 – Podręcznik szkoleń w zakresie ładunków niebezpiecznych
- Doc 9481 – Wytyczne dotyczące reagowania w przypadku incydentów lotniczych związanych w przewozem ładunków niebezpiecznych

IIM – ZINTEGROWANE ZARZĄDZANIE INFRASTRUKTURĄ

- Doc 8071 – Podręcznik testowania radiowych pomocy nawigacyjnych
- Doc 8126 – Podręcznik lotniczych służb informacyjnych
- Doc 8259 – Podręcznik planowania i konstruowania stałych lotniczych sieci telekomunikacyjnych
- Doc 8697 – Podręcznik map lotniczych
- Doc 9674 – Podręcznik Światowy układ geocentryczny –1984 (WGS-84)
- Doc 9718 – Podręcznik wymagań dotyczących spectrum częstotliwości radiowych w lotnictwie cywilnym, obejmujący oficjalne zasady i polityki ICAO
- Doc 9739 – Kompleksowy podręcznik lotniczych sieci telekomunikacyjnych (ATN)
- Doc 9741 – Podręcznik dotyczący łącza danych HF
- Doc 9776 – Podręcznik dotyczący łącza cyfrowego VHF (VDL) Mode 2
- Doc 9804 – Podręcznik komunikacji głosowej i sygnalizacji dźwiękowej ziemia–ziemia służb ruchu lotniczego (ATS)
- Doc 9805 – Podręcznik dotyczący łącza cyfrowego VHF (VDL) Mode 3
- Doc 9816 – Podręcznik dotyczący łącza cyfrowego VHF (VDL) Mode 4
- Doc 9849 – Podręcznik Globalnego systemu nawigacji satelitarnej (GNSS)
- Doc 9855 – Wytyczne dotyczące wykorzystania publicznego Internetu do zastosowań lotniczych
- Doc 9861 – Podręcznik dotyczący wykorzystania wielozadaniowych nadajnikoodbiorników (UAT)
- Doc 9863 – Podręcznik pokładowego systemu zapobiegania kolizjom (ACAS)
- Doc 9871 – Przepisy techniczne dotyczące sygnałów w trybie S i sygnałów typu rozszerzony squitter
- Doc 9880 – Podręcznik dotyczący szczegółowych wymagań technicznych lotniczych sieci telekomunikacyjnych (ATN), wykorzystujących standardy i protokoły ISO/OSI
- Doc 9924 – Podręcznik dozoru lotniczego
- Doc 9925 – Podręcznik obsługi ruchomych satelitów lotniczych

ISD-SAF – WSPARCIE WDROŻENIA I ROZWÓJ — BEZPIECZEŃSTWO

Doc 9734 – Podręcznik nadzoru bezpieczeństwa

ISM – ZINTEGROWANE ZARZĄDZANIE BEZPIECZEŃSTWEM

Doc 9859 – Podręcznik zarządzania bezpieczeństwem (SMM)

Doc 10004 – Globalny plan bezpieczeństwa lotnictwa

MED – MEDYCYNA LOTNICZA

Doc 8984 – Podręcznik medycyny dla lotnictwa cywilnego

Doc 9654 – Podręcznik zapobiegania stosowaniu problematycznych substancji w lotniczym miejscu pracy

Doc 9815 – Podręcznik dotyczący wpływu emiterów laserowych na bezpieczeństwo lotu

MET – METEOROLOGIA

Doc 7488 – Podręcznik dotyczący atmosfery standardowej wg ICAO (podwyższonej do 80 km (262 500 stóp))

Doc 8896 – Podręcznik meteorologii lotniczej

Doc 9328 – Podręcznik dotyczący oceny i raportowania widzialności na drodze startowej

Doc 9377 – Podręcznik koordynacji działań służb ruchu lotniczego, lotniczych służb informacyjnych i lotniczych służb meteorologicznych

Doc 9691 – Podręcznik dotyczący działań w przypadku chmur pyłu wulkanicznego, materiałów radioaktywnych lub toksycznych substancji chemicznych

Doc 9817 – Podręcznik dotyczący uskoków wiatru na niskim pułapie

Doc 9837 – Podręcznik dotyczący automatycznych meteorologicznych systemów obserwacyjnych na lotniskach

Doc 9873 – Podręcznik zarządzania jakością służb meteorologicznych w międzynarodowej żegludze powietrznej

OPS – OPERACJE LOTNICZE

Doc 7192 – Podręcznik szkoleń

Doc 7383 – Służby informacji lotniczej zapewniane przez państwa

Doc 8335 – Podręcznik procedur kontroli, certyfikacji i stałego nadzoru operacji

Doc 8585 – Oznaczenia przewoźników lotniczych oraz władz i służb lotniczych

Doc 9365 – Podręcznik operacji we wszystkich warunkach pogodowych

Doc 9368 – Podręcznik konstruowania procedur lotów według wskazań przyrządów

Doc 9371 – Podręcznik wzorcowych procedur oczekiwania, podejścia z dwoma zakrętami i z nawrotem

Doc 9379 – Podręcznik procedur tworzenia i utrzymania państwowych systemów licencjonowania personelu

Doc 9516 – Wytyczne dotyczące przygotowania instrukcji pilotażu dla pilotów lekkich samolotów

Doc 9613 – Podręcznik nawigacji opartej o charakterystyki (PBN)

Doc 9625 – Podręcznik kryteriów kwalifikacji szkoleniowych symulatorów lotu

Doc 9683 – Podręcznik szkoleń dotyczących czynnika ludzkiego

Doc 9758 – Wytyczne dotyczące czynnika ludzkiego dla systemów zarządzania ruchem lotniczym (ATM)

Doc 9803 – Audyt bezpieczeństwa operacji liniowych (LOSA)

Doc 9806 – Wytyczne dotyczące czynnika ludzkiego do podręcznika audytów bezpieczeństwa

Doc 9808 – Czynniki ludzkie w operacjach ochrony lotnictwa cywilnego
Doc 9824 – Wytyczne dotyczące czynnika ludzkiego do podręcznika obsługi i serwisowania statków powietrznych
Doc 9835 – Podręcznik dotyczący wdrożenia wymagań ICAO w zakresie znajomości języka
Doc 9841 – Podręcznik dotyczący zatwierdzania organizacji szkoleniowych
Doc 9905 – Podręcznik tworzenia procedur ustalania wymaganej charakterystyki nawigacyjnej
Doc 9906 – Podręcznik zapewnienia jakości podczas tworzenia procedur lotu
Doc 9910 – Ankieta bezpieczeństwa normalnych operacji (NOSS)
Doc 9992 – Podręcznik dotyczący wykorzystania nawigacji opartej o charakterystyki podczas projektowania przestrzeni powietrznej
Doc 9993 – Podręcznik operacji płynnego wznoszenia (CCO)
Doc 9995 – Podręcznik szkoleń opartych na dowodach
Doc 9997 – Podręcznik homologacji nawigacji opartej o charakterystyki (PBN)
Cir 234 – Human Factors Digest No. 5 – Operacyjne implikacje automatyzacji w zaawansowanych technologiach wykorzystywanych w kabinie załogi
Cir 240 – Human Factors Digest No. 7 – Analiza czynnika ludzkiego w wypadkach i incydentach lotniczych
Cir 241 – Human Factors Digest No. 8 – Czynniki ludzkie w kontroli lotów
Cir 247 – Human Factors Digest No. 10 – Czynniki ludzkie, zarządzanie i organizacja
Cir 249 – Human Factors Digest No. 11 – Czynniki ludzkie w systemach CNS/ATM
Cir 253 – Human Factors Digest No. 12 – Czynniki ludzkie w operacjach przeglądów i serwisowania statków powietrznych
Cir 300 – Human Factors Digest No. 15 – Czynniki ludzkie w obszarze bezpieczeństwa w kabinie
Cir 301 – Nowe większe samoloty – Naruszenie strefy wolnej od przeszkód: Działania operacyjne i analizy lotnicze
Cir 302 – Human Factors Digest No. 16 – Różnorodność kulturowa a bezpieczeństwo lotnictwa
Cir 314 – Zarządzanie zagrożeniami i błędami (TEM) w kontroli lotów
Cir 318 – Kryteria testów językowych umożliwiające globalną harmonizację
Cir 323 – Wytyczne do programów szkoleniowych języka angielskiego w lotnictwie

SAST – PAŃSTWOWE NARZĘDZIA BEZPIECZEŃSTWA LOTNICZEGO

Doc 7910 – Wskaźniki lokalizacji
Doc 8643 – Oznaczenia typu statku powietrznego
Rejony informacji lotniczej ICAO (FIR)

PLANY ŻEGLUGI POWIETRZNEJ

Doc 7474 – Region Afryki–Oceanu Indyjskiego
Doc 7754 – Region Europejski
Doc 8733 – Regiony Karaibów i Ameryki Południowej
Doc 8755 – Regiony Północnego Atlantyku, Ameryki Północnej i Pacyfiku
Doc 9673 – Regiony Azji i Pacyfiku
Doc 9708 – Region Bliskiego Wschodu

KONFERENCJE NT. ŻEGLUGI POWIETRZNEJ

Doc 9707 – Raport Dyrektorów Generalnych Konferencji Lotnictwa Cywilnego na temat globalnej strategii nadzoru bezpieczeństwa. Montreal, 10–12 listopada 1997
Doc 9719 – Raport z Konferencji nt. światowego wdrożenia systemów CNS/ATM. Rio de Janeiro, 11–15 maja 1998
Doc 9828 – Raport z 11 Konferencji. Montreal, 22 września–3 października 2003. 2004
Doc 10007 – Raport z 12 Konferencji nt. żeglugi powietrznej. Montreal, 19–30 listopada 2012

AIG – BADANIE WYPADKÓW LOTNICZYCH

- Doc 9753 – Raport ze spotkania dotyczącego badania i zapobiegania wypadkom lotniczym (AIG/99).
Montreal, 14–24 września 1999
Doc 9914 – Raport ze spotkania dotyczącego badania i zapobiegania wypadkom lotniczym. (AIG/08).
Montreal, 13–18 października 2008

IIM – ZINTEGROWANE ZARZĄDZANIE INFRASTRUKTURĄ

- Doc 9733 – Raport ze spotkania na temat lotniczych służb informacyjnych/ map lotniczych
(AIS/MAP). Montreal, 23 marca–3 kwietnia 1998

PUBLIKACJE EKONOMICZNE

- Doc 7100 – Taryfy dla portów lotniczych i służb żeglugi powietrznej, wydanie 2013
Doc 9082 – Polityka ICAO dotycząca opłat dla portów lotniczych i służb żeglugi powietrznej
Doc 9660 – Raport na temat aspektów finansowych, organizacyjnych i zarządzania związanych ze stworzeniem i działaniem Globalnego system nawigacji satelitarnej (GNSS)
Cir 284 – Prywatyzacja portów lotniczych i służb żeglugi powietrznej
Cir 286 – Najważniejsze elementy rozwoju gospodarczego portów lotniczych i służb żeglugi powietrznej
Doc 8632 – Polityka ICAO dotycząca opodatkowania w obszarze międzynarodowych przewozów lotniczych
Doc 9587 – Polityka i wytyczne dotyczące regulacji ekonomicznych w obszarze międzynarodowych przewozów lotniczych
Doc 9956 – 20-letnie prognozy globalne i regionalne – piloci, personel techniczny, kontrolerzy lotniczy
Cir 257 – Ekonomia służb żeglugi powietrznej wykorzystujących systemy satelitarne
Cir 269 – Implikacje łączonych operacji linii lotniczych
Cir 283 – Implikacje regulacyjne przydziału czasów przylotu i odlotu w międzynarodowych portach lotniczych
Cir 333 – Perspektywy światowego transportu lotniczego do rok 2030 i przewidywane trendy do roku 2040

PUBLIKACJE ZWIĄZANE Z OCHRONĄ ŚRODOWISKA

- Doc 9501 – Środowiskowy podręcznik techniczny
Doc 9829 – Wytyczne dotyczące zrównoważonego podejścia do hałasu emitowanego przez statki powietrzne
Doc 9884 – Wytyczne dotyczące opłat z tytułu emisji statków powietrznych, związanych z jakością lokalnego powietrza
Doc 9885 – Wytyczne dotyczące wykorzystania handlu emisjami w lotnictwie
Doc 9887 – Raport niezależnych ekspertów na temat oceny LTTG NO_x, a także na temat średnio- i długoterminowych celów technologicznych wykorzystania NO_x
Doc 9888 – Procedury przeciwhałasowe: Analiza projektów badawczych, rozwojowych i wdrożeniowych – omówienie wyników badań
Doc 9889 – Podręcznik jakości powietrza w porcie lotniczym
Doc 9911 – Zalecana metoda obliczania konturów hałasu wokół portów lotniczych
Doc 9929 – Raport z posiedzenia wysokiego szczebla na temat międzynarodowej branży lotniczej i zmian klimatu
Doc 9943 – Raport dla CAEP sporządzony przez niezależny zespół ekspertów CAEP zajmujący się technologią redukcji hałasu. Analiza możliwości redukcji hałasu emitowanego przez statki lotnicze oraz średnio- i długoterminowe cele związane z redukcją hałasu

Doc 9948 – Badanie zakresowe dotyczące wykorzystania przez branżę lotniczą systemu handlu prawami do emisji i rekompensat do poprawy jakości lokalnego powietrza
Doc 9949 – Badanie zakresowe związane z połączeniem „otwartych” systemów handlu prawami do emisji, obejmujących międzynarodową branżę lotniczą
Doc 9950 – Raport o dobrowolnym handlu prawami do emisji w branży lotniczej (Raport VETS).
Doc 9951 – Rekompensowanie emisji sektora lotniczego
Doc 9953 – Raport niezależnych ekspertów dla CAEP/8, na temat drugiej oceny LTTG NO_x, a także na temat średnio- i długoterminowych celów technologicznych wykorzystania NO_x
Doc 9963 – Raport niezależnych ekspertów na temat średnio- i długoterminowych celów związanych z redukcją spalania paliw lotniczych dzięki wykorzystaniu nowych technologii
Doc 9968 – Raport na temat metod działania systemu zarządzania środowiskowego (EMS) w sektorze lotniczym
Cir 303 – Operacyjne możliwości zminimalizowania wykorzystania paliwa i ograniczenia emisji
Cir 317 – Efekty wprowadzenia procedur przeciwhałasowych PANS-OPS przy odlocie samolotu na emisję hałasu i spalin

PUBLIKACJE ZWIĄZANE Z UDOGODNIENIAMI

Doc 9636 – Międzynarodowe oznaczenia ułatwiające poruszanie się pasażerów po terminalach lotniczych i morskich
Doc 9944 – Wytyczne dotyczące rejestracji danych osobowych pasażerów (PNR)
Doc 9957 – Podręcznik ułatwień
Doc 9984 – Podręcznik dotyczący dostępu do transportu lotniczego dla osób z niepełnosprawnościami

PODRĘCZNIKI

Doc 8973 – zastrzeżony – Podręcznik ochrony lotnictwa
Doc 8991 – Podręcznik prognozowania ruchu lotniczego
Doc 9060 – Podręcznik referencyjny programu statystycznego ICAO
Doc 9161 – Podręcznik ekonomiki służb żeglugi powietrznej
Doc 9562 – Podręcznik ekonomiki portów lotniczych
Doc 9626 – Podręcznik regulowania międzynarodowego transportu lotniczego
Doc 9980 – Podręcznik prywatyzacji operatorów portów lotniczych i służb żeglugi powietrznej

GAT – ŚWIATOWE BIURO SZKOLEŃ LOTNICZYCH

Doc 9941 – TRAINAIR PLUS – Podręcznik przygotowania szkoleń – metodologia szkoleń rozwijających kompetencje [393].

Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Lotniczych (IATA)

Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Lotniczych (International Air Transport Association, IATA) zostało utworzone na Kubie w 1945 r. IATA to główna platforma współpracy linii lotniczych w zakresie promowania bezpiecznych, regularnych, efektywnych i ekonomicznie opłacalnych usług lotniczych na rzecz klientów na całym świecie. Dziś organizacja liczy 270 członków ze 126 krajów we wszystkich częściach świata, reprezentując 84% całego ruchu lotniczego. Transport lotniczy to jedna z najdynamiczniej rozwijających się gałęzi gospodarki, a IATA to jego reprezentacja branżowa. W ciągu 60 lat istnienia zrzeszenie opracowało liczne standardy handlowe umożliwiające stworzenie sektora o światowym zasięgu.

Członkostwo w IATA jest otwarte dla każdego działającego przedsiębiorstwa, które uzyskało licencję na świadczenie usług międzynarodowego transportu lotniczego. Zrzeszenie ma dwie kategorie członków: aktywnych – międzynarodowe linie lotnicze oraz stowarzyszonych – krajowe linie lotnicze.

Najważniejszym aspektem działalności IATA są konferencje transportowe dotyczące koordynacji procedur działania i taryf lotniczych (Procedures Conferences i Tariff Coordinating Conferences), organizowane zgodnie z oficjalnie uznanymi procedurami organizacji konferencji transportowych. Najważniejsze rodzaje konferencji dotyczących koordynacji procedur działania, czyli praktyk handlowych linii lotniczych, to:

- Konferencje IATA dotyczące obsługi pasażerskiej (Passenger Services Conference, PSC), regulujące takie kwestie, jak bezpośrednia obsługa pasażerów, bagażu i dokumentów; a także procedury, standardy i regulacje w zakresie rezerwacji oraz zakupu biletów, rozkładów lotów oraz automatyzacji działań;

- Konferencje IATA dotyczące relacji między przewoźnikami i agentami (Passenger Agency Conference, PAConf), które regulują zasady współpracy między liniami lotniczymi i ich autoryzowanymi agentami sprzedaży oraz innymi pośrednikami, z wyłączeniem kwestii związanych z wynagrodzeniem;

- Konferencje IATA dotyczące obsługi towarów (Cargo Services Conference, CSC), których celem jest opracowywanie rozwiązań ułatwiających i doskonalących obsługę przesyłek towarowych poprzez standaryzację procedur, wymiany danych oraz systemów;

- Konferencje IATA dotyczące relacji między przewoźnikami i agentami cargo (Cargo Agency Conference, CAConf), regulujące zasady współpracy między liniami lotniczymi i pośrednikami uczestniczącymi w sprzedaży i obsłudze przesyłek towarowych, z wyłączeniem kwestii związanych z wynagrodzeniem.

Z kolei konferencje IATA w zakresie koordynacji taryf lotniczych są miejscem wielostronnych negocjacji i uzgodnień dotyczących cen usług oferowanych przez przewoźników. Wyróżniamy dwa typy takich konferencji:

- Konferencje IATA dotyczące koordynacji taryf pasażerskich (Passenger Tariff Coordinating Conferences, PTCs), regulujące ceny stawki za przewóz pasażerów i warunki ich stosowania;

- Konferencje IATA dotyczące koordynacji taryf cargo (Cargo Tariff Coordinating Conferences, CTCs), regulujące stawki za przewóz ładunków towarowych i warunki ich stosowania.

Najważniejsze usługi IATA związane z regulowaniem transportu lotniczego obejmują:

- plan rozliczeń przewozów pasażerskich (Billing and Settlement Plan, BSP), umożliwiający komputerową obsługę rozliczeń pomiędzy liniami lotniczymi i agentami autoryzowanymi do sprzedaży biletów lotniczych;

- system rozliczeń przewozów towarowych (Cargo Accounting Settlement System, CASS), umożliwiający komputerową obsługę rozliczeń pomiędzy liniami lotniczymi i agentami cargo;

- izba rozliczeniowa, obejmująca usługi podziału dochodów i pozwalająca przewoźnikom (oraz dostawcom) na dokonywanie wszelkich rozliczeń w jednym systemie, minimalizując tym samym konieczność dokonywania rzeczywistych transferów środków na całym świecie;

- system śledzenia i poszukiwania bagażu IATA/SITA (BAGTRAC) umożliwiający lokalizowanie zagubionego lub błędnie wysłanego bagażu;

- wielostronne porozumienie międzyliniowe (Multilateral Interline Traffic Agreement, MITA), prawnie wiążące porozumienie dotyczące wystawiania i wzajemnej akceptacji biletów oraz listów przewozowych, a także akceptacji pasażerów, bagażu i ładunków.

IATA oferuje system elektronicznej wymiany danych administracyjnych, handlowych i transportowych (EDIFACT) do tworzenia wiadomości i wymiany informacji na temat pasażerów, ładunków, zakupów i dostaw paliwa pomiędzy przewoźnikami i ich partnerami biznesowymi. W ostatnim okresie IATA i SITA wspólnie zapewniają stałą łączność za pośrednictwem systemu EDIFACT pomiędzy liniami lotniczymi, ułatwiającą wykorzystanie biletów elektronicznych (e-biletów) w połączeniach wykonywanych przez kilku przewoźników (<http://www.iata.org>) [394].

Międzynarodowa Rada Portów Lotniczych (ACI)

Międzynarodowa Rada Portów Lotniczych (Airports Council International, ACI) gromadzi 573 członków, zarządzających 1751 portami lotniczymi w 174 krajach, reprezentując 95% światowego ruchu. ACI to organizacja non profit, której najważniejszym celem jest reprezentowanie interesów portów lotniczych i wspieranie ich dążenia do doskonałości w zakresie zarządzania operacjami w porcie lotniczym. Rada realizuje ten cel, oferując swoim członkom liczne możliwości szkoleń, program benchmarkingu w zakresie obsługi klienta, szczegółowe analizy branżowe oraz publikując dobre praktyki branżowe.

Porty lotnicze są elementem usprawniającym działanie międzynarodowych lotniczych łańcuchów dostaw. Zapewniając odpowiednią infrastrukturę i wyposażenie, umożliwiają one lepszy przepływ towarów i operacji. Relacje między operatorem lotniska i przewoźnikami zależą w dużym stopniu od rodzaju prowadzonych operacji cargo, typu obsługiwanych przewozów (towarowe, kurierskie, pasażerskie) i określonych wymagań związanych z każdym z tych czynników. Zapewnienie ochrony i bezpieczeństwa ładunków i operacji w porcie lotniczym zależy od jego fizycznej konfiguracji, relacji pomiędzy poszczególnymi podmiotami uczestniczącymi w procesie oraz ram prawnych obowiązujących w danym kraju (<http://www.aci.aero>) [395].

Międzynarodowe Zrzeszenie Lotniczego Transportu Towarowego (TIACA)

Międzynarodowe Zrzeszenie Lotniczego Transportu Towarowego (The International Air Cargo Association, TIACA) to globalne stowarzyszenie non profit, reprezentujące wszystkie najważniejsze segmenty branży logistyki lotniczej i lotniczego transportu towarowego, takie jak operatorzy samolotów pasażerskich i transportowych, spedytorzy, porty lotnicze, służby obsługi naziemnej, przewoźnicy drogowi, agenci celni, operatorzy logistyczni, nadawcy, firmy informatyczne, producenci samolotów i wyposażenia, media branżowe oraz instytucje naukowe. Realizując swoją misję, TIACA podejmuje działania służące rozwijaniu współpracy wewnątrz branży, promowaniu innowacji, wymianie wiedzy, poprawie jakości i wydajności, a także promowaniu edukacji (<http://www.tiaca.org>) [396].

Międzynarodowa Rada Lotnictwa Biznesowego (IBAC)

Międzynarodowa Rada Lotnictwa Biznesowego (International Business Aviation Council, IBAC) to rada zrzeszeń lotnictwa biznesowego z całego świata. Działaniami organizacji kieruje rada zarządzająca IBAC, w skład której wchodzi przedstawiciele wszystkich zrzeszeń członkowskich.

IBAC reprezentuje interesy lotnictwa biznesowego na całym świecie. Jest to międzynarodowa organizacja pozarządowa (INGO) o statusie stałego obserwatora przy Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO), agencji OZN do spraw lotnictwa. Sekretariat IBAC znajduje się w siedzibie ICAO w Montrealu. IBAC, wspólnie z organizacjami członkowskimi, tworzy również materiały o bezpośredniej wartości dla firm lotniczych, takie jak międzynarodowe standardy operacji samolotów biznesowych (IS-BAO), zestawy narzędzi zarządzania bezpieczeństwem, materiały szkoleniowe z zakresu zarządzania bezpieczeństwem czy karty identyfikacyjne członków załóg. Członkowie: firmy oferujące usługi lotnictwa biznesowego z ponad 20 krajów i terytoriów (<http://www.ibac.org>) [397].

Międzynarodowa Rada Zrzeszeń Właścicieli Statków Powietrznych i Pilotów

Międzynarodowa Rada Zrzeszeń Właścicieli Statków Powietrznych i Pilotów (International Council of Aircraft Owner and Pilot Associations, IAOPA) to federacja non profit, w skład której wchodzi 73 autonomiczne, pozarządowe krajowe zrzeszenia organizacji lotnictwa ogólnego. IAOPA reprezentuje ten sektor lotnictwa od niemal 50 lat. Łącznie organizacje należące do IAOPA zrzeszają ponad 470 000 pilotów lotnictwa ogólnego. Według definicji ICAO lotnictwo ogólne to „operacje z wykorzystaniem statków powietrznych, inne niż te wykonywane w ramach zarobkowego transportu lotniczego lub w ramach usług lotniczych” (<http://www.iaopa.org>) [398].

Międzynarodowa Federacja Stowarzyszeń Pilotów Linii Lotniczych (IFALPA)

Międzynarodowa Federacja Stowarzyszeń Pilotów Linii Lotniczych (International Federation of Air Line Pilot's Associations, IFALPA) reprezentuje ponad 100 000 pilotów i mechaników zrzeszonych w niemal 100 krajowych stowarzyszeniach członkowskich na całym świecie. Misją IFALPA jest wspieranie i ochrona interesów zawodowych pilotów w celu doskonalenia jakości ich pracy i zapewnienie najwyższego poziomu bezpieczeństwa lotnictwa na całym świecie. Członkowie: krajowe stowarzyszenia pilotów linii lotniczych w ponad 70 krajach i terytoriach na całym świecie (<http://www.ifalpa.org>) [399].

Światowa Organizacja Celna (WCO)

ICAO stale wzmacnia współpracę w obszarze rozwiązań służących zwiększeniu bezpieczeństwa i ułatwieniu lotniczego transportu towarowego ze wszystkimi interesariuszami sektora lotniczego, a także z innymi organizacjami międzynarodowymi, takimi jak Światowa Organizacja Celna (WCO) oraz Światowy Związek Pocztowy (UPU), by podkreślić znaczenie bezpieczeństwa i płynności transportu towarowego dla całej światowej społeczności. Ważnymi elementami tych działań są rozwój wiedzy technicznej oraz tworzenie grup roboczych pracujących nad poprawą poziomu zabezpieczeń lotniczego transportu towarowego. Ich rekomendacje ułatwiają wdrażanie podstawowych wymagań związanych z jakością i bezpieczeństwem transportu przez operatorów i państwa na całym świecie. Wreszcie Sekcja Bezpieczeństwa Działu Wsparcia Wdrożenia i Rozwoju ICAO, funkcjonująca w ramach Obszaru Ochrony Lotnictwa (Aviation Security Branch), zapewnia pomoc we wdrożeniu przez państwa SARPs zawartych w Załącznikach 9 i 17, dotyczących kwestii zabezpieczenia i ochrony ładunków lotniczych.

Światowa Organizacja Celna (World Customs Organization) została założona w 1952 r., jako Rada Współpracy Celnej (Customs Co-operation Council). Jej misją jest harmonizacja i standaryzacja procedur celnych oraz doskonalenie technik celnych w celu zwiększenia bezpieczeństwa i ułatwienia handlu międzynarodowego. WCO to środowisko, w którym władze krajowe mogą dzielić się doświadczeniem w zakresie polityk i przepisów, poszukiwać rozwiązań wspólnych problemów, określać standardy i dobre praktyki działania, a także koordynować politykę celną. Organizacja znana jest również ze swych działań w takich obszarach, jak opracowywanie globalnych standardów wspierających ułatwienia w handlu, klasyfikacja, wycena i określanie pochodzenia towarów, a także kwestie przestrzegania przepisów, bezpieczeństwo łańcuchów dostaw, ochrona zdrowia i bezpieczeństwa ludności, promowanie spójnych rozwiązań czy inicjatywy związane z trwałym rozwojem możliwości służb celnych.

WCO, gromadząca 179 krajów członkowskich, odpowiedzialnych za ponad 98% światowego handlu, chce być głosem służb celnych i światowym centrum doskonalenia, opracowującym skuteczne, wydajne i nowoczesne procedury oraz standardy celne, oparte na międzynarodowej współpracy, wymianie wiedzy, zasadach dobrego zarządzania i programach zwiększania potencjału. W ten sposób odgrywa niezwykle istotną rolę w spełnianiu potrzeb państw i społeczeństw, związanych z poprawą sytuacji społecznej i ekonomicznej na całym świecie (<http://www.wcoomd.org>) [400].

Światowy Związek Pocztowy (UPU)

Utworzony w 1874 r., na mocy Traktatu Berneńskiego, Światowy Związek Pocztowy (Universal Postal Union, UPU) to międzyrządowa organizacja z siedzibą w Bernie, w Szwajcarii. Statut i Regulaminy Związku określają zasady świadczenia usług pocztowych obowiązujące dla wszystkich 192 państw członkowskich. UPU służy jako podstawowe forum współpracy między rządami, organizacjami pocztowymi oraz innymi interesariuszami sektora pocztowego na całym świecie. Utrzymuje powszechną sieć, dostarczającą nowoczesne produkty i usługi, a także działa na rzecz zwiększenia wolumenu obsługiwanych przesyłek i poprawy jakości usług dla klientów. Krajowe sieci

pocztowe są ze sobą połączone poprzez wspólne regulacje, standardy i wykorzystywane technologie, co pozwala zachować spójność i stale doskonalić jakość oferowanych usług na całym świecie (<http://www.upu.int>) [401].

Międzynarodowa Federacja Zrzeszeń Spedytorów (FIATA)

Międzynarodowa Federacja Zrzeszeń Spedytorów (International Federation of Freight Forwarders Associations, FIATA) powstała 31 maja 1962 r. w Wiedniu. Obecnie FIATA jest czołową organizacją pozarządową działającą w obszarze transportu i logistyki, reprezentującą niemal 40 000 przedsiębiorstw z ponad 150 krajów, zatrudniających łącznie ok. 10 mln pracowników. Wśród członków federacji znajduje się 112 zrzeszeń mających prawo głosu oraz ponad 5600 członków indywidualnych. Dlatego właśnie FIATA jest najlepiej uprawniona do reprezentowania wyjątkowej pozycji firm spedycyjnych w globalnych łańcuchach dostaw. Wiedza oraz doświadczenie członków FIATA obejmują wszystkie aspekty międzynarodowego transportu i logistyki. Są one stale pogłębiane dzięki niezależnym programom szkoleniowym, prowadzonym w niemal 100 krajach (<http://fiata.com>) [402].

Światowe Stowarzyszenie Firm Kurierskich (GEA)

Światowe Stowarzyszenie Firm Kurierskich (Global Express Association, GEA) to organizacja pozarządowa reprezentująca czterech największych dostawców usług kurierskich: DHL Express, FedEx, TNT Express i UPS. GEA zostało założone w 1983 r. w Szwajcarii, jako International Express Carriers' Conference, i obecnie ma status obserwatora przy ONZ, UPU i WCO. Przedstawiciele GEA uczestniczą również w obradach kilku komisji i organów ICAO (<http://www.global-express.org>) [403].

Global Transport Organization (GTO)

Global Transport Organization to ogólnoświatowa sieć niezależnych międzynarodowych firm logistycznych. Członkami GTO są wysoko wykwalifikowani specjaliści działający w największych miastach na całym świecie. Kierownictwo GTO niezmiennie realizuje cel pozyskiwania i łączenia rzetelnych / godnych zaufania członków w ponad 140 krajach / ponad 750 miastach. Członkowie GTO to firmy cieszące się dużym uznaniem na swoich rynkach. Oferują oni pełny zakres usług logistycznych, wykorzystując w tym celu najnowocześniejsze technologie. GTO oferuje najlepsze rozwiązania dla eksporterów i importerów działających na całym świecie (<http://www.gtoglobal.com>) [404].

Rola regulacji na poziomie światowym w tworzeniu standardów kształcenia specjalistów w sektorze lotnictwa

Regulacje na poziomie ogólnoświatowym (opracowywane przez Organizację Międzynarodowego Transportu Lotniczego i inne organizacje światowe) umożliwiają tworzenie standardów dotyczących kształcenia (opartych na normach i zalecanych metodach postępowania ICAO oraz rekomendacjach innych organizacji międzynarodowych), koordynację działań i wymianę najlepszych praktyk. System zarządzania bezpieczeństwem ICAO opiera się na pełnym zaangażowaniu kierownictwa organizacji i obejmuje najważniejsze kierunki rozwoju lotnictwa – bezpieczeństwo, efektywność i wydajność. Według ICAO trzy główne elementy zabezpieczenia przed zagrożeniem zawarte w światowym systemie zarządzania bezpieczeństwem to regulacje, szkolenia i technologie [1].

5.1.2. Struktura regulacji lotniczych na poziomie regionalnym Unii Europejskiej – Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego (ECAC)

Europejska Konferencja Lotnictwa Cywilnego (European Civil Aviation Conference, ECAC) powstała w 1954 r. w Strasburgu, jako efekt wspólnej inicjatywy ICAO i Rady Europy. Podstawowym celem ECAC jest rozwój lotnictwa cywilnego w Europie poprzez koordynację i współpracę. Członkami ECAC jest 41 krajów (stan z sierpnia 2003 r.) (www.ecac-ceac.org). Organem zarządzającym ECAC jest Konferencja Plenarna, która spotyka się raz na trzy lata oraz podczas sesji dodatkowych, by omówić strategię działania i podjąć konieczne decyzje. Z kolei spotkania dyrektorów generalnych ECAC ds. Lotnictwa cywilnego odbywają się stosunkowo często i często mają charakter nieformalny. Ich celem są konsultacje lub reagowanie w nagłych sytuacjach. W ramach ECAC działają również liczne grupy robocze, zespoły zadaniowe oraz komisje eksperckie.

Konferencja wydaje uchwały oraz oświadczenia strategiczne ECAC, które mogą być uwzględniane przez państwa członkowskie podczas tworzenia krajowych regulacji. ECAC stanowi również forum dyskusji pomiędzy regionem europejskim i innymi regionami lub krajami, umożliwiając negocjowanie uzgodnień, umów i porozumień międzynarodowych (<https://www.ecac-ceac.org>) [405].

Agencja UE ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA)

EASA to Agencja UE ds. Bezpieczeństwa Lotniczego. Najważniejsze działania organizacji obejmują tworzenie strategii zarządzania bezpieczeństwem, certyfikację produktów lotniczych oraz nadzór działań licencjonowanych organizacji i krajów członkowskich UE. EASA, założona w 2002 r., prowadzi swoją działalność od 19 lat.

EASA cieszy się techniczną, finansową i prawną autonomią, która umożliwia jej zapewnienie najwyższego poziomu ochrony bezpieczeństwa obywateli UE, zarówno na terenie Unii, jak i na całym świecie; zapewnienie najwyższego poziomu ochrony środowiska; a także pozwala uniknąć powielania procesów regulacyjnych i certyfikacyjnych w poszczególnych krajach członkowskich, a w efekcie wspiera tworzenie wspólnego wewnętrznego unijnego rynku lotniczego.

EASA odgrywa także wiodącą rolę w realizacji zewnętrznej polityki lotniczej UE – jest silnym partnerem władz lotniczych innych krajów (np. USA, Kanady, Brazylii) oraz głównym promotorem europejskich standardów lotniczych na całym świecie, wspierającym eksport europejskich produktów, specjalistów oraz usług do innych krajów (<https://www.easa.europa.eu/the-agency>).

Podstawowy cel: utrzymanie jednolitego wysokiego poziomu bezpieczeństwa w Europie, poprzez:

- (1) Opracowanie wspólnych standardów technicznych dla lotnictwa;
- (2) Egzekwowanie tych standardów;
- (3) Utworzenie i działalność EASA.

Obszary obowiązywania standardów technicznych:

- projektowanie i produkcja statków powietrznych;
- wykorzystanie i obsługa techniczna produktów lotniczych oraz ich komponentów;
- organizacja i personel;
- wpływ na środowisko naturalne;
- służby zarządzania ruchem lotniczym;
- podstawowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa w portach lotniczych;
- podstawowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa w zarządzaniu ruchem lotniczym.

Obszary wyłączone:

- produkty i organizacje związane z żeglugą powietrzną;
- operacje wojskowe, celne i policyjne (<https://www.easa.europa.eu>) [406].

Europejska Organizacja ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej (EUROCONTROL)

EUROCONTROL, Europejska Organizacja ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej, to międzyrządowa organizacja zrzeszająca 41 krajów członkowskich, powołana do realizacji, wspólnie z

partnerami, projektu jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej, który umożliwi wdrożenie zarządzania ruchem lotniczym na poziomie XXI w.

Cele:

- Unifikacja europejskiej przestrzeni powietrznej poprzez bliską współpracę i koordynację działań
- Harmonizacja działań służb żeglugi powietrznej
- Wzmocnienie kompetencji regulacyjnych (od współpracy do integracji)
- Opracowywanie wspólnych standardów (por. ESARRs)
- Wdrożenie standardów poprzez procedury krajowe (por. standardy ICAO)
- Zwiększenie możliwości egzekwowania (<https://www.eurocontrol.int>) [407].

Stowarzyszenie Europejskich Linii Lotniczych (AEA)

Stowarzyszenie Europejskich Linii Lotniczych (Association of European Airlines, AEA) zrzesza 24 największych europejskich przewoźników. Organizacja wykorzystuje doświadczenie swoich członków, którzy spotykają się regularnie podczas tzw. spotkań ekspertów. AEA zapewnia swoim członkom wsparcie biznesowe, przybliżając im najistotniejsze kwestie lotniczo-polityczne i analizując ich wpływ na funkcjonowanie branży, rekomendując strategie, łącząc z interesariuszami, a także broniąc interesów linii lotniczych w procesach legislacyjnych, zarówno na poziomie europejskim, jak i krajowym.

Kluczowe cele AEA to:

- Promowanie roli lotnictwa w przyszłym rozwoju Europy;
- Wprowadzanie innowacji korzystnych dla klientów;
- Wkład w tworzenie lepszych, mądrzejszych i bardziej efektywnych kosztowo regulacji;
- Przyspieszenie realizacji projektu jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej (więcej w rozdziale 2.1.1);
- Dekarbonizacja lotnictwa;
- Zapewnienie warunków uczciwej konkurencji;
- Poprawa poziomu ochrony lotnictwa (<http://www.aea.be>) [408].

Międzynarodowa Rada Portów Lotniczych – region Europa (ACI-Europe)

Międzynarodowa Rada Portów Lotniczych – region Europa (Airports Council International-Europe, ACI-Europe) reprezentuje ponad 450 portów lotniczych z 45 krajów europejskich. W 2013 r. członkowie Rady obsłużyli ponad 90% komercyjnego ruchu lotniczego w Europie, czyli ponad 1,7 mld pasażerów, 16,8 mln t ładunków oraz 20,8 mln operacji lotniczych.

Członkami ACI-Europe są operatorzy portów lotniczych różnej wielkości, a także krajowe zrzeszenia portów lotniczych, partnerzy biznesowi oraz ośrodki naukowe – współpracujące aktywnie, by zapewnić skuteczną komunikację i ochronę interesów legislacyjnych, technicznych, środowiskowych, pasażerskich, komercyjnych i innych. Rada przewodzi i służy europejskiej branży portów lotniczych, a także współpracuje bardzo ściśle z innymi regionami ACI na świecie (<https://www.aci-europe.org>) [409].

Europejskie Stowarzyszenie Lotnictwa Biznesowego (EBAA)

Celem Europejskiego Stowarzyszenia Lotnictwa Biznesowego (European Business Aviation Association, EBAA) jest promowanie profesjonalizmu i dążenia do doskonałości wśród swoich członków, by umożliwić im utrzymanie najwyższego poziomu bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej, oraz reprezentacja ich interesów na wszystkich poziomach w Europie, by zapewnić właściwą ocenę znaczenia sektora lotnictwa biznesowego dla gospodarki europejskiej.

EBAA liczy ok. 500 członków i reprezentuje flotę ponad 1000 samolotów. Stowarzyszenie jest członkiem założycielem Międzynarodowej Rady Lotnictwa Biznesowego (IBAC), reprezentującej

interesy swoich członków w Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO). Najważniejsze wyzwania, z jakimi mierzy się EBAA, to projekt jednolitej europejskiej przestrzeni powietrznej, kwestie środowiskowe obejmujące handel emisjami, procesy regulacyjne Agencji UE ds. Bezpieczeństwa Lotnictwa (EASA) obejmujące takie aspekty, jak opłaty, bezpieczeństwo i ochrona czy dostęp do lotnisk i przestrzeni powietrznej.

Krajowe zrzeszenia, które są pełnymi członkami EBAA, to: BBGA (British and General Aviation Association), EBAA France, EBAA Switzerland, GBAA (German Business Aviation Association), IBAA (Italian Business Aviation Association), MBAA (Malta Business Aviation Association), NAOA (Norwegian Aircraft Operators Association) oraz RUBAA (Russian United Business Aviation Association). Niektóre organizacje, takie jak AESAVE Spanish Executive Aviation Association, ABAA (Austrian Business Aviation Association) czy EBAA Belgium oczekują obecnie na członkostwo w stowarzyszeniu (<http://www.ebaa.org>) [410].

European Cockpit Association (ECA)

European Cockpit Association (ECA) to stowarzyszenie europejskich pilotów linii lotniczych, działające na poziomie Unii Europejskiej. Reprezentuje ponad 38 000 pilotów zrzeszonych w organizacjach krajowych w 37 państwach europejskich. Dodatkowo ECA ma dwóch członków współpracujących spoza regionu europejskiego. Od czasu powstania wspólnego europejskiego rynku lotniczego transport lotniczy przestał podlegać wyłącznie prawodawstwu poszczególnych krajów. Unia Europejska wprowadza wspólne regulacje, które mają wpływ na pracę pilotów, we wszystkich obszarach lotnictwa, takich jak bezpieczeństwo, licencjonowanie załóg, operacje lotnicze, uczciwa konkurencja, międzynarodowe umowy o ruchu lotniczym, zarządzanie ruchem lotniczym, obsługa techniczna statków powietrznych, warunki zatrudnienia itd. Zgodnie z misją ECA jego najważniejszym zadaniem jest zapewnienie najwyższego poziomu bezpieczeństwa. Dlatego ECA wspomaga bezpieczny i zrównoważony rozwój branży transportu lotniczego w całej Europie, oparty na jasnych, jednolitych i możliwych do wyegzekwowania zasadach (<https://www.eurocockpit.be/pages/about-eca>) [411].

Na poziomie regionalnym następuje dostosowanie standardów szkoleń do regionalnych wymagań i warunków.

5.1.3. Regulacje lotnicze na poziomie krajowym

Krajowe regulacje w obszarze transportu lotniczego to regulacje wprowadzane przez państwo na swoim terytorium, w ramach sprawowania zwierzchnictwa nad tym terytorium i znajdującą się nad nim przestrzenią powietrzną. Dlatego krajowe regulacje obejmują zarówno krajowe, jak i międzynarodowe służby lotnicze, a także zarówno krajowych, jak i międzynarodowych przewoźników lotniczych. Krajowe regulacje dotyczące międzynarodowych służb lotniczych muszą uwzględniać międzynarodowe zobowiązania państwa, wynikające z dwustronnych i wielostronnych umów oraz uzgodnień, a także brać pod uwagę działania i obawy innych państw.

Szczegółowe założenia krajowych regulacji w obszarze międzynarodowych przewozów lotniczych mogą być różne w różnych krajach, w zależności od polityki ekonomicznej, wielkości i położenia, stopnia rozwoju, polityki wewnętrznej i zagranicznej itp. Zazwyczaj jednak założenia te obejmują jeden lub kilka poniższych celów:

- spełnianie wymagań transportowych związanych z handlem międzynarodowym;
- promocja określonych sektorów usług (np. turystyki);
- tworzenie miejsc pracy;
- zwiększenie wymiany międzynarodowej;
- spełnianie potrzeb systemu pocztowego;
- stworzenie warunków do rozwoju zdrowego, rentownego transportu lotniczego;
- wsparcie rozwoju narodowego;

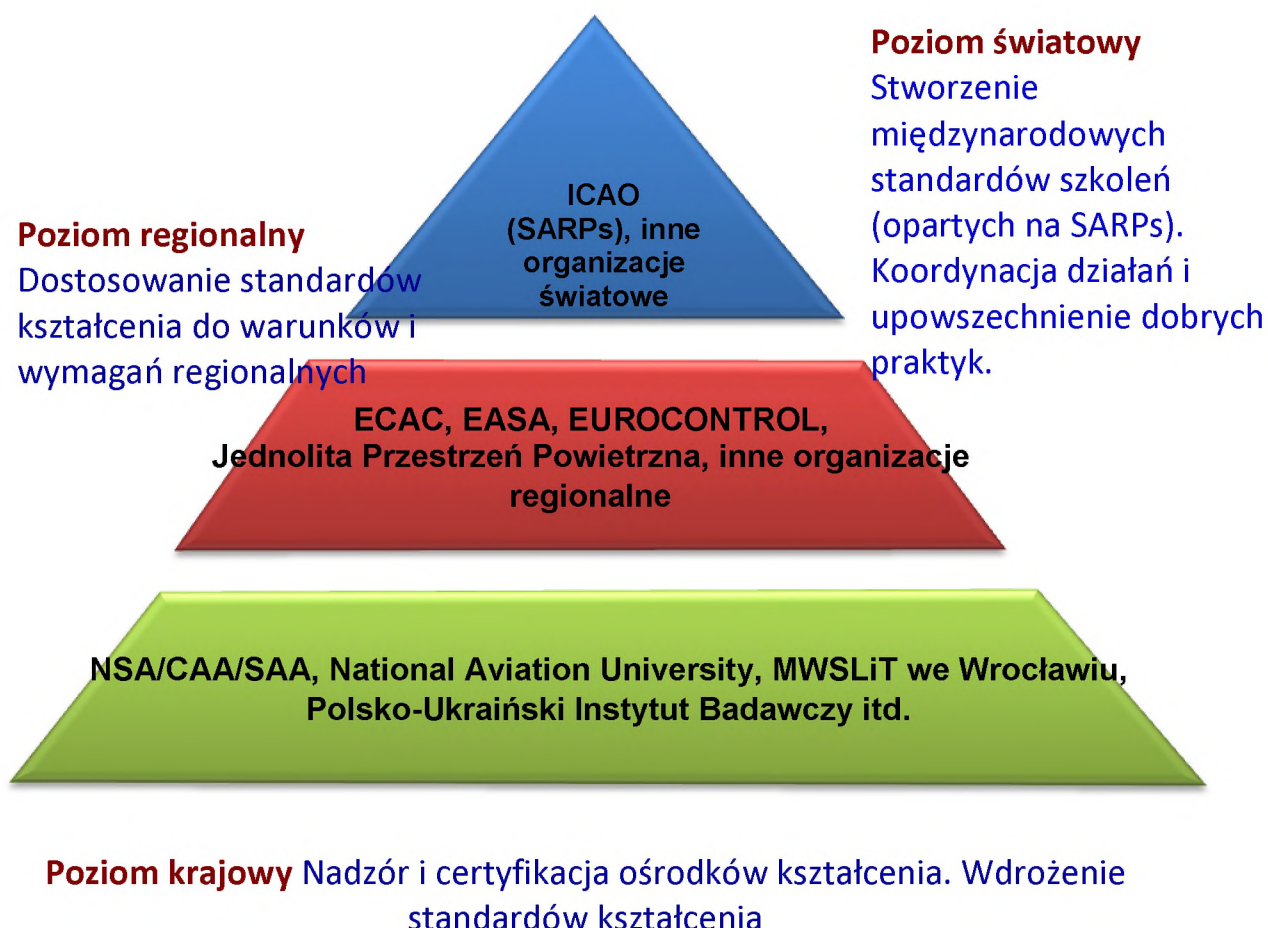
- wzmacnianie bezpieczeństwa narodowego;
- pomoc w przypadku katastrof naturalnych.

Proces tworzenia krajowych regulacji w obszarze transportu lotniczego obejmuje trzy podstawowe składniki:

- legislacyjny (tworzenie przepisów, polityk, zasad i regulacji);
- licencyjny (przyznawanie, warunkowanie, odmawianie lub odbieranie pozwoleń na wykonywanie długoterminowych i regularnych usług transportu lotniczego;
- zezwoleń jednorazowych (przyznawanie, warunkowanie, odmawianie lub odbieranie zezwoleń na wykonywanie pojedynczych lotów, wprowadzanie pojedynczych taryf itd.).

Elementem każdego z tych składników są działania wykonawcze, podejmowane w razie potrzeby [282].

Jednym z najważniejszych zadań realizowanych na poziomie krajowym jest kształcenie i szkolenie specjalistów w dziedzinie lotnictwa. Wykwalifikowany personel to podstawa bezpiecznych operacji lotniczych. Na poziomie krajowym odbywa się praktyczne wdrożenie standardów kształcenia. Warto przy tym podkreślić rolę wyższych uczelni i ośrodków naukowych, w tym National Aviation University w Kijowie i Międzynarodowej Wyższej Szkoły Transportu i Logistyki we Wrocławiu, w opracowaniu programów nauczania, szkoleń, technologii oraz regulacji [1].



Ilustracja 5.1. Poziomy kształcenia w lotnictwie. Globalny, regionalny i krajowy poziom kształcenia tworzą wspólną hierarchię i są wzajemnie spójne [1]

5.2. Najważniejsze aspekty kształcenia w specjalistów dziedzinie transportu lotniczego w National Aviation University

Spoleczne i ekonomiczne uwarunkowania XXI w., ogólnoswiatowy rozwój nauki, reorganizacja uniwersytetu, otwarcie nowych specjalizacji i kierunków kształcenia z jednej strony, oraz zaangażowanie wykwalifikowanych naukowców i wykładowców z drugiej umożliwiły głęboką restrukturyzację uniwersytetu, poszerzenie obszarów jego działania i rozpoczęcie kompleksowych badań oraz kształcenia w zakresie najważniejszych kwestii społecznych, ekonomicznych i humanitarnych. Szczególną uwagę naszych badaczy zwracają kwestie związane z nowoczesnymi technologiami informatycznymi i wykorzystaniem rozwiązań stosowanych w branży kosmicznej. Rozwój naukowy uniwersytetu to logiczna kontynuacja znaczących osiągnięć wcześniejszych pokoleń naszych naukowców.

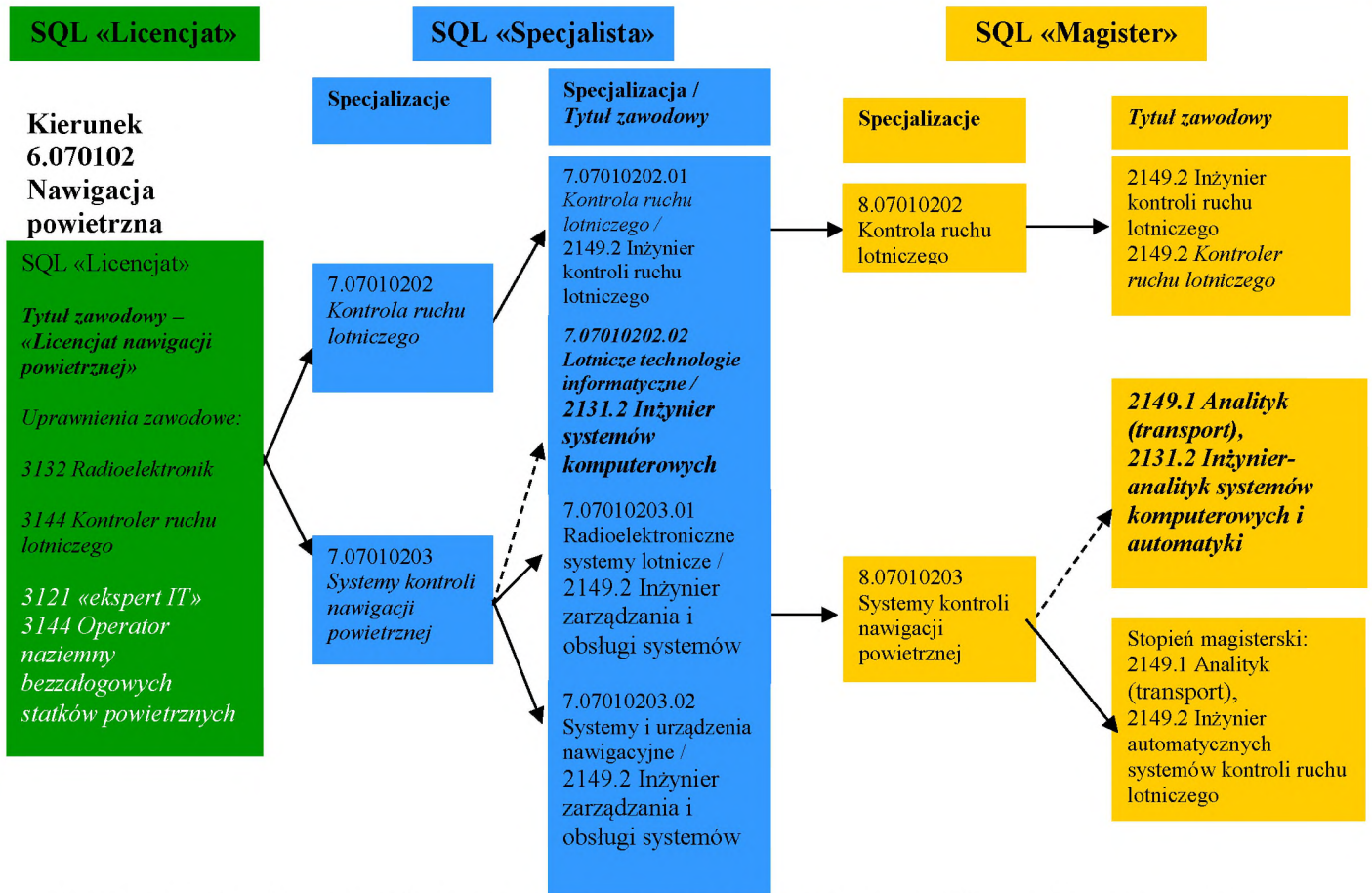
5.2.1. Najważniejsze aspekty kształcenia inżynierów transportu lotniczego w National Aviation University (1. i 2. stopień kształcenia)

National Aviation University (NAU – Krajowy Uniwersytet Lotniczy) to największa uczelnia lotnicza na Ukrainie i jedna z czołowych tego typu instytucji na świecie. W ciągu wielu lat istnienia uniwersytet wykształcił ponad 150 tysięcy specjalistów i magistrów oraz ponad 5 tysięcy doktorów w wielu dziedzinach nauki, ekonomii oraz technologii. Uczelnia wykształciła również tysiące zagranicznych specjalistów i naukowców. Obecnie na wszystkich wydziałach uniwersytetu studiuje ponad 50 tysięcy osób, w tym 1200 studentów zagranicznych z 44 krajów.

Uniwersytet współpracuje od wielu lat z Organizacją Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO). Dzięki temu w ramach uczelni funkcjonują dwa regionalne europejskie ośrodki szkoleniowe ICAO, oferujące szkolenia dla pracowników ukraińskich i międzynarodowych organizacji lotniczych. W obu ośrodkach wykorzystuje się powszechnie uznawaną metodologię TRAINAIR, opartą na normach i zalecanych metodach postępowania (SARPs) ICAO. National Aviation University uczestniczy również aktywnie w licznych programach międzynarodowych wraz z innymi uniwersytetami, ośrodkami kształcenia, stowarzyszeniami i przedsiębiorstwami. NAU współpracuje z ponad 100 instytucjami naukowymi i szkoleniowymi z Rosji, Niemiec, Francji, Polski, Hiszpanii, Azerbejdżanu, Białorusi, Litwy, Łotwy, Włoch, Gruzji, Wietnamu, Korei Południowej, Indii, Chin, Turcji oraz innych krajów [412].

Programy kształcenia oraz oferowane szkolenia obejmują liczne informacje praktyczne i oparte są na SARPs ICAO, dokumentach najważniejszych organizacji światowych (IATA, ACI, FIATA, GTO, UPU, WTO, GEA, IBAC IAOPA, IFALPA, TIACA, WCO, UPU, IFALPA itd.) oraz dokumentach organizacji regionalnych (Europejskiej Konferencji Lotnictwa Cywilnego – ECAC, Agencji UE ds. Bezpieczeństwa Lotnictwa – EASA, EUROCONTROL, AEA, ACI-Europe, EBAA, AECMA, ECA, ESA, GALILEO European Experts Network itd.) (więcej w rozdziale 5.1).

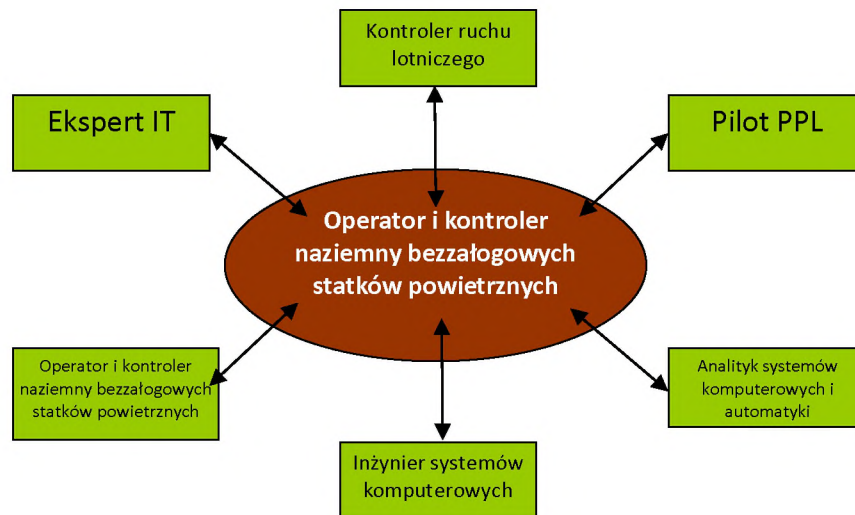
National Aviation University stale otwiera nowe specjalizacje, odpowiadając na zapotrzebowanie wywołane globalnymi trendami i tendencjami rozwojowymi w branży lotniczej. Na przykład w 2014 r. uniwersytet uruchomił kierunek obejmujący kształcenie naziemnych operatorów bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Studenci, którzy wybierają ten kierunek, uczestniczą nie tylko w zawodowych kursach obejmujących projektowanie, technologię i obsługę systemów bezzałogowych, ale również mają możliwość poszerzenia kwalifikacji informatycznych w zakresie programowania, administrowania systemami komputerowymi i badania takich systemów. Studia licencjackie na tym kierunku trwają 4 lata, a uzupełniające studia magisterskie – 1,5 roku (ilustracja 5.2).



Ilustracja 5.2. Kształcenie specjalistów w dziedzinie transportu lotniczego w National Aviation University (stopnie kształcenia 1, 2) [1]

W ramach swojego kursu operatorzy naziemni UAV mogą zdobyć następujące kwalifikacje:

- Eksperta IT.
- ATC/Pilota PPL – studenci zdobywają wiedzę teoretyczną i umiejętności praktyczne w zakresie organizacji i kontroli ruchu lotniczego. Program studiów obejmuje konstrukcję nowoczesnych systemów żeglugi powietrznej, nowe koncepcje zarządzania ruchem lotniczym, elastyczne wykorzystanie przestrzeni powietrznej oraz procedury służb ruchu lotniczego.
- Operatora i kontrolera naziemnego UAV – studenci mogą wykorzystywać i obsługiwać bezzałogowe statki powietrzne oraz ich składniki, co pozwala im zdobyć wiedzę na temat zarządzania systemami bezzałogowymi, ich wyposażenia i personelu obsługującego.
- Analityka systemów komputerowych i automatyki / inżyniera systemów komputerowych – studenci uczą się projektować, budować i obsługiwać systemy żeglugi powietrznej oraz ich składniki, zdobywając wiedzę potrzebną ekspertom i menedżerom prowadzącym procesy certyfikacyjne i zarządzającym systemami, wyposażeniem oraz personelem (ilustracja 5.3) [413, 414].



Ilustracja 5.3. Kwalifikacje ekspertów UAV [1]

5.2.2. Najważniejsze aspekty kształcenia inżynierów transportu lotniczego w National Aviation University (3. stopień kształcenia)

Nowoczesna strategia rozwoju naukowego i kształcenia naukowców

Najważniejsze zasady strategii rozwoju naukowego National Aviation University obejmują:

- maksymalne wykorzystanie zgromadzonego potencjału; utrzymanie i dalszy rozwój najważniejszych obszarów badawczych;
- stałe efektywne monitorowanie światowych osiągnięć naukowych (ze szczególnym uwzględnieniem osiągnięć związanych z lotnictwem);
- poszukiwanie i promowanie nowych obszarów badań, tworzenie i wspieranie środowiska dla badań informatycznych;
- reorganizację systemu zarządzania nauką; tworzenie nowych, bardziej efektywnych i mobilnych wydziałów naukowych, otwieranie instytutów naukowych skoncentrowanych na obszarach praktycznych;
- bliską współpracę z Narodową Akademią Nauk Ukrainy, innymi instytucjami naukowymi i departamentami, tworzenie wspólnych zespołów naukowych, angażowanie członków Narodowej Akademii Nauk jako wykładowców i badaczy NAU;
- produktywną współpracę z uczelniami i ośrodkami naukowymi na całym świecie;
- tworzenie odpowiednich warunków rozwoju kolejnych pokoleń młodych naukowców.

Budowa połączeń pomiędzy kształceniem i badaniami naukowymi opiera się na zrozumieniu znaczenia pracy badawczej w kontekście gospodarki rynkowej, zwiększaniu elastyczności programów projektowo-wdrożeniowych, a także ich związku z potrzebami rynku pracy, poprawie możliwości zatrudnienia absolwentów, a w konsekwencji, zwiększaniu roli szkolnictwa wyższego w rozwoju branż inżynierskich.

Koncepcje naukowe uniwersytetu obejmują następujące obszary: rozwój projektów naukowych i badawczych; tworzenie branżowych oraz międzybranżowych ośrodków i laboratoriów; szkolenia dla pracowników; organizacja wydarzeń naukowych i projektów badawczych; udział w priorytetowych programach badawczych.

Zespół naukowców National Aviation University określa swoje ścieżki rozwoju nie na podstawie sztucznie dokonanej selekcji obszarów i tematów, ale w odpowiedzi na realne potrzeby rozwojowe współczesnych społeczeństw, w których dominantą jest czynnik ludzki, a nie osiągnięcia technologiczne.

W ostatnim okresie struktura naukowa uniwersytetu stała się wyraźniejsza i bardziej zrównoważona. Jej najważniejsze obszary to:

- rozwój projektów badawczych;
- tworzenie ośrodków badań praktycznych i laboratoriów międzybranżowych;

- uczestnictwo w priorytetowych programach badawczych;
- organizacja i prowadzenie międzywydziałowych projektów badawczych;
- kształcenie wysoko wykwalifikowanych naukowców i specjalistów.

Obecnie uniwersytet prowadzi badania i kształcenie na następujących kierunkach:

- Metrologia, kontrola, diagnostyka;
- Bezpieczeństwo informacji;
- Specjalistyczne systemy komputerowe i technologie CALS;
- Modelowanie matematyczne i metody numeryczne;
- Technologie komputerowe;
- Nawigacja powietrzna;
- Lotnicze systemy monitorowania i zarządzania;
- Systemy automatycznej kontroli procesów;
- Zarządzanie złożonymi systemami technologicznymi;
- Modelowanie w systemach elektrycznych, elektronicznych i oświetleniowych;
- Systemy elektrodynamiczne i elektroniczne;
- Układy radioelektroniczne i awionika;
- Systemy wytwarzania energii;
- Zaawansowane trybotechnologie;
- Bezpieczeństwo lotu;
- Automatyzacja i oszczędność energii w branży transportowej;
- Projektowanie, obsługa i diagnostyka konstrukcji lotniczych;
- Inżynieria chemiczna, chimatologia i zastosowanie technologii chemicznych;
- Inżynieria miejska, przemysłowa, cywilna i transportowa;
- Projektowanie i architektura przemysłowa;
- Bezpieczeństwo ekologiczne i technotroniczne;
- Geodezja i systemy geoinformatyczne;
- Ekonomia i zarządzanie procesami biznesowymi w rozwoju przedsiębiorstw lotniczych;
- Wsparcie psychologiczne w lotnictwie;
- Angielski w lotnictwie i bezpieczeństwo lotu;
- Państwowe regulacje lotnicze i wsparcie prawne dla organizacji;
- Problemy prawne działalności gospodarczej w przestrzeni kosmicznej;
- Relacje międzynarodowe w kontekście światowego bezpieczeństwa: problemy i wyzwania;
- Logistyka i transport [412].

Oprócz kształcenia specjalistów i prowadzonych na szeroką skalę badań naukowych uniwersytet pełni również inną bardzo istotną funkcję – przygotowuje nowe pokolenia młodych ukraińskich naukowców. Pracując z wieloma uzdolnionymi studentami młodszych roczników, wykładowcy naszej uczelni mają możliwość wspierać rozwój ich wiedzy i umiejętności i w ten sposób tworzyć bazę dla przyszłych działań i sukcesów naukowych.

Kolejnym etapem przygotowania przyszłych naukowców są oferowane przez NAU studia doktoranckie dla absolwentów studiów magisterskich (3. stopień kształcenia). Dostępność wysoko wykwalifikowanych wykładowców ma istotny wpływ na kształcenie specjalistów, którzy budują przyszłość niezależnego i silnego państwa, kładącego ogromny nacisk na rozwój nauki.

National Aviation University prowadzi studia doktoranckie od 1951 r. W tym okresie ukończyło je ponad 6 tysięcy doktorów nauki – w dziedzinach takich jak lotnictwo, ekonomia, chemia czy inżynieria przemysłowa – zarówno z Ukrainy, jak i z 50 innych krajów. Są wśród nich sławni naukowcy, wykładowcy, wojskowi oraz specjaliści w innych obszarach, szefowie międzynarodowych przedsiębiorstw, organizacji i instytucji.

Ze względu na zwiększenie dostępności studiów doktoranckich, możliwe dzięki stałemu wzrostowi finansowania ze strony państwa, uczelnia stale rozszerza listę wydziałów, kierunków i specjalizacji otwieranych dla studentów chcących kontynuować karierę naukową.

Obecnie studia doktoranckie obejmują 59 specjalizacji, z których 33 to specjalizacje inżynierskie. Oceną prac doktorskich zajmuje się 14 wyspecjalizowanych komisji akademickich.

Kształcenie naukowców w National Aviation University odbywa się zgodnie z ukraińską ustawą o szkolnictwie wyższym (16.10.2012, N 5460-VI), dekretem ministerstwa o przyznawaniu stopni i tytułów naukowych (24.07.2013, N 567), rozporządzeniem o przygotowaniu nauczycieli akademickich i personelu badawczego (07.08.2013, N 538), a także regulaminem przygotowania nauczycieli akademickich i personelu badawczego w ramach studiów podyplomowych i doktoranckich, obowiązującym w NAU (29.05.2013, N 1126).

Europejski system kształcenia doktorantów jako studia trzeciego stopnia w procesie bolońskim

W początkowym okresie wdrożenia proces boloński skoncentrowany był przede wszystkim na wprowadzaniu i konsolidacji studiów na poziomie licencjackim i magisterskim w Europie. Kształcenie doktorantów, jako trzeci stopień, zostało formalnie dołączone do procesu podczas spotkania ministrów edukacji i nauki w Berlinie w 2003 r. i od tego momentu jego znaczenie stale rośnie.

Świadomi potrzeby promowania bliższych związków pomiędzy Europejskim Obszarem Szkolnictwa Wyższego (EHEA) oraz Europejską Przestrzenią Badawczą w budowie Europy wiedzy, a także znaczenia badań jako integralnej części europejskiego szkolnictwa wyższego, ministrowie uznali za niezbędne włączenie studiów doktoranckich do systemu bolońskiego, jako trzeciego stopnia kształcenia [417].

Europejski Obszar Badawczy (ERA) to uruchomiona w 2000 r. inicjatywa Unii Europejskiej, obejmująca około trzech czwartych spośród 46 krajów uczestniczących w tworzeniu EHEA. Jej główne założenia, takie jak stworzenie w Europie jednolitego obszaru wymiany wiedzy i badań, a także zwiększenie ogólnych nakładów na rozwój nauki, spowodowały zwiększenie zainteresowania ministrów rozwojem studiów doktoranckich.

W komunikacie z konferencji w Bergen w 2005 r. ministrowie podkreślili znaczenie badań i kształcenia naukowców, a także uznali potrzebę zwiększenia synergii pomiędzy szkolnictwem wyższym i obszarem badawczym [419].

Odnosząc się do studiów doktoranckich, ministrowie stwierdzili, że:

- przyznawanie stopni doktorskich musi się odbywać w zgodzie z ogólnymi zasadami przyznawania stopni naukowych EHEA, z wykorzystaniem metody opartej na osiągnięciach kandydata;
- podstawowym elementem kształcenia doktoranckiego jest postęp wiedzy osiągany dzięki oryginalnym projektom badawczym;
- program trzeciego stopnia studiów powinien w większości przypadku obejmować okres od 3 do 4 lat;
- programy studiów doktoranckich powinny promować kształcenie interdyscyplinarne i rozwój uniwersalnych umiejętności, by spełniać potrzeby szerokiego rynku pracy;
- należy zachęcać kandydatów na studia doktoranckie do rozpoczynania karier naukowych w ramach EHEA;
- uczestników kursów na trzecim poziomie kształcenia należy uznawać zarówno za studentów, jak i za naukowców rozpoczynających swoją karierę.

Nawiązując do działań Europejskiego Stowarzyszenia Uniwersytetów (EUA), ministrowie po raz kolejny podkreślili znaczenie studiów doktoranckich w procesie bolońskim podczas spotkania w maju 2007 r. w Londynie. W komunikacie z tego spotkania zwrócili uwagę na potrzebę zwiększenia dostępu do trzeciego poziomu kształcenia oraz poprawy statusu, perspektyw kariery i finansowania naukowców na początkowym etapie kariery, uznając je za warunki niezbędne do poprawy jakości i zwiększenia konkurencyjności europejskiego szkolnictwa wyższego [420].

Ministrowie zaprosili EUA do wspierania wymiany doświadczeń związanych z wprowadzaniem innowacyjnych kursów doktoranckich na europejskich uczelniach, a także z takimi kwestiami, jak transparentne metody rekrutacyjne, nadzór i procedury oceny oraz rozwój uniwersalnych umiejętności i zwiększanie możliwości zatrudnienia absolwentów studiów doktoranckich. W odpowiedzi EUA

powołało na początku 2008 r. Radę ds. Studiów Doktoranckich, jako forum wymiany dobrych praktyk i doskonalenia metod kształcenia doktorantów [416].

Rozumiejąc wartość i znaczenie zróżnicowanej oferty studiów trzeciego stopnia, musimy pamiętać jednak, że skuteczna reforma programów tych studiów, zgodna z założeniami systemu bolońskiego, wymaga pełnego zaangażowania organów zarządczych wyższych uczelni. Kształcenie doktorantów musi stać się kluczowym elementem planów strategicznych szkół wyższych, by zapewnić odpowiednią dostępność i warunki badań. Zarządzanie programami doktoranckimi na poziomie uczelni pozwala również zapewnić odpowiednią koordynację całego procesu kształcenia, obejmującego wszystkie trzy poziomy. Przyjmując odpowiedzialność za zapewnienie wysokiej jakości studiów doktoranckich, uczelnie w wielu krajach europejskich zaczęły rozwijać programy o innowacyjnej strukturze, integrujące różnego typu instytucje publiczne, organizacje, instytuty badawcze i przedsiębiorstwa.

Raport EUA Trends V pokazuje, że w wielu krajach istnieją już takie struktury, dostępne dla coraz większego grona doktorantów, gotowe do wykorzystania i dalszego rozwoju [421]. Właśnie stały rozwój szkolnictwa wyższego w skali europejskiej i w szerszej skali międzynarodowej jest fundamentalnym aspektem procesu bolońskiego.

By europejskie uczelnie stały się bardziej atrakcyjne i konkurencyjne, muszą uatrakcyjnić swoje programy kształcenia i otwierać je dla doktorantów z innych kontynentów, poszukiwać partnerów dla swoich programów badawczych wśród instytucji na całym świecie i zatrzymywać jak największą liczbę utalentowanych absolwentów, oferując im możliwości rozwoju i kariery.

Tylko umiędzynarodowione programy studiów doktoranckich, atrakcyjne dla studentów i uczelni partnerskich z innych krajów mogą naprawdę odpowiadać potrzebom współczesnego, zglobalizowanego świata. I choć mobilność studentów i naukowców jest dziś już zjawiskiem powszechnym, to w przypadku studiów doktoranckich wciąż toczy się debata o tym, w jaki sposób zachęcić ich uczestników do większej mobilności, w ramach ogólnych strategii rozwoju międzynarodowego instytucji naukowych.

W zależności od panujących zwyczajów i sposobów finansowania uczelni doktoranci mogą mieć status pracowników otrzymujących wynagrodzenie lub studentów pobierających stypendia.

Decyzja o uznaniu uczestników studiów doktoranckich za pracowników danej uczelni ma istotne znaczenie z punktu widzenia ich sytuacji finansowej, zabezpieczenia społecznego oraz perspektyw przyszłej kariery. Dlatego uniwersytety podejmują działania w celu zwiększenia atrakcyjności samych studiów i późniejszych badań w ramach uczelni, ale jednocześnie starają się przygotować absolwentów, którzy będą mieli szerokie możliwości rozwoju i kariery na uczelniach w całej Europie.

Przyznanie doktorantom statusu pracowników i początkujących naukowców zwiększa atrakcyjność studiów i ułatwia późniejsze funkcjonowanie ich uczestników na szerszym rynku pracy. Umiejętności przekrojowe – zdobyte „w praktyce” lub podczas specjalistycznych szkoleń, które coraz częściej włączane są do programów studiów doktoranckich – są przydatne zarówno w karierze naukowej, jak i w pracy w innych obszarach. To one pomagają absolwentom studiów doktoranckich znaleźć zatrudnienie także poza uczelniami i ośrodkami naukowymi.

Bardzo ważnym zadaniem staje się zatem uświadomienie potencjalnym pracodawcom, a także samym absolwentom studiów doktoranckich tego, w jaki sposób zdobyte przez nich wiedza i umiejętności przygotowują ich do różnych zawodów i funkcji. Skuteczna realizacja głównych europejskich celów związanych ze zwiększeniem znaczenia studiów doktoranckich, czyli reforma strukturalna, wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań i rozwój współpracy międzynarodowej, wymaga odpowiednich nakładów finansowych. W systemie potrzebne jest również wsparcie finansowe dla samych doktorantów, szczególnie jeśli ma ono zachęcać i wyrównywać szanse studentów z grup o niższych dochodach, realizując wymiar społeczny procesu bolońskiego.

Zapewnienie tego wsparcia wymaga od uniwersytetów pełnego zaangażowania w poszukiwanie nowych źródeł i możliwości finansowania. Jednym z rozwiązań, promowanych w systemie bolońskim, jest zatrudnienie doktorantów jako pracowników uczelni i wykorzystanie innowacyjnych metod finansowania, takich jak bliska współpraca z organizacjami biznesowymi, fundacjami oraz instytutami badawczymi.

Od czasu konferencji ministrów edukacji i nauki w Bergen w 2005 r., podczas której przyjęto „Europejskie standardy i wytyczne zapewnienia jakości w szkolnictwie wyższym”, jednym z głównych elementów procesu bolońskiego stało się zapewnienie jakości (quality assurance, QA) kształcenia. Obecnie agencje do spraw zapewnienia jakości (lub analogiczne instytucje) działają praktycznie we wszystkich krajach członkowskich UE (i w większości krajów EHEA), a jednym z głównych dokumentów stał się „Europejski rejestr zapewniania jakości w szkolnictwie wyższym”.

Wprowadzenie standardów zapewniania jakości oznacza znaczący postęp w procesie i w ogromnym stopniu przyczynia się do ogólnej poprawy poziomu szkolnictwa wyższego.

Jednak QA często koncentruje się na samym „procesie”, a nie na „zawartości”, czyli programie kształcenia, dlatego szczególnie w przypadku specjalizacji skierowanych na rozwój zawodowy (do których z pewnością należą przedmioty „inżynierskie”) coraz powszechniejsza staje się również „akredytacja” uczelni wyższych. W systemie bolońskim wyróżniamy dwa rodzaje akredytacji – „programową” oraz „instytucjonalną”. Oba te rodzaje jednak nie są ze sobą sprzeczne, ale raczej wzajemnie się uzupełniają.

W pozostałej części rozdziału omówimy dwie najnowsze inicjatywy w zakresie akredytacji programowej. Pierwszą z nich jest system EUR-ACE® wykorzystywany w „Europejskiej akredytacji programów inżynierskich” na poziomie studiów licencjackich i magisterskich, prowadzony przez ENAEE od 2006 r. Drugą jest powołany w listopadzie 2011 r. „Europejski sojusz na rzecz tematycznej akredytacji studiów zawodowych i zapewnienia jakości”, będący odpowiednikiem amerykańskiego „Stowarzyszenia wyspecjalizowanych i zawodowych jednostek akredytujących” [415].

Międzynarodowy projekt Tempus „Nowy model trzeciego stopnia kształcenia inżynierskiego w systemie bolońskim”

National Aviation University został członkiem międzynarodowego konsorcjum realizującego projekt w ramach programu Tempus, zatytułowany „Nowy model trzeciego stopnia kształcenia inżynierskiego w systemie bolońskim”, który przyjęto do wykonania w latach 2014–2016. Projekt jest współfinansowany ze środków Komisji Europejskiej. Celem projektu jest wprowadzenie na wybranych uczelniach pilotażowych programów doktoranckich studiów inżynierskich w systemie bolońskim, zgodnie z zasadami forum w Salzburgu i Bukareszcie.

Szczegółowe założenia projektu obejmują:

- opracowanie, wdrożenie i akredytację nowych uniwersalnych podstaw programowych, z uwzględnieniem zasad ECTS;
- przygotowanie nowej struktury studiów doktoranckich w obszarze docelowym, dostosowanej do wymagań rynku pracy;
- stworzenie innowacyjnego środowiska kształcenia / nauki w programach studiów doktoranckich;
- przybliżenie uczelni wyższych w krajach objętych projektem do rynku pracy.

Grupę docelową stanowią absolwenci, uczestnicy studiów doktoranckich, pozostali studenci, nauczyciele akademicy, naukowcy, kadra administracyjna, członkowie organów zarządczych wyższych uczelni, lokalne społeczności, pracownicy organów administracyjnych.

Realizacja projektu obejmuje następujące działania:

- ocenę istniejących programów studiów doktoranckich i opracowanie nowych modeli struktury tych programów;
- przygotowanie i akredytację nowych uniwersalnych podstaw programowych;
- stworzenie innowacyjnego środowiska kształcenia / nauki;
- powołanie biur wsparcia doktorów inżynierów na rynku pracy;
- wdrożenie i utrzymanie rozwiązań;
- kontrolę jakości.

Planowane wyniki i efekty projektu obejmują:

- 8 nowych uniwersalnych podstaw programowych; opracowanych, wdrożonych i akredytowanych;
- innowacyjne środowisko kształcenia i nauki obejmujące wspólną platformę internetową, pomieszczenia do prowadzenia zajęć, laboratoria i kursy letnie dla doktorantów, odpowiednio wyposażone, przetestowane i gotowe do działania;
- biura wsparcia dla doktorantów i naukowców na rynku pracy, działające na bazie wyników projektu pilotażowego;
- upowszechnienie wyników projektu.

A zatem najważniejsze cele projektu to opracowanie, wdrożenie, wymiana i akredytacja programów kształcenia, dostosowanych do systemu ECTS; wprowadzenie nowej struktury programów studiów doktoranckich w obszarze objętym projektem, dostosowanej do potrzeb lokalnych rynków pracy; przygotowanie odpowiedniego środowiska do prowadzenia studiów doktoranckich, zgodnego z wymogami systemu bolońskiego; a także pomoc w wejściu na rynek pracy dla absolwentów studiów doktoranckich, szczególnie w najważniejszych obszarach łączących naukę z technologią.

Dlatego właśnie projekt jest zgodny z ogólnymi priorytetami ukraińskimi w dziedzinie inżynierii, uwzględnia priorytety uniwersytetów w krajach partnerskich, ma na celu zreformowanie programów kształcenia, a także opracowanie i wdrożenie nowego modelu trzeciego stopnia kształcenia w obszarach technicznych. Przedsięwzięcie jest wynikiem analiz przeprowadzonych w krajach partnerskich, wskazujących na potrzebę zmian w programach studiów doktoranckich, jako konsekwencji reform wprowadzonych wcześniej w programach na pierwszym (studia licencjackie) i drugim (studia magisterskie) poziomie kształcenia. Ponieważ nasz kraj dołączył do systemu bolońskiego, musimy dostosować strukturę i programy naszych studiów doktoranckich do rozwiązań i regulacji obowiązujących w Europejskim Obszarze Wiedzy.

Analiza decyzji politycznych podjętych w ciągu ostatnich kilku lat wskazuje, że wszystkie kraje objęte projektem podzielają jego cele i założenia. Międzynarodowe konsorcjum projektowe składa się z 22 instytucji z 6 krajów, wśród których jest 14 uczelni wyższych, w tym 3 ukraińskie – National Aviation University, Kyiv Polytechnic Institute oraz Cherkasy State Technological University.

Członkowie konsorcjum projektowego realizują zróżnicowane potrzeby, istotne z punktu widzenia reprezentowanych przez nie interesariuszy i mają różne doświadczenie w zakresie projektów europejskich wdrażanych wspólnie przez instytucje naukowe i pozanaukowe.

Projekt będzie miał istotny wpływ na przebieg procesu modernizacji i reform, stymuluje rozwój zaangażowanych w niego uczelni, spełnia naukowe, zawodowe i społeczne potrzeby krajów uczestniczących, a także wspiera realizację ich społeczno-ekonomicznych i politycznych priorytetów. W ramach projektu uniwersytety w krajach partnerskich muszą opracować nowe programy i materiały kształcenia dla licznych innowacyjnych przedmiotów i kursów specjalistycznych, takich jak „Modelowanie i symulacja systemów”, „Nawigacja w systemach transportowych”, „Badania sensoryczne”, „Energoelektronika i systemy”, „Modelowanie matematyczne”, „Techniki obróbki obrazów satelitarnych”, „Systemy robotyczne” czy „Materiałoznawstwo i procesy zestalania”, a także uzyskać dla nich akredytację.

Metodologia projektu oparta jest na kilku najważniejszych zasadach. Przede wszystkim w projekcie reprezentowane są wszystkie poziomy kluczywych instytucji, w tym uczelnie wyższe i ministerstwa nauki. Istniejące w nim poziome i pionowe powiązania zapewniają wysoką jakość i efektywność realizacji planu. Plan ten obejmuje serię etapów, których wdrożenie przyniesie widoczne i wymierne rezultaty, wykorzystywane następnie na kolejnym etapie projektu.

Planowanie działań w ramach projektu zapewnia maksymalną efektywność i stabilność. Szczególnie istotnym elementem planu jest ogólne zarządzanie projektem i koordynacja działań wszystkich organizacji tworzących konsorcjum.

Ogromne znaczenie ma również opracowanie planu przyszłego rozwoju uczelni, obejmującego wprowadzenie nowych specjalizacji i obszarów badań powiązanych z tematem projektu, zasady komunikacji departamentów uczestniczących w projekcie z interesariuszami (w zakresie tematu projektu), takimi jak przedsiębiorstwa przemysłowe, instytucje badawcze czy inne uczelnie, którzy

mogą być zainteresowani zatrudnieniem absolwentów z tytułami naukowymi w jednej z dziedzin objętych projektem [418].

Zmiany w środowisku społeczno-ekonomicznym w XXI w., rozwój nauki na całym świecie, restrukturyzacja wielu wyższych uczelni i uruchamianie kolejnych nowych kierunków oraz specjalizacji, a także aktywność i zaangażowanie wysoko wykwalifikowanych specjalistów w wielu dziedzinach doprowadziły do znaczących zmian organizacyjnych w pracy uniwersytetu, poszerzenia spektrum zainteresowań i rozpoczęcia nowych badań obejmujących wiele aspektów nauk technicznych, a w konsekwencji – do reformy systemu kształcenia, obejmującej opracowanie i wdrożenie nowego eksperymentalnego modelu studiów doktoranckich w dziedzinach inżynierii i technologii lotniczych, zgodnego z systemem bolońskim [422].

Wysoka jakość kształcenia specjalistów w obszarze lotnictwa, oparta na wykorzystaniu programów autorskich podczas studiów każdego stopnia zapewnia uniwersytetowi znaczącą przewagę konkurencyjną na światowym rynku edukacyjnym.

5.3. Nowe technologie w kształceniu w dziedzinie transportu lotniczego w NAU

Nie sposób wyobrazić sobie procesu kształcenia specjalistów przez wyższą uczelnię techniczną bez wykorzystania na szeroką skalę innowacyjnych technologii.

Jak wspomnieliśmy, jednym z priorytetów współczesnego lotnictwa cywilnego jest budowa i zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych. W tym zakresie National Aviation University od wielu lat prowadzi prace związane z konstruowaniem i rozwijaniem zdalnie sterowanych systemów latających. W należącym do NAU centrum badawczo-rozwojowym „Virage” powstało kilka prototypów statków bezzałogowych, np. jednosilnikowe M-3 „Border” i M-6 „Skylark”, dwusilnikowe M-7, M-7D i M-7V5 „Sky Patrol”, drony (UAV) i systemy „Eye” napędzane silnikami elektrycznymi (patrz więcej rozdział 4.2; ilustracja 5.4). Maszyny te używane są obecnie dla celów szkoleniowych. W ten sposób badamy możliwość rozwiązywania problemów związanych z integracją, poszukiwaniem, rozpoznaniem i przetwarzaniem danych nawigacyjnych przesyłanych pomiędzy urządzeniami satelitarnymi i naziemnymi a urządzeniami pokładowymi systemów bezzałogowych. Eksperci NAU, wspólnie z naukowcami z Polsko-Ukraińskiego Instytutu Badawczego i Międzynarodowej Wyższej Szkoły Logistyki i Transportu, prowadzą liczne prace dotyczące oceny możliwości i efektywności systemów bezzałogowych, które służą rozwiązywaniu problemów logistycznych związanych z infrastrukturą terytorialną [320]. Specjaliści NAU doskonalią również awionikę systemów bezzałogowych [4].



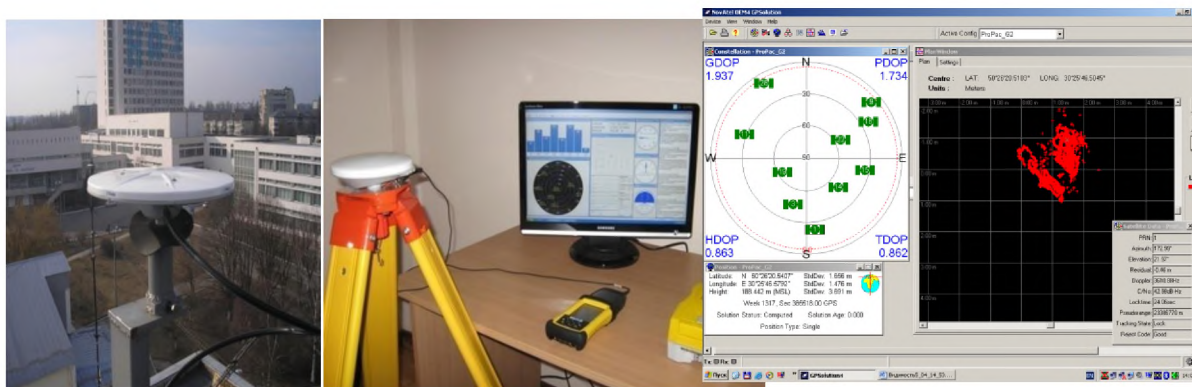
Ilustracja 5.4. Wielozadaniowe systemy bezzałogowe zbudowane w NAU [321]

Ważnym elementem kształcenia specjalistów w dziedzinie lotnictwa jest wiedza na temat nowoczesnych technologii satelitarnych. Dlatego w National Aviation University otwarto Centrum naukowo-szkoleniowe „Aerospace Center”. Centrum prowadzi teoretyczne, praktyczne i eksperymentalne projekty badawcze, a także szkolenia w zakresie technologii satelitarnych. Działania placówki ukierunkowane są na wdrożenie najnowszych odkryć naukowych, wykorzystujących innowacyjne rozwiązania technologiczne systemów satelitarnych oraz technologii informatycznych (ilustracja 5.5).

Najważniejsze zadania „Aerospace Center” obejmują:

- Monitorowanie działania systemów nawigacji satelitarnej GPS, EGNOS, GLONASS.

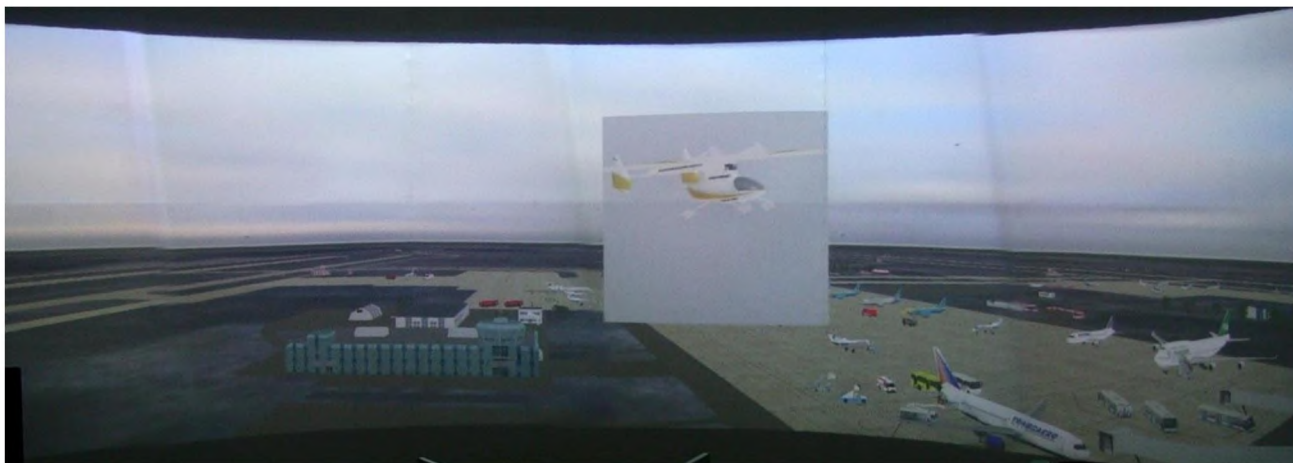
- Ochronę obiektów technologicznych przed zniszczeniem przez środki wyposażone w urządzenia nawigacji satelitarnej.
- Ocenę działania i doskonalenie zintegrowanego systemu obsługi informacji nawigacyjnych (GPS + EGNOS + GLONASS + inercyjne + LORAN).
- Badanie różnicowego systemu nawigacji satelitarnej.
- Pomiaru dokładności trajektorii w czasie rzeczywistym, w oparciu o dane na temat pozycjonowania pochodzące z różnicowych systemów nawigacji satelitarnej.
- Badanie dokładności danych systemów nawigacji satelitarnej podczas lotu, startu i lądowania.
- Analiza odporności systemów nawigacji satelitarnej na zakłócenia.
- Wykorzystanie systemów anten adaptacyjnych do redukcji zakłóceń w systemach nawigacji satelitarnej.
- Analiza algorytmów przetwarzania danych w systemach nawigacji satelitarnej.
- Monitorowanie integralności autonomicznych pokładowych urządzeń nawigacji satelitarnej.
- Monitorowanie i kontrola ruchu pojazdów na płycie lotniska.
- Monitorowanie pracy odbiorników satelitarnych oraz naziemnych stacji kontroli.



Ilustracja 5.5. Wyposażenie „Aerospace Center” [1]

Jednym z najważniejszych aspektów rozwoju technologii satelitarnych jest rozwiązanie problemu odpadów kosmicznych. Również w tym zakresie specjaliści NAU prowadzą kompleksowe badania. Przeanalizowali np. proces wykorzystania pomocy nawigacyjnych dla zwiększenia bezpieczeństwa serwisowych statków kosmicznych podczas podchodzenia do utylizowanego obiektu. Eksperti NAU opracowują także nową metodę kompleksowego przetwarzania danych uzyskanych z różnych systemów nawigacyjnych. W procesie tym przeanalizowali różne metody przetwarzania sygnałów wysyłanych i odbieranych w systemach nawigacji satelitarnej działających w niestabilnym środowisku radiowym. Dodatkowo prowadzą również badania nad zwiększeniem odporności radiowego sprzętu nawigacji satelitarnej na zakłócenia.

Kolejnym ważnym elementem kształcenia specjalistów w branży lotniczej są szkolenia na symulatorach. W związku z tym w NAU uruchomiony został kompleks symulatorów lotu i stanowisk kontroli lotów (patrz ilustracja 5.6 i rozdział 1.4.3).



Ilustracja 5.6. Ekran symulatora wieży kontroli lotów załogowych i bezzałogowych statków powietrznych [1]

Oprogramowanie symulatorów zawierające elementy sztucznej inteligencji zostało stworzone wspólnie przez naukowców i studentów NAU. Symulatory służą do:

- szkoleń w zakresie zarządzania ruchem lotniczym (ATM) dla studentów i personelu, na podstawie rzeczywistych sytuacji;
- szkolenia i testowania pilotów statków powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów latających.

Kompleks symulatorów ATM składa się z następujących elementów:

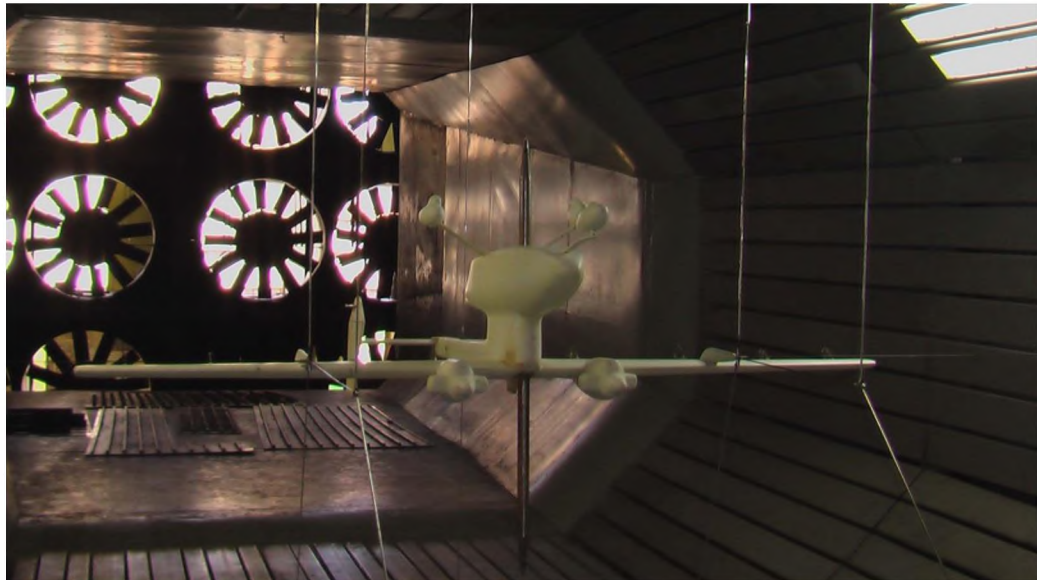
- symulatora wieży kontrolnej ATC;
- symulatora lotu UAV;
- symulatora lotu samolotem Yak-18T.

Symulator wieży kontrolnej ATC umożliwia:

- kompleksowe szkolenie kontrolerów ruchu lotniczego (ATC) oparte na symulacjach ruchu (statków powietrznych i pojazdów) w obszarze dozorowanym;
- testowanie kontrolerów ATC zgodnie z obowiązującymi regulacjami;
- testowanie technologii wykorzystywanych w wieży kontrolnej ATC.

Kompleks symulatorów powstał jako platforma badawcza przeznaczona do symulacji działania systemów kontroli lotów dla celów szkoleniowych i badawczych. Tworząc oprogramowanie symulatora, naukowcy NAU sięgnęli po wieloplatformowe rozwiązania typu open source. Z kolei do symulacji ruchu lotniczego w wysokiej rozdzielczości zastosowano nieliniowe dynamiczne modele lotu, a symulacje lotów wykorzystują możliwości sztucznej inteligencji. Przygotowując kompleks symulatorów, naukowcy stworzyli także aparat matematyczny i oprogramowanie do jego obsługi, umożliwiające prognozowanie oraz rozwiązywanie sytuacji konfliktowych w powietrzu.

Innym narzędziem umożliwiającym prowadzenie badań związanych z aerodynamiką i organizację szkoleń w tym obszarze jest działające przy NAU Centrum Badań Aerodynamicznych (ilustracja 5.7).

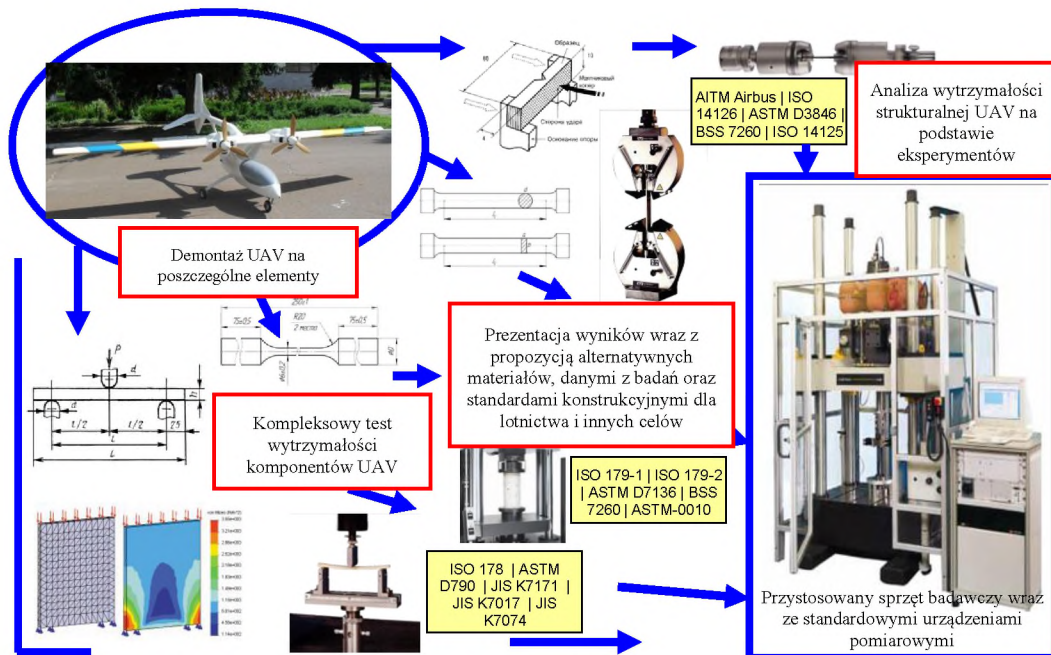


Ilustracja 5.7. Test aerodynamiczny UAV [1]

Naukowcy i studenci mogą korzystać również z następujących możliwości:

- projektowanie i budowa modeli;
- zaawansowane analizy i wykorzystanie danych;
- obliczanie stabilności i charakterystyk kontroli;
- modelowanie dynamiki lotów;
- projektowanie i budowa maszyn latających;
- projektowanie i budowa poddźwiękowych tuneli aerodynamicznych;
- szkolenie operatorów tuneli aerodynamicznych.

Wreszcie, ilustracja 5.8 przedstawia system testowania wytrzymałości komponentów bezzałogowych systemów latających, wykorzystywany przez badaczy i studentów podczas projektowania nowych typów UAV.



Ilustracja 5.8. System testowania wytrzymałości komponentów UAV [1]

Zakończenie

Doskonalenie narzędzi zarządzania transportem lotniczym to podstawa przyszłego rozwoju branży. Istotną rolę w tym procesie odgrywają działania wyższych uczelni i innych ośrodków kształcenia, np. połączone badania prowadzone przez National Aviation University z Kijowa i Międzynarodową Wyższą Szkołę Logistyki i Transportu z Wrocławia, w ramach Polsko-Ukraińskiego Instytutu Badawczego. Rezultatem tych badań są wspólne rekomendacje NAU, MWSLiT oraz Polsko-Ukraińskiego Instytutu Badawczego dotyczące wszystkich trzech poziomów regulacji lotniczych w zakresie procesu kształcenia inżynierów w branży lotniczej oraz zastosowania nowoczesnych technologii (patrz poniższa ilustracja) [423].



Ilustracja. Opracowanie światowych standardów kształcenia w obszarze lotnictwa

Poziom światowy. Stworzenie międzynarodowych standardów kształcenia (opartych na SARPs ICAO). Koordynacja działań i upowszechnienie dobrych praktyk.

Poziom regionalny. Dostosowanie standardów kształcenia do warunków i wymagań regionalnych (regulacje ECAC, EASA, EUROCONTROL, Jednolita Przestrzeń Powietrzna).

Poziom krajowy. Opracowanie nowych specjalistycznych programów kształcenia w obszarze transportu lotniczego (Stopnie kształcenia 1., 2., 3.). Wdrożenie światowych i regionalnych standardów kształcenia.

Powszechne wykorzystanie nowych technologii i rozwiązań w światowym systemie zarządzania transportem lotniczym to podstawa rozwoju całej branży lotnictwa cywilnego. Możemy jednak powiedzieć, że proces rozwoju lotnictwa nie zatrzymuje się nawet na moment. Stale pojawiają się nowe rodzaje ryzyka i zagrożenia, nieustannie zmieniają się ramy prawne i regulacyjne. W takich okolicznościach zasadne wydaje się mówienie o systemie ciągłego doskonalenia zarządzania transportem lotniczym. System ten powinien łączyć naukowców, ekspertów, specjalistów i wykładowców ze wszystkich krajów członkowskich ICAO.

Mamy nadzieję, że nasza monografia będzie kolejnym krokiem w kierunku poprawy bezpieczeństwa, efektywności i regularności operacji światowego systemu lotnictwa cywilnego.

Bibliografia

1. Kharchenko V., Bugayko D., Foriash M. New Technologies in the Global AeroSpace Engineering Education. Logistics and Transport – Wrocław: Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu. – 2014. – №4 (24). – s. 37 – 44.
2. Peter Jacobs. 12 Reasons Why Flying Is The Safest Way To Travel. Dostępne na: <<http://www.businessinsider.com/flying-is-still-the-safest-way-to-travel-2013-7?op=1>>.
3. ICAO Strategic Objectives 2014-2016. Dostępne na: <<http://www.icao.int/about-icao/pages/strategic-objectives.aspx>>.
4. Kharchenko V., Bugayko D., Bo W.. Fundamentals of Safety and Efficiency of the Next Generation Unmanned Aircraft Systems. Protokoły szóstego światowego kongresu «Aviation in the XXI-st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 23–25 września 2014, Kijów/NAU. – Kijów, 2014. – t. 2. – s. 2.29–2.35.
5. Safety Management Manual (SMM): ICAO, Doc 9859 AN/460 (wydanie trzecie) – Montreal: ICAO, 2013. – 251 s.
6. ICAO Safety Report (Wydanie 2014). – Montreal: ICAO, 2014. – 35 s.
7. Bugayko D., Kulyk M., Iliencko O., Safety of Aviation in Global Context of the World Air Transport Development Proceedings of the NAU. – K.: NAU, 2013. – №3. – P. 112–117.
8. FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2015-2035 (OK 15-0814). Dostępne na: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/aviation_forecasts/aerospace_forecasts/2015-2035/media/FAA_Aerospace_Forecasts_FY_2015-2035.pdf+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua.
9. Outlook for Air Transport to the Year 2025: ICAO, CIR 313/ AT 134 – Montreal: ICAO, 2007. – 57 s.
10. Airbus Global Market Forecast 2012 – 2031, Airbus 2012. Dostępne na: <http://www.airbus.com/company/market/forecast/%3FeID%3Ddam_frontend_push%26docID%3D26347+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>.
11. ICAO Safety Report (Wydanie 2013) – Montreal: ICAO, 2013. – 28 s.
12. 37th ICAO Assembly – Declaration on Aviation Security. Dostępne na: <<http://www.icao.int/Security/Documents/Bahrain/ICAO%20Declaration%20on%20Aviation%20Security.pdf>>.
13. IATA Security Management Systems (SEMS) for Air Transport Operators (Executive Summary, March 2011). Dostępne na: <http://www.iata.org/whatwedo/security/Documents/SeMS_ExSumm_March2011.pdf+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>.
14. A. Wald, Sequential Analysis, John Wiley & Sons, Inc, Nowy Jork, 1947.
15. Global aviation safety plan. – Montreal, Kanada. – czerwiec 2009. – 23 s.
16. Reva A.N. Human factor and flight safety: (Research of proactive influence) : monografia / A.N. Reva, K.M. Tymishev, A.A. Bekmuhmambetov; opieka naukowa A.N. Reva, K.M. Tymishev. – Ałanty, 2006. – 242 s.
17. Kharchenko V.P. Solution taking by air-navigation system operator: monografia / V.P. Kharchenko, T.F. Shmeluova, Y.V. Skirda. – Kirovograd: KFA NAU, 2012. – 292 s.
18. ICAO: Safety Management Manual (SMM): Doc. ICAO 9859 – AN / 474. – Montreal, Kanada, 2009.
19. Fomenko Y.M. Risk triangle in system analysis of ait traffic controllers professional activity / Y.M. Fomenko // Problems of informatization and control: scientific digest. / Ministerstwo Edukacji i Nauki Ukrainy, National Aviation University. – K.: NAU, 2006. – № 3. – s. 147–151.
20. Reva O.M. Proactive risk management on basis of human factor in civil aviation / O.M. Reva, S.I. Osadchiy, O.M. Medvedenko, Y.M. Fomenko // Railroad transport of Ukraine: theoretical and practical magazine, 2008. – № 6. – s. 54–59.
21. Zadeh L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: tłumaczenie z jęz. angielskiego. N.I. Ringo / K. Zadeh; wyd. N.N. Moiseeva, S.A. Orlovskogo. –

- M.: Mir, 1976. – 165 s.
22. Kaufman A. Introduction into fuzzy set theory: tłumaczenie z jęz. francuskiego. V.B. Kuzmina/ A. Kaufman; wyd. S.I. Travkina. – M.: Radio and communications, 1982. – 432 s.
 23. Polojenets G.A. Exploitation factors influence on the flight safety taking into account their interaction [maszynopis]: streszczenie pracy doktorskiej 05.22.20, National Aviation University. – K.: NVF Slavutich-Delphi, 2013. – 20 s.
 24. ICAO: Threat and Error Management (TEM) in Air Traffic Control : Cir. ICAO 314 – AN / 178. – Montreal, Kanada, 2008.
 25. Introduction to Safety Management Systems for Air Operators [Tekst]: Advisory Circular No 120-92, FAA USA, 2006.
 26. Sharov V.D. About some mathematical and logical restrictions for risk matrices appliance in the flight safety management system [tekst] / V.D. Sharov// Biuletyn naukowy MGTU GA Air transport exploitation series. – M.: MGTU GA, 2009. – № 149. – s. 179–181.
 27. Mushik E. Technical solutions acceptance methods [tekst]: tłumaczenie z jęz. niemieckiego V.M. Ivanova / E. Mushik, P. Miller. – M.: Mir, 1990. – 208 s.
 28. Cox L. What's Wrong with Risk Matrices? [tekst] / L. Cox // Risk Analyses, t. 28, No 2, 2008, s. 497–512.
 29. Levashov S.P. Professional risk expert estimation method [tekst] / S.P. Levashov// Lifeware safety: scientifically-practical and educationally-methodical magazine, 2009. – № 1 (97). – s. 14–16.
 30. Adler Y.P. Experiment planning while searching for optimal conditions [tekst] / Y.P. Adler, E.V. Markova, Y.V. Granovskiy. – M.: Nauka, 1976. – 278 s.
 31. Reva O.M. Estimation scales point fuzzyfication/defuzzyfication procedure [tekst] / V.V. Kamishin, O.M. Reva, L.M. Makarenko, O.M. Medvedenko // Electronics and control systems: magazyn naukowy. – K.: NAU-print, 2012. – № 3 (33). – s. 53–62.
 32. Berj K. Graph theory and its appliance [tekst]: tłumaczenie z jęz. francuskiego / K. Berj. – M.: IL, 1962. – 320 s.
 33. Bloomberg V.A. Which solution is better? Priorities rearrangement method [tekst] / V.A. Bloomberg, V.F. Glushchenko. – L.: Lenizdat, 1982. – 160 s.
 34. Reva A.N. Urgent area of ICAO „risk triangle” solution proactive models development / A.N. Reva, V.I. Vdovichenko, S.P. Borsuk [i in.] // Modern transport power-plants, technologies and maintenance equipment: 4 ukraińska konferencja teoretyczna i praktyczna. – Kherson, 9-11 października 2013, – Kherson: HDMA, 2013. – s. 334–338.
 35. Chinchenko Y.V. Risks and threats estimation on the air traffic controller's workplace with help of fuzzy sets / Y.V. Chinchenko // National aviation university bulletin: scientific magazine. / Ministerstwo Nauki i Edukacji Ukrainy, National Aviation University – K.: NAU-print, 2011. – № 2. – s. 44–49.
 36. Dubois D. Fuzzy sets and systems – Theory and applications. / D. Dubois, H. Prade; Academic press, Nowy Jork, 1980. – 393 s.
 37. Reva O.M. Fuzzy model of air traffic controller attitude to risk of potentially conflict situation happening / O.M. Reva, S.P. Borsuk // Ministerstwo Nauki i Edukacji Ukrainy, National Airspace University im. M.E. Zjukovskiya «HAI». – H., 2013. – № 10 (107). – s. 214–221.
 38. Reva O.M. Air traffic controllers pretension level with workload parameters / O.M. Reva, B.M. Mirzoev, P.S. Mukhtarov, S.S. Nasirov// Air-space technique and technology: theoretical practical magazine. / Ministerstwo Nauki i Edukacji Ukrainy, National Airspace University im. M.E. Zjukovskiya «HAI». – H., 2013. – № 8 (105). – s. 273–281.
 39. Kharchenko V., Borsuk S., Reva O. Multiplication of Air Accidents Frequency and Hazard Desirability Coefficients for ICAO Safety Risk Tolerability Matrix Solution // Logistics and Transport. – 2015. – № 1(25). – s. 63–70.
 40. Bugayko D., Safety and Effectiveness of Civil Aviation in Conditions of Air Traffic Globalization // Protokoły V Światowego Kongresu «Aviation in the XXI-st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27 września 2012, Kijów / NAU. – Kijów, 2012. – t. 2. – s. 3.1.26–3.1.28.

41. Eurocontrol flight movement forecasts to 2019. Dostępne na: <http://centreforaviation.com/analysis/eurocontrol-flight-movement-forecasts-to-2019-go-east-young-man-100117>.
42. Current Market Outlook 2013-2032, Boeing Commercial Airplanes, Seattle, 2013.
43. Chynchenko, Yu. V. Outlines of operational risk assessment with ARMS methodology. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „AVIA-2013”. 2013. t. 2. s. 8.41–8.44.
44. Guide to Methods & Tools for Safety Analysis in Air Traffic Management. USA, GAIN Working Group B. 2003.
45. Kharchenko V., Chynchenko Yu. Concept of air traffic flow and capacity management in European region. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 3. s. 7–12.
46. Kharchenko V., Chynchenko Yu. Integrated risk picture methodology for air traffic management in Europe. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 1. s. 15–19.
47. Kharchenko V.P., Chynchenko Yu. V. Principles of Eurocontrol air navigation system safety assessment methodology. Materiały XI międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej „AVIA-2013”. 2013. t. 2. s. 8.13–8.16.
48. Kharchenko V.P., Chynchenko Yu. V. Integrated safety management system in air traffic services. Materiały NAU. – 2014. – № 1(58). – s. 6–10.
49. Milestone Deliverable D1: Air Transport Framework – The Current Situation – DLM-0602-001-03-00. Bruksela: Eurocontrol, 2006 – 72 s.
50. Milestone Deliverable D2: Air Transport Framework – The Performance Target – DLM-0607-001-02-00. Bruksela: Eurocontrol, 2006 – 100 s.
51. Milestone Deliverable D3: ATM Target Concept – DLM-0612-001-02-00. Bruksela: Eurocontrol, 2007 – 108 s.
52. Milestone Objective Plan D4: ATM Deployment Sequence – MGT-0506-004-03-00. Bruksela: Eurocontrol, 2008 – 163 s.
53. Milestone Objective Plan D5: ATM Master Plan – MGT-0506-005-03-00. Bruksela: Eurocontrol, 2008 – 123 s.
54. Milestone Objective Plan D6: Work Programme for 2008-2013 – MGT-0506-006-03-00. Bruksela: Eurocontrol, 2008 – 124 s.
55. ICAO Global Air Traffic Management Operational Concept (Doc 9854). Montreal: Kanada (ICAO), 2005. – 82 s.
56. Regional supplementary procedures (Doc 7030). Montreal: Kanada (ICAO), 2005. – 302 s.
57. Global air navigation plan (Doc 9750). Montreal: Kanada (ICAO), 2005. – 125 s.
58. Kharchenko V., Bugayko D., Chynchenko Y., Babeichyk D.. The Principles of Single European Sky Program Implementation in Ukraine. Materiały National Aviation University. – Kijów, 2009. – № 4(41). – s. 9–13.
59. EUROCONTROL Seven-Year Forecast February 2015 – 2021. Dostępne na: <https://www.eurocontrol.int/articles/forecasts>.
60. Air traffic flow & capacity management operations. 2011. ATFCM user’s manual. Bruksela, Eurocontrol. 106 s.
61. EUROCONTROL Medium-Term Forecast. Flight Movements 2011-2017. Bruksela, Eurocontrol, 2011. 70 s.
62. EUROCONTROL Two-Year Forecast. Flight Movements 2012-2014. Bruksela, Eurocontrol, 2012. 21 s.
63. General & CFMU systems. 2011. Bruksela, Eurocontrol. 65 s.
64. Integrated initial flight plan processing system. 2011. IFPS user’s manual. Bruksela, Eurocontrol. 488 s.
65. PRR 2010. Performance Review Report. An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2010. Bruksela, Eurocontrol, 2011. 277 s.
66. PRR 2011. Performance Review Report. An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2011. Bruksela, Eurocontrol, 2012. 128 s.
67. Kharchenko V., Chynchenko Y. Concept of Air Traffic Flow and Capacity Management in

- European Region. Materiały NAU. – 2013. – № 3(56). – s. 7–12.
68. 2004 Baseline Integrated Risk Picture for Air Traffic Management in Europe. Bruksela, Eurocontrol, 2004. 52 s.
 69. Accident and Incident Data for the 2012 Integrated Risk Picture for Air Traffic Management in Europe. Bruksela, Eurocontrol, 2005. 15 s.
 70. Air Traffic Management Model for the 2012 Integrated Risk Picture for Air Traffic Management in Europe. Bruksela, Eurocontrol, 2006. 28 s.
 71. ATM Operational Concept Volume 2: Concept of Operations. Bruksela, Eurocontrol, 2005. 237 s.
 72. IRP: Influencing Factors Mathematical Processing, EEC Note XXX/05. Bruksela, Eurocontrol, 2005. 12 s.
 73. Main Report for the 2012 Integrated Risk Picture for Air Traffic Management in Europe. Bruksela, Eurocontrol, 2006. 125 s.
 74. Operational Concept Document Volume 1: The Vision, 12 stycznia 2004. Bruksela, Eurocontrol, 2004. 45 s.
 75. Chynchenko Yu. 2010. Information processing models in air traffic control. Materiały IV Kongresu Światowego „Aviation in the XXI-st century”. „Safety in aviation and space technology”. Kijów, National Aviation University: 21.5–21.8.
 76. Akimaru H., Kawashima K. Teletraffic – Theory and Applications, Springer-Verlag London, wyd. 2. 1999. 240 s.
 77. EUROCONTROL. ADS-B Sites. 2012. Dostępne na: <http://www.eurocontrol.int/ads_b_sites/>, <<http://www.eurocontrol.int/surveillance/cascade>>.
 78. Flood, J.E. Telecommunications Switching, Traffic and Networks. Nowy Jork, Prentice-Hall. 1998. 283 s.
 79. Iridium-Adds-ADS-B-to-its-Iridium-NEXT-Constellation. 2012. Dostępne na: <<http://www.aviationtoday.com/the-checklist/76558.html>>.
 80. Iridium Satellites. 2008. Dostępne na: <<http://www.highspeedsat.com/iridium-satellite.php>>.
 81. Kennedy I.G. Traffic Simulation. School of Electrical and Information Engineering, University of the Witwatersrand. 2003. 167 s.
 82. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. b. Modeling of Satellite Channel for Transmission of ADS-B Messages. Materiały National Aviation University. 2012. Nr 3. s. 9–14.
 83. Manual for ICAO Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service Part 2-Iridium Draft V4.0. 2007. 77 s. Dostępne na: <http://legacy.icao.int/anb/panels/acp/wg/m/iridium_swg/>.
 84. Manual on Detailed Technical Specifications for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN). Doc. 9880-AN/466.
 85. Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). RTCA. Inc. 2002. DO-242A.
 86. Penttinen A. Introduction to Teletraffic Theory. Helsinki University of Technology. 1999. 189 s.
 87. Kharchenko V., Bo W., Grekhov A., Kovalenko M. Investigation of ADS-B Messages Traffic via Satellite Communication Chanel. Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). – s. 7–14.
 88. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE® Journal on Selected Areas in Communications. 1998. 16(8). s. 1451–1458.
 89. Alamouti S.M., Tarokh V., Poon P. Trellis-coded modulation and transmit diversity. Design criteria and performance evaluation. Materiały Międzynarodowej Konferencji na temat Uniwersalnych Środków Komunikacji Osobistej IEEE (ICUPC'98). Florencja, Włochy. 1998. T. 1. s. 703–707.
 90. An Introduction to Aircraft Satellite Tracking. 2009. Dostępne na: <http://www.indigosat.com/marketing/About_satellite_tracking.pdf>.
 91. Gong Y., Letaief K.B. Concatenated space-time block coding with trellis coded modulation in fading channels. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2002. 1(4). s. 580–590.
 92. Manual on Detailed Technical Specifications for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN). Doc. 9880-AN/466.
 93. Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance-

- Broadcast (ADS-B). RTCA. Inc. 2002. DO-242A.
94. Osborne W.P., Xie Y. Propagation Characterization of LEO/MEO Satellite Systems at 900-2100 MHz. Protokoły Konferencji. 1999. Dostępne na: <http://opensiuc.lib.siu.edu/ece_confs/52>.
 95. Saleh A.A.M. Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers. IEEE Trans. Communications. 1981. 29(11). s. 1715–1720.
 96. Tarokh V., Jafarkhani H., Calderbank A.R. Space-time block codes from orthogonal designs. IEEE Transactions on Information Theory. 1999. 45(5). s. 1456–1467.
 97. US Patent 5345599. Increasing capacity in wireless broadcast systems using Distributed Transmission/Directional Reception (DTDR). 1994.
 98. US Patent 5515378. Spatial division multiple access wireless communication systems. 1996.
 99. Kharchenko V., Bo W., Grekhov A., Kostynska J. Modeling of ADS-B messages transmission via satellite using MIMO systems. Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). s. 15–21.
 100. Aviation Today. 2012. Dostępne na: <http://www.aviationtoday.com/the-checklist/Iridium-Adds-ADS-B-to-its-Iridium-NEXT-Constellation_76558.html>.
 101. Bobrovskiy D.G. 1992. Low-orbital Satellite Communication Systems. Networks. Nr 4: 73–79 (tekst rosyjski).
 102. Diakonov V.P. 2005. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5+SP1 + Simulink 4/5. Processing of Signals and Images. Complete User's Guide. Moskwa, Solon-Press. 592 s. (tekst rosyjski).
 103. Diatlov A.P. 1997. Satellite Systems for Communication with Moving Objects. Manual. Part 1. Taganrog. 95 s. (tekst rosyjski).
 104. Kantor L.Y., Povolotskii I.S. 1994. Systems of Personal Mobile Communication Using Low-orbital Satellites. Bulletin of Communications. Nr 11: 61–65 (tekst rosyjski).
 105. Konkov A.M. 1994. Prospects for Development of Low-orbital Satellite Communication Systems. Bulletin of Communications. Nr 1: 34–38.
 106. Manual For ICAO Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service Part 2-Iridium Draft t. 4.0, 2007. 77 s.
 107. Kharchenko V., Kondratiuk V. Aerospace Navigation Technologies in Logistics. Logistics and Transport. – 2015. – № 2(26). – s. 5–10.
 108. Viterbi A. 1971. Convolutional Codes and Their Performance in Communications Systems. IEEE Trans. Commun. Technol. Nr 5: 751–772.
 109. Kharchenko V., Barabanov Y., A. Grekhov, M. Bogunenko, J. Rudnyk. Error-Control Coding of ADS-B Messages for Iridium Satellites. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 4 (57): 7–11.
 110. Baddeley A. Going Forward with JTRS. Military Information Technology. 2005. 9(7). s. 8–13.
 111. Cioni S., Corazza G.E., Neri M., Vanelli-Coralli A. On the use of OFDM radio interface for satellite digital multimedia broadcasting systems. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2006. 24(2). s. 153–167.
 112. Jeon W.G., Chang K.H., Cho Y.S. An equalization technique for orthogonal frequency-division multiplexing systems in time-variant multipath channels. IEEE Transactions on Communications. 1999. 47(1). s. 27–32. doi:10.1109/26.74781.
 113. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. Modeling of ADS-B Data Transmission via Satellite. Aviation. 2013. 17(3). s. 119–127.
 114. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. Modeling of Aviation Telecommunications. Materiały National Aviation University. 2012. Nr 1. s. 5–13 (tekst ukraiński).
 115. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. Modelling of 'Satellite-To-Aircraft' Link for Self-Separation. Transport. 2013. Nr 28(4). s. 120–128.
 116. Roque D., Siclet C. Performances of Weighted Cyclic Prefix OFDM with Low-Complexity Equalization. IEEE Communications Letters. 2013. Nr 17(3). s. 439–442. doi:10.1109/LCOMM.2013.011513.121997.
 117. Sagias N., Zogas D.A., Karagiannidis G.K., Tombras G.S. Burst Timing Synchronization for OFDM-based LEO and MEO Wideband Mobile Satellite Systems. VII Międzynarodowe Warsztaty nt. Technologii Przetwarzania Sygnałów Cyfrowych w Łączności Kosmicznej. 2001.

118. Kharchenko V., Bo W., Grekhov A., Bezsmertna D. Investigation of Modulation Scheme and Transmitter Nonlinearity Impact on ADS-B Messages Transmission via OFDM Satellite Link. *Materiały NAU*. – 2014. – № 3(60). – s. 7–14.
119. An Introduction to Aircraft Satellite Tracking. 2009. Dostępne na: <[http://www.indigosat.com/marketing/About satellite tracking.pdf](http://www.indigosat.com/marketing/About%20satellite%20tracking.pdf)>.
120. Comparetto G. Satellite Communications: Current Features and Future Trends. Conference Proceedings. Anaheim Convention Center. Anaheim, Kalifornia. 1996. Rozdział N ICS35.4. s. 22–24. Dostępne na: <<http://www.docstoc.com/yaadocs/90747335/SATELLITE-COMMUNICATIONS-CURRENT-FEATURES-AND-FUTURE-TRENDS>>.
121. Elbert B., Elanix M. Simulating the Performance of Communication Links with Satellite Transponders. 2003. Dostępne na: <http://www.applicationstrategy.com/Communications_simulation.htm>.
122. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. Modeling of Aviation Telecommunications. *Materiały National Aviation University*. 2012. Nr 1. s. 5–13.
123. Kharchenko V.P., Barabanov Y.M., Grekhov A.M. Modeling of ADS-B Data Transmission via Satellite. *Aviation*. 2013. Nr 17(3). s. 119–127.
124. Roddy D. Satellite Communications. The McGraw Hill Companies, Inc. Wyd. 4. 2006. 656 s.
125. The Satellite Industry Association. 2012. Dostępne na: <<http://www.sia.org/>>.
126. Kharchenko V., Bo W., Grekhov A., Stahovskyi P. Computer Modeling of Radio Frequency Sattelite Transponder for Transmission of ADS-B Messages Satellite Communication Channel. *Materiały NAU*. – 2014. – № 4(61). – s. 14–20.
127. Aircraft-to-Satellite Links Suitable for Transmitting USDA Forest Service Infrared Forest Fire Data. 2003. Dostępne na: <http://nirops.fs.fed.us/docs/upload/USFS_satcom_report.pdf>.
128. Castanet L. 2011. Numer specjalny, ‘Channel modeling and propagation impairment simulation activities within the SatNEx project’. *International Journal of Satellite Communication Network*. 29: 1–6.
129. Communications Blockset, Hamming Encoder/ Decoder. 2012. Dostępne na: <<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/commblocks>>.
130. Costello D., Hagenauer J., Imai H., Wicker S. 1998. Applications of Error-Control Coding. *IEEE Transactions on Information Theory* 44: 2531–2560.
131. Elbert B., Elanix M. 2003. Simulating the Performance of Communication Links with Satellite Transponders. Dostępne na: <http://www.applicationstrategy.com/Communications_simulation.htm>.
132. Huffman W., Pless V. 2003. Fundamentals of Error-Correcting Codes. Cambridge. 202 s.
133. Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27: 379–423.
134. The Satellite Industry Association. 2012. Dostępne na: <<http://www.sia.org/>>.
135. Kharchenko V., Barabanov Y., Grekhov A., Bogunenko M., Rudnyk J. Performance Analysis of „Aircraft to Satellite-to-Ground” Link Using Forward Error Correction. *Materiały National Aviation University*. 2013. Nr 1 (54): 7–14.
136. CASCADE | EUROCONTROL [źródło elektroniczne] – 04.02.2013 – Sposób dostępu: <<http://www.eurocontrol.int/surveillance/cascade> – The name from screen>.
137. Calculation methods in electrodynamics [tekst] / wyd. R. Mitra. – M.: Mir, 1977. – 488 s.
138. Barabanov Yu.M. Field whip antenna mounted on the body of the aircraft [tekst] / Yu.M. Barabanov, V.O. Ivanov, O.A. Morhun, I.I. Cherniavskiy. *Electronics and control systems*. – 2007. – №3(13). – s. 88–95.
139. Mathematical modeling of metal structures for measuring antenna characteristics [Tekst] // Raport z badań naukowych NAU № 006-ДБ01-03, etap 3 (końcowy) – K.: NAU, 2003. – 86 s.
140. Goncharenko I.V. Antenna HF and VHF. Part IV. Directional HF antennas: in-phase and longitudinal radiation [tekst] / I.V. Goncharenko // – M.: IP RadioSoft, 2007. – 256 s.
141. Kharchenko V., Barabanov Yu.M., Grekhov A.M., Tereshchenko D.I. Research of Collinear Antenna Parameters for ADS-B Receiving System Using Numerical Methods – *Materiały National Aviation University*. 2013. Nr 2 (55): 13–20.

142. Action Plan 23: Long term ADS-B and ASAS Applications. 2008. FAA/EUROCONTROL cooperative R&D. D3 – Operational Role of Airborne Surveillance in Separating Traffic. 105 s.
143. Chaloulos G., Roussos G.P., Lygeros J., Kyriakopoulos K.J. 2009. Mid and Short Term Conflict Resolution in Autonomous Aircraft Operation. Bretigny-sur-Orge, France, 6 s. [Materiały VIII Warsztatu i Wystawy Badań Innowacyjnych, grudzień 2009. Bretigny-sur-Orge, Francja, 2009].
144. Chepizhenko V., Kharchenko V., Pavlova S. 2013. Synergy of Piloted, Remotely Piloted and Unmanned Air Systems in Single Air Navigation Space, *Logistics and transport* 2(18): 77–82.
145. Chepizhenko V.I., Pavlov V.V., Pavlova S.V. 2012. Virtual Einsteinian force fields in a synergy of navigating space of difficult ergatic systems, *Materiały National Aviation University* 3: 15–27.
146. Eby M.S. 1994. A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts, *The Lincoln Laboratory Journal* 7(2): 239–254.
147. Einstein A., Infeld L. 1965. *Physics evolution*. Moskwa: SCIENCE. 296 s. (tekst rosyjski).
148. Flightpath 2050. 2011. Europe's Vision for Aviation, Report of the High-Level Group on Aviation Research. Luksemburg: Publikacje Biura Unii Europejskiej. 32 s.
149. Haken H. 1991. *The information and self-organization: the macroscopic approach to difficult systems*. Moskwa: Mir. 240 s. (tekst rosyjski).
150. Hwang I., Tomlin C.J. 2002. Protocol-based conflict resolution for air traffic control. USA, Stanford: Department of Aeronautics and Astronautics Stanford University. 49 s.
151. Kharchenko V., Prusov D. 2012. Analysis of unmanned aircraft systems application in the civil field, *Transport* 27.(3): 335–343.
152. *Modern applied theory of control: the synergetic approach in the control theory. cz. II*. 2000. [wyd. A.A. Kolesnikov]. Taganrog: Publishing house TRTU. 559 s. (tekst rosyjski).
153. Prigozhin I., Kondepuri D. 2002. *Modern thermodynamics. From thermal engines to dissipative structures*. Moskwa: Mir. 464 s. (tekst rosyjski).
154. Sage A., Mels Dj. 1976. *The estimation theory and its application in communication and control*. Moskwa: Svyaz. 495 s. (tekst rosyjski).
155. Zakora S.A. 2006. Group conflict situations resolution on free routes in terms of the guaranteed level of safety: dis. ... of candidate of technical Sciences: 05.22.13. 141 s. (tekst ukraiński).
156. Kharchenko V., Chepizhenko V., Pavlova S., Bo W. Innovative Concept of Synergetic Air Traffic Management under Polyconflict. *Aviation*. 2014. 18(4) – s. 185–192.
157. *Airspace model simulation of the Luxembourg TMA*. Bruksela, Eurocontrol. 1997. 35 s.
158. *Capacity Assessment & Planning Guidance. An overview of the European Network Capacity Planning Process*. Bruksela, Eurocontrol. 2007. 56 s.
159. Chynchenko Yu. 2011. Influence the SESAR concept upon air traffic services in European region. *Materiały National Aviation University*. Nr 3: 31–35.
160. *Kerkira TMA analysis*. Bruksela, Eurocontrol. 1997. 35 s.
161. Kharchenko V.P., Chynchenko Yu.V. 2012. Air traffic control uncertainty factors during single the person operations. *Materiały V Kongresu Światowego „Aviation in the XXI-st century”*. „Safety in aviation and space technology”. Kijów, National Aviation University: 3.1.1–3.1.5.
162. Menon P.K., Sweriduk G.D., Bilimoria K.D. 2004. New Approach for Modeling, Analysis, and Control of Air Traffic Flow. *Journal of guidance, control, and dynamics*. Nr 5: 737–744.
163. *Review note on ATFCM performance assessment*. Bruksela, Eurocontrol. 2008. 34 s.
164. Kharchenko V.P., Chynchenko Yu.V. Principles of Improvement of Air Traffic Flow and Capacity Management in Terminal Control Areas under Uncertainty Conditions. *Materiały National Aviation University*. 2013. Nr 4 (57): 12–17.
165. ED-133: The First Flight Object Interface Definition, Belgia, Bruksela, EUROCONTROL, 2009.
166. CAP739: Flight Data Monitoring, the UK, Norwich, UK Civil Aviation Authority, 2013.
167. Description of Services. CS2: 4D Trajectory Calculation for Planning Purposes (4DPP), Belgia, Bruksela, EUROCONTROL, 2013.
168. PANS-ATM (Doc 4444), Kanada, Montreal, 2012.
169. Kharchenko V., Luppó O., Bo W., Argunov G., Vasyliiev D., Raksha K. Analysis Of The Flight Object Concept. *Materiały National Aviation University*. 2015. Nr 2(63): 7–11.

170. Vasyliiev D.V. Model of multi-objective selection of trajectories for aircraft conflicts resolution. Systems of information processing. – Kharkiv: KhUAF, 2013. – Nr 4 (111). – s. 85–88 (tekst ukraiński).
171. Kharchenko V., Vasyliiev D. Analysis the procedure of multi-objective aircraft trajectories selection at conflict resolution. Biuletyn naukowy Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2014. – № 201. – s. 15–22 (tekst rosyjski).
172. Vasyliiev D.V. Multi-objective synthesis of conflict-free aircraft trajectories. Science-based technologies. – 2014. – № 1. – s. 37–40 (tekst ukraiński).
173. Vasyliiev D.V. Mathematical model of controlled aircraft motion for analysis of air navigation service processes. Systems of arms and military equipment. – 2013. – № 2. – s. 63–67 (tekst ukraiński).
174. Kharchenko V., Bo W., Vasyliiev D. Simulation Of The Multi-Objective Resolution Of Aircraft Conflict. Materiały National Aviation University. 2015. Nr 1(62): 7–11.
175. Campos L., Marques J. 2011. Collision Probabilities, Aircraft Separation and Airways Safety. Prof. Max Mulder. Aeronautics and Astronautics. 610 s.
176. Elefante S. 2001. Statistical and probabilistic approach for improving efficiency in Air Traffic Flow Management. Dysertacja. Wydział inżynieryjny University of Glasgow. 241 s.
177. Eurocontrol Metrics & Methodologies Safety Metrics Technical Definitions CARE-INTEGRA Raport dla Eurocontrol. Bruksela, 2000. 19 s.
178. Masato K., Dr. Masato F. 2008. Safety Assessment prior to 30NM Longitudinal Separation Minimum under ADS-C Environment. Montreal, Kanada. ICAO. 5 s.
179. Moek G., Smeltink J.W. 2005. Pre Implementation Collision Risk Assessment for RVSM in the Africa Indian Ocean Region. National Aerospace Laboratory – Air Traffic and Navigation Services. 133 s.
180. Netjasov F. 2010. Conflict risk assessment model for airspace strategic planning. Division of Airports and Air Traffic Safety. Belgrad, Serbia. 16 s.
181. Netjasov F., Milan Janic A. 2008. Review of the Research on Risk and Safety Modeling in Civil Aviation. III Międzynarodowa Konferencja nt. Badań w Transporcie Lotniczym. 8 s.
182. Thompson, S.D. 1997. Terminal Area Separation Standards: Historical Development, Current Standards, and Processes for Change. Project Report ATC-258. Springfield, Virginia. Lincoln Laboratory of Massachusetts Institute of Technology. 60 s.
183. Kharchenko V., Alexeiev O., Tapia K. Collision Probability of Aircraft Flying on Parallel Tracks. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 1 (54): 26–30.
184. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. Dostępne na: <<http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>>.
185. GARMIN eTrex. Dostępne na: <<http://www.hwp.ru/Satellite/Garmin. etrex/index.html>>
186. ICAO Załącznik 10. t. IV. Aeronautical Telecommunications – Surveillance and Collision Avoidance Systems, Wyd. 4, lipiec 2007. Dostępne na: <http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard_page/ACAS_ICAO_Provisions.html#manual>.
187. Livadasy C., Lygerosz J., Lynch N.A. High-Level Modeling and Analysis of the Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS). Dostępne na: <<http://people.csail.mit.edu/clivadas/pubs/IEEE00.pdf>>.
188. Dane NMEA. Dostępne na: <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>.
189. PANS-ATM. Procedures for Air Navigation Services – ICAO Doc. 4444. Wyd. 15 2007-ATM/501. Dostępne na: <http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard_page/ACAS_ICAO_Provisions.html#manual>.
190. PANS-OPS. Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations – tom I Flight Procedures – ICAO Doc. 8168 OPS/611, Wyd. 5 – 2006 plus Poprawka 3. Dostępne na: <http://www.eurocontrol.int/msa/public/standard_page/ACAS_ICAO_Provisions.html#manual>.
191. Radio Technical Commission for Aeronautics (SC-147). Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II) Airborne Equipment, Tech. Rep. RTCA/DO-185A, RTCA, Dec. 1997, Specifications of TCAS II wersja 7.0.

192. Radio Technical Commission for Aeronautics (SC-147). Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (TCAS II) Airborne Equipment, Tech. Rep. RTCA/DO-185, RTCA, wrzesień 1990, Wydanie ujednolicone, Specifications of TCAS II-6.04a.
193. Radio Technical Commission for Aeronautics (SC-147). Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) I Functional Guidelines, Tech. Rep. RTCA/DO-184, RTCA, maj 1983, Specifications of TCAS I.
194. Wi-Fi Research Center. Dostępne na: <<http://www.networkworld.com/topics/wi-fi.html>>.
195. Kharchenko V., Barabanov Y., Grekhov A., Shishkov F.. Modeling of Airborne Collision Avoidance System Performance. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 3 (56): 13–17.
196. Belogorodskiy S. 1972. Automating the management of aircraft landing: tutorial. Moskwa, Transport. 352 s. (tekst rosyjski).
197. Pyatin A. 1994. Flight Dynamics and piloting of the aircraft TU-154: tutorial. Moskwa, Air Transport. 192 s. (tekst rosyjski).
198. ICAO Annex № 6 Operation of Aircraft. 2010. Montreal. 270 s.
199. ICAO Doc. 8168 OPS/611 Flight Procedures, Aircraft Operations tom I. 2006. Montreal, 386 s.
200. ICAO Doc. 9365 AN/910 Manual of All Weather Operation. 2006. Montreal. 86 s.
201. Official Journal of the European Union. 2008. All weather operations. część E OPS 1.430. 238 s.
202. Kharchenko V., Tapia K., Shvets O. Assessment of Acceptable Range of Aircraft Lateral Deviations on the Approach Phase. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 2 (55): 12–26 (tekst ukraiński).
203. DSTU 2681-94. Government system of measurement unity providing. Metrology. Terms and definitions. Kijów, Derzhstandart. 1995. 54 s. (tekst ukraiński).
204. ISO 5725-1. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Część 1: General principles and definitions.
205. ISO 5725-2. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Część 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.
206. ISO 5725-4. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Część 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method.
207. ISO 5725-6. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Część 6: Use in practice of accuracy values.
208. Larin V.J. Math analyses of experimental researches results of ferromagnetic transducer output signal shape. Radioelectronic and computer systems. Charków, Kharkiv Aviation Institute. 2008. t.1. s. 36–40 (tekst rosyjski).
209. Larin V.J., Kvasnikov V.P., Chichikalo N.I. Investigation of ferromagnetic transducer in NI LabView program application. Materiały Engineering Academy of Ukraine. Kijów, National Aviation University. 2008. s. 42–48 (tekst rosyjski).
210. Vaysband M.D., Pronenko V.I. The technique of the metrological works implementation. Kijów, Tehnika. 1985. 156 s. (tekst rosyjski).
211. Volodarskii E.T., Kosheva L.O. Statistical data processing. Kijów, National Aviation University. 2008. 308 s. (tekst ukraiński).
212. Rabiner L., Gould B. Theory and application of digital signal processing. Moskwa, Mir. 1978. 848 s. (tekst rosyjski).
213. Kharchenko V., Larin V., Savitskaya I. The methodics of signal type identification accuracy with hardware tools. Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). – s. 22–27.
214. Afonskii A.A., Diakonov V.P. Digital analyzers of signal spectrum and logic. Moskwa, Solon-Press. 2009. – 247 s. (tekst rosyjski).
215. Ishanin G.G., Pankov E.D., Andreev A.L. Sources and receivers of interference Moskwa, Mir, 1991. – 240 s. (tekst rosyjski).
216. Ivaniuka I.D., Ribalka V.I., Rudomina-Desiatska I.A. The elements of theory of probabilities and mathematic statistic. Kijów, Slovo. 2003. – 272 s. (tekst ukraiński).

217. Mazda F.F. Electronic instruments and measurement techniques. Moskwa, Mir. 1990. – 535 s. (tekst rosyjski).
218. Neganov V.A., Yarovoi G.P. The theory and application of VHF devises. Moskwa, Radio i sviaz. 2006. – 720 s. (tekst rosyjski).
219. Shrufer E., Babak V.P. Signal processing: digital processing of discrete signals. Kijów, Libed. 1992. – 216 s. (tekst ukraiński).
220. Vasin V.A., Vlasov I.B., Egorov U.M. Information technology in radiotechnique systems. Moskwa, MGTU Bauman. 2003. – 672 s. (tekst rosyjski).
221. Ventcel E.S., Ovcharov L.A. The theory of random processes and its engineering applications. Moskwa, Nauka. 1991. – 384 s. (tekst rosyjski).
222. Volodarskii E.T., Kosheva L.O. Statistical data processing. Kijów, National Aviation University. 2008. – 308 s. (tekst ukraiński).
223. Kharchenko V., Larin V., Savitskaya I. The Accuracy Measurement of Hardware Tools Metrological Characteristics for Spectral Fractions Signal Identification. Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). – s. 76–81.
224. World Wide CNS/ATM Systems Implementer // ICAO, Konferencja RIO 1998.
225. Demystifying CNS/ATM // Raport Grupy Roboczej CANSO CNS/ATM, Wersja końcowa. czerwiec 1999.
226. ICAO Circular 9750-AN/963, 2007 (wersja rosyjska).
227. Hoekstra J., Ruigrok R., Gent R. 2000. Free Flight in a Crowded Airspace? – Neapol: 3. Seminarium Zarządzania Ruchem Lotniczym USA/Europe, 13-16 czerwca.
228. Cloerec A., Zeghal K., Hoffman E. 1999. Traffic Complexity Analysis To Evaluate The Potential For Limited Delegation Of Separation Assurance to the Cockpit. – IEEE Trans: 5.A.5-1 - 5.A.5-8.
229. EUROCONTROL. Long-Term Forecast of Flights (2004–2025). 2004. 32 s.
230. Kryzhanovskiy G.A. 1984. Introduction to Applied Theory of Air Traffic Management. Moskwa. Engineering. 364 s. (tekst rosyjski).
231. Zaitsev Yu.V. 2002. Comparison of lexical-semantic interaction in specialist terminology for air control and monitoring communication. Materiały NAU. Nr 3 (14): s. 92–94 (tekst ukraiński).
232. Zaitsev Yu.V. 2008. Expert evaluation and mathematical modeling of time delays in controller-pilot communication and interaction. Materiały Engineering Academy of Ukraine. Nr (1): s. 12–15 (tekst ukraiński).
233. Babak V.P., Kharchenko V.P., Zakharash M.P., Matyuha O.V., Makarenko M.V., Panchenko V.M., Zaitsev Yu.V., Zaharchevska I.K. Patent of Ukraine 65512. Method of determining professional competence to use different (other) languages under emotional stress 15.09.2004. (tekst ukraiński).
234. Zaitsev Yu.V. 2004. Human factor as dominant of operational safety in air traffic control. – Materiały NAU. Nr 4 (22): 33–36 (tekst ukraiński).
235. Ungaryan S.G., Markovich E.D., Volevach A.I. 1980. Analysis and Modeling of Air Traffic Management Systems. Moskwa. Transport. 205 s. (tekst rosyjski).
236. Kharchenko V.P., Ostroumov I.V., Zaitsev Yu.V. 2008. Multi-spectral parametric classification of flight situations. Materiały NAU. Nr 4 (37): 3–8 (tekst ukraiński).
237. Kharchenko V.P., Zaitsev Yu.V., Rudas S.I., Arhunov G.F. 2011. Correlation of air traffic management safety with controllers' language training. Materiały NAU. Nr 2 (47): 21–26 (tekst ukraiński).
238. Zaitsev Yu.V., Ilchenko V.M. 2008. Qualitative evaluation of semantic relations (networks) in air-to-ground communications. Materiały Engineering Academy of Ukraine. Nr (1): 12–15 (tekst ukraiński).
239. Aslanyan A.E. 1984. Automatic flight control devices. Kijów. Kyiv Military Institute of Radio Engineers. 436 s. (tekst rosyjski).
240. Bodner V.A. 1973. Flight control systems. Moskwa. Engineering. 506 s. (tekst rosyjski).
241. D'yakonov V., Kruglov V. 2002. MATLAB. System analysis, identification and modeling. Manual. Petersburg. Piter. 448 s. (tekst rosyjski).

242. Prisnyakov V.F., Prisnyakova L.M. 1990. Mathematical modeling of man-machine operator data processing. Moskwa. Engineering. 248 s. (tekst rosyjski).
243. Gromov Yu.Yu., Zemskiy N.A., Lagutin A.V., Ivanova O.G., Tiutiunnik V.M. 2007. Automatic Control Systems with Delay. Tambov. Wydawnictwo Tambov State Technical University. 76 s. (tekst rosyjski).
244. Kharchenko V., Chepizhenko V., Zaitsev Y. Impact of poly-linguistic load on Air Traffic Control and monitoring quality. Materiały National Aviation University. – Kijów, 2012. – № 2(51). – s. 70–76.
245. Keating C.B. A methodology for analysis of complex sociotechnical processes / C.B. Keating, A.A. Fernandez, D.A. Jacobs, P. Kauffmann // Business Process Management Journal. – 2001. – t. 7. – Nr 1. – s. 33–50.
246. Bertsch V. Sensitivity analyses in multi-attribute decision support for off-site nuclear emergency and recovery management / V. Bertsch, M. Treitz, J. Geldermann, O. Rentz // International Journal of Energy Sector Management. – 2007. – t. 1. – Nr 4. – s. 342–365.
247. Flueler T. Decision Making for Complex Socio-Technical Systems: Robustness from Lessons Learned in Long-Term Radioactive Waste Governance (Environment & Policy) / T. Flueler. – Springer, 2006. – 392 s.
248. Kylik N.S., Kharchenko V.P., Lytsky M.G. i in. 2008. Encyclopedia of aviation safety. Red. N.S. Kylik. Kijów. Technology. 1000 s. (tekst rosyjski).
249. Человеческий фактор, управление и организация [Текст]: сб. матер. / Международная организация гражданской авиации. – Вып. 10. – Circ. 247-AN/148. – Канада, Монреаль, ICAO, 1994. – 38 с.
250. Кросскультурные факторы и безопасность полетов: сб. материалов по человеческому фактору. – № 16 // Circ. ICAO 302-AN/175. – Канада, Монреаль: ICAO, 2004. – 52 с.
251. Makarov R.N., Nidziy N.A., Shishkin G.K. 2000. Psychological Foundations of Didactics in Flight Education. Moskwa. MAPCHAK. 534 s. (tekst rosyjski).
252. Харченко В.П. Графоаналітичні моделі прийняття рішень людиною-оператором аеронавігаційної системи / В.П. Харченко, Т.Ф. Шмельова, В. Сікірда // Вісник НАУ. – 2011. – №1. – С. 5–17.
253. Лефевр В.А. Функции быстрой рефлексии в биполярном выборе [Текст] / В.А. Лефевр, Дж. Адамс-Вебер // Рефлексивные процессы и управление. – 2001. – №1. – Июль-декабрь. – Том 1. – С. 34–46.
254. Филлипс Д. Методы анализа сетей: пер. с англ. / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
255. Беляев Ю.Б. Моделювання процесу прийняття рішень оператором авіаційної ергатичної системи в особливих випадках польоту / Ю.Б. Беляев, Т.Ф. Шмельова, Ю.В. Сікірда // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – №2 (17). – С. 17–23.
256. Рева О.М. Прийняття рішень шляхом виявлення системи пріоритетів (переваг) авіаспеціаліста: методичні вказівки / О.М. Рева. – Кіровоград, 1996. – 18 с.
257. Aviation Accident Statistics [Electronic resource] / National Transportation Safety Board. Dostępne na: < www.nts.gov/aviation/aviation.htm. – Last access: 2011. – Title from the screen>.
258. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения: пер. с англ. / Т.Л. Саати. – 3-изд. – М.: Книжный дом „ЛИБРОКОМ”, 2010. – 520 с.
259. Kharchenko V., Shmelova T., Sikirda Y. Methodology for Analysis of Decision Making in Air Navigation System. Materiały National Aviation University. – Kijów, 2011. – № 3(48). – s. 85–94.
260. Human Factors Guidelines for Safety Audits Manual. – wyd. 1. – Doc. 9806-AN/763. – Kanada. Montreal. ICAO, 2002. – 138 s.
261. Cross-Cultural Factors in Aviation: circular Human Factors Digest. Nr 16. – Circ. ICAO 302-AN/175. Kanada. Montreal. ICAO. 2004. 52 p. (wersja rosyjska).
262. Bertsch V., Treitz M., Geldermann J., Rentz O. 2007. Sensitivity Analyses in Multi-Attribute

- Decision Support for Off-Site Nuclear Emergency and Recovery Management. – International Journal of Energy Sector Management. t. 1. Nr 4: 342–365.
263. Flueler T. 2006. Decision Making for Complex Socio-Technical Systems: Robustness from Lessons Learned in Long-Term Radioactive Waste Governance (Environment & Policy). Flueler. Springer. 392 s.
264. Leychenko S.D., Malishevskiy A.V., Mikhalic N.F. 2006. Human Factors in Aviation. Kirovograd. YMEKS. 512 s. (tekst rosyjski).
265. Keating C.B., Fernandez A.A., Jacobs D.A., Kauffmann P. 2001. A Methodology for Analysis of Complex Sociotechnical Processes. – Business Process Management Journal. t. 7. Nr 1: 33–50.
266. Харченко В.П., Шмельова Т.Ф., Сікірда Ю.В. Графоаналітичні моделі прийняття рішень людиною-оператором аеронавігаційної системи // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – №1. – С. 5–17.
267. Kharchenko V.P. Methodology for Analysis of Decision Making in Air Navigation System / V.P. Kharchenko, T.F. Shmelova, Y.V. Sikirda // Materiał National Aviation University. – 2011. – №3. – s. 85–94.
268. Lefebvre B.A. Functions of Fast Reflexion in Bipolar Choice [Tekst] / V.A. Lefevr, J. Adams-Webber // Reflexion processes and operations. – 2001. – №1. – lipiec-grudzień. – t. 1. – s. 34–46.
269. Shmelova T.F. Network Analysis of the Flight Emergency / T.F. Shmelova, O.P. Bondar, I.L. Yakunina // Technology in agricultural production, industrial engineering, automation: – №. 24. – cz. II. – Kirovograd: KNTU, 2011. – s. 214–218.
270. Shmelova T.F. Analysis of the Flight Emergency using a Network Graph / T.F. Shmelova, O.P. Bondar, I.L. Yakunina // Materiały National Aviation University. – 2011. – №2 (47). – s. 50–54.
271. Yakunina I.L. Expert Method of Determining the Temporal Characteristics in Flight Emergencies / T.F. Shmelova, O.P. Bondar, I.L. Yakunina. // Weapons systems and military equipment. – 2011. – №1 (25). – s. 175–179.
272. Shmelova T.F. The Formalization of the Aviation Man-Machine System's Human Operator in Flight Emergencies / T.F. Shmelova, Y.V. Sikirda // Electronic and computer systems. – 2010. – №5 (46). – s. 296–300.
273. Computer Program for Optimizing the Choice of Alternative Variant of Aircraft Flight Completion in Unusual Situations „Prompt”: Certificate of registration of copyright in the product №37872, issued by the State Department of Intellectual Property of MESU at 11.04.2011. // V.P. Kharchenko, T.F. Shmelova, Y.V. Sikirda, O.V. Gerasimenko. – 1 s.
274. Kharchenko V., Shmelova T., Sikirda Y. Modeling of behavioral activity of Air Navigation System's human-operator in flight emergencies. Materiały National Aviation University. – Kijów, 2012. – № 2(51). – s. 5–17. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Technologiczna „AVIA-2011”. – Kijów, 19-21 kwietnia 2011. – t. 2. – K.: NAU, 2011. – s. 7.28–7.31.
275. Światowa Konferencja Branży Transportu Lotniczego: Challenges and Opportunities of Liberalization, Aviation in Transition: Challenges & Opportunities of Liberalization, 22 -23 marca 2003. Dostępne na: <<http://www.icao.int/Meetings/ATConf5/Pages/Documentation.aspx>>.
276. Bugayko D., Kulyk M. International Airline Fares Regulations in Conditions of Air Market Globalization and Liberalization // Logistics and Transport – Wrocław: Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu. – 2009. – №2(9). – s. 57–62.
277. Linda Perry z udziałem Matta Townsenda, Airline Alliances Responses to a Global Marketplace // Leigh Fisher. Dostępne na: <<http://www.leighfisher.com/sites/default/files/publications/LeighFisher-Focus-AirlineAlliances-June2011.pdf>> .
278. Światowa Konferencja Branży Transportu Lotniczego (ATCONF, spotkanie 6, Montréal, 18-22 marca 2013) Effects of Airlines Alliances and Merges of Fair Competition nad Monopoly Privension (Prezentowane przez Egipt) Dostępne na: <http://www.icao.int/meetings/atconf6/documents/workingpapers/atconf6-wp039_en.pdf+&cd=2&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>.
279. EUROCONTROL Statistics: the Statistics and Forecasts service (STATFOR) and The Central

- Office for Delay Analysis (CODA) – 2012: overall, traffic falls but growth for low-cost and charters. Dostępne na: <<http://www.eurocontrol.int/press-releases/2012-overall-traffic-falls-growth-low-cost-and-charters>>.
280. Poole R., Annual Privatization Report 2013: Air Transportation, Airport Privatization. The Reason Foundation. Dostępne na: <<http://reason.org/news/show/apr-2013-airport-privatization>>.
 281. Poole R., Annual Privatization Report 2013: Air Transportation, Air Traffic Control Privatization. The Reason Foundation. Dostępne na: <<http://reason.org/news/show/apr-2013-air-traffic-control>>.
 282. Manual on the Regulation on International Air Transport: ICAO, Doc 9626.
 283. Kharchenko V., Bugayko D., Modern Trends of Aviation Logistics Development-Effectiveness, Safety and Security Aspect. Logistics and Transport. – 2013. – № 2(18). – s. 17–24.
 284. Kharchenko V., Bugayko D., Bo W. Safety and security issues of aviation logistics development. Проблемы подготовки профессиональных кадров по логистике в условиях глобальной конкурентной среды: 11 мпк 25-26 октября 2013 г. сборник докладов – К.: Логос, с. 589–594.
 285. ECAC policy statement in the field of civil aviation facilitation ECAC/CEAC DOC No. 30 (część I) wyd. 11 /grudzień 2009.
 286. IATA Cargo Transportation Forecast 2012 – 2013 years.
 287. Boeing World Air Cargo Forecast 2012 – 2013 years.
 288. Airbus Cargo Global Market Forecast 2011 – 2030.
 289. Bugayko D. Safety and Effectiveness of Civil Aviation in Conditions of Air Traffic Globalization // Protokoły V Światowego Kongresu «Aviation in the XXI-st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27 września 2012, Kijów / NAU. – Kijów, 2012. – t. 2. – s. 3.1.26–3.1.28.
 290. Kharchenko V., Bugayko D., Kulyk M., Iliencko O. Problem Of World Air Transportation Market Globalization. Logistics and Transport. – 2013. – № 3(19). – s. 65–74.
 291. Policy and Guidance Material of the Economic Regulation of International Air Transport: ICAO, Doc 9587.
 292. Airline Passenger Tariff. Rules / IATA – Montreal-Geneva.
 293. Bugayko D. Factors of Ukrainian carriers commercial and economic risks in conditions of globalization of air transport services market. Problems of increase of efficiency of infrastructure – Kijów: National Aviation University, 2008 – Wyd. 20. – s. 37–43 (tekst rosyjski).
 294. Evans A.D. Rapid modeling of airport delay. XII Konferencja światowego stowarzyszenia badaczy w obszarze transportu lotniczego (ATRS). 2010. 14 s.
 295. Butler V. Increasing Airport capacity Without Increasing Airport Size. Reason Foundation. Los Angeles. 2008. 49 s.
 296. Delays to Air Transport in Europe – Quarter II 2013. Central Office for Delay Analysis Eurocontrol. 2013. 22 s.
 297. Gwiggner C., Nagaoka S. Recent Models in the Analysis of Air Traffic Flow. Electronic Navigation Research Institute (ENRI). Tokio. 2010. 10 s.
 298. Gwiggner C., Kimura A., Nagaoka S. Data and Queueing Analysis of a Japanese Arrival Flow. Electronic Navigation Research Institute. Tokio. 2011. 7 s.
 299. Monish D. Tandale, Prasenit Sengupt; Jinwhan Kim. Queueing models for analyzing the impact of trajectory uncertainties on the NAS flow efficiency. IX Konferencja nt. Technologii, Integracji i Operacji Lotniczych. 2009. 14 s.
 300. Monish D. Tandale, Prasenit Sengupta, Menon P.K. Queueing network models of the national airspace system. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2010. 14 s.
 301. National Plan of Integrated Airport Systems (2011-2015). Federal Aviation Administration. Raport Sekretarza Transportu dla Kongresu USA. 2010. 100 s.
 302. Nikoleris T., Hansen M. Queueing Models for 4D Trajectory-Based Aircraft Operations in NextGen. IX Konferencja nt. Technologii, Integracji i Operacji Lotniczych. 2009. 11 s.
 303. Philippe N.I. Basic elements of queueing theory. Application to the Modelling of Computer Systems. Sophia Antipolis. 2004. 110 s.

304. Carlier S., de Lépinay I., Hustache J.-C. Environmental impact of air traffic flow management delays. Eurocontrol Experimental Centre. Seminarium ATM. 2007. 13 s.
305. Kharchenko V., Tapia K. Analysis of aircraft delays at the stage of arrival at airport. Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). – s. 28–32.
306. Agustín A., Escudero L., Pizarro C. Mathematical Optimization models for Air Traffic Flow Management. A review. Dept. of Statistics and Operations Research Universidad Rey Juan Carlos. 2008. 44 s.
307. Andersson K., Carr F., Feron E. Analysis and Modeling of Ground Operations at Hub Airports. III Seminarium nt. Zarządzania Ruchem Lotniczym USA / Europa. 2000. 15 s.
308. Balakrishna P., Ganesan R., Sherry L. Taxi-out Prediction using Approximate Dynamic Programming. George Mason University. 2007. 16 s.
309. Clewlow R., Simaiakis I., Balakrishnan H. Impact of Arrivals on Departure Taxi Operations at Airports. Massachusetts Institute of Technology. 2006. 21 s.
310. Elefante S. Statistical and probabilistic approach for improving efficiency in Air Traffic Flow Management. Dysertacja – Wydział Inżynieryjny University of Glasgow. 2001. 241 s.
311. Lee H., Balakrishnan H. A Study of Tradeoffs in Scheduling Terminal–Area Operations. Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology. 2008. 12 s.
312. Long D., Lee D., Johnson J., Gaier E. Modeling Air Traffic Management Technologies With a Queuing Network Model of the National Airspace System. NASA. 1999. 121 s.
313. Simaiakis I., Balakrishnan H. Analysis and Control of Airport Departure Processes to Mitigate Congestion Impacts. Massachusetts Institute of Technology. 2009. 29 s.
314. Kharchenko V., Tapia K., Shvets O. Analysing surface movement delays in an airport. Materiały NAU. – 2014. – № 2(59). – s. 10–14.
315. Kharchenko V., Bugayko D. Safety and Security Integration of Unmanned Aircraft Systems into World Aviation System: NAU experience. Materiały V Światowego Kongresu «Aviation in the XXI-st century», «Safety in Aviation and Space Technologies», 25–27 września 2012, Kijów / NAU. – Kijów, 2012. – t. 2. – s. 3.1.26–3.1.28.
316. AFS-400 UAS Policy 05-01. Washington: FAA, 2005 – 9 s.
317. Wstępna propozycja poprawki (NPA) No 16/2005. Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification. Kolonia: EASA, 2005 – 42 s.
318. UK-CAA Policy for light UAV systems. Londyn: Civil Aviation Authority, UK, 2004. – 10 s.
319. Kharchenko V.P., Bugayko D.O., Lutskyi M.G. Development of international control and regulatory base of unmanned aerial vehicles using. Materiały National Aviation University. – Kijów: NAU, 2011. – Nr 2. – s. 5–14 (tekst ukraiński).
320. Kharchenko V., Bugayko D., Paweska M., Prusov D. The efficiency and effectiveness of remotely piloted aircraft systems used in logistics problems solving due to territorial infrastructure / Logistics and Transport. – 2014. – № 2(22). – s. 13–20.
321. Oficjalna strona internetowa centrum naukowo-produkcyjnego bezałogowych systemów latających „Virage” przy National Aviation University. Dostępne na: <http://uav.nau.edu.ua/rozrob.html>.
322. Rostopchin V.V., Fedin S.I. The use of unmanned aerial vehicles in the fight against the spread of drugs. – <http://uav.ru> (tekst rosyjski).
323. Kharchenko V.P., Prusov D.E. Analysis of Unmanned Aircraft Systems Application in the Civil Field. Transport – t. 27, nr 3, 2012 – s. 335–343.
324. Kharchenko V.P., Prusov D.E. The Complex Work on the Unmanned Aircraft System Prototype in the National Aviation University. Materiały V Światowego Kongresu "Aviation in the XXI-st Century", National Aviation University, Kijów, Ukraina – 25–27 września, 2012. – s. 2.1–2.4.
325. Kharchenko V.P., Prusov D.E. Basic principles of the modern classification of unmanned aircraft systems civil purposes. Materiały National Aviation University. – Kijów: NAU, 2012. – t. 53, nr 4. – s. 5–13 (tekst ukraiński).
326. Mark Dali. Unmanned Aerial Vehicles and Targets / Jan'es / Wydane w Wielkiej Brytanii przez Hobbs the Printers.: 2010. – 700 s.

327. Matiychyk M.P. Problems of UAV development and implementation into the economic processes in Ukraine. The Problems and prospects of air transportation development. – Kijów, National Aviation University, 2009. – 34 s. (tekst ukraiński).
328. Matiychyk M.P., Suvorova N.O., Kachalo I.A. Comparison of the Production Cycle of the Aviation-Chemical Works Performance by Ultralight and Unmanned Aircrafts. Materiały National Aviation University. – Kijów: NAU, 2010. – t. 43, nr 2. – s. 15–18 (tekst ukraiński).
329. Matiychyk M.P., Suvorova N.O. Aviation Technics and Special Equipment for Aerial Work Performing. – Kijów, National Aviation University, wyd. 2010. – 64 s. (tekst ukraiński).
330. NASA (oficjalna strona internetowa). Dostępne na: http://www.nasa.gov/centers/dryden/doc/139872main_Appendix%20A.doc.
331. Hiwing Aviation General Equipment Co., LTD (oficjalna strona internetowa). Dostępne na: – <http://www.hiwingage.com/en/case.asp?/3.html>.
332. Bugayko D., Kharchenko V., Bo W. Safety Management System like Key Instrument of International Civil Aviation Regulation // Materiały V Konferencji Międzynarodowej „Legal science and practice: challenges of the time”. – K: NAU, 2015. – t. 3. – s. 10–13.
333. Bugayko D., Kharchenko V., Bo W. State and prospects for development of remotely piloted aircraft systems (RPAS) using for maritime challenges Avia-2015: Materiały XII Konferencji Międzynarodowej. – K.:NAU, 2015. – s. 7.1–7.7.
334. Barrett Ch., Bosnic C., Prieto A., Golembeski G., Bell D. UAV telemetry. Konferencja nt. Projektów Multidyscyplinarnych, Rochester, Nowy Jork. 2008. 9 s.
335. Gouqing Zhou, Chaokui Li. UAV real-time data processing through flight trajectory and resample rate analysis. Doroczna Konferencja ASPRS 2006, Reno, Newada, 1-7 maja 2006, 7 s.
336. Kharchenko V., Kuzmenko N. Minimization of UAV trajectory deviation during the complicated obstacles overfly. Materiały National Aviation University. 2012. nr 2. s. 18–21.
337. Kuzmenko N.S., Vasyliiev I.V. Ground control stations of airspace movable object flight. Materiały XI Konferencji naukowo-technicznej „AVIA-2013”. t. 2. Kijów, National Aviation University. 2013. s. 8.49–8.53 (tekst ukraiński).
338. Kharchenko V., Kuzmenko N., Mykhatsky O., Savchenko O. Experimental unmanned aerial vehicle flight data measurement and their post-processing analysis. Materiały NAU. – 2014. – № 1(58). – s. 11–16.
339. Andreevsky V.V., Derkach A.G. 1987. Definition of attainable aircraft on the trajectories of complex profile. Ryga, RCAII. s. 61–64 (tekst rosyjski).
340. Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. 1962. Flight dynamics of unmanned aerial vehicles. Podręcznik dla szkół. Moskwa, Oborongiz. 548 s. (tekst rosyjski).
341. Skripnichenko S.Yu. 1981. Fuel savings by reducing the loss of aerodynamic control for balancing. Questions GLA aerodynamics and strength. Moskwa, State NIIGA. Nr 202: 56–62 (tekst rosyjski).
342. Udartsev E.P., Pereverzev A.M., Ishchenko S.A. 1998. Operating aerodynamics. Trajectory problem. Podręcznik. Kijów, KMUGA. 136 s. (tekst rosyjski).
343. Skripnichenko S.Yu. 1988. Optimization of the flight based on economic criteria. Moskwa, Mashinostroenie. 152 s. (tekst rosyjski).
344. Kharchenko V., Plakhotniuk I. Analysis Of Factors Affecting Varying Maximum Range Ability For Unmanned Aerial Vehicle. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 1 (54): 31–36.
345. Sigurd K., How J. 2003. UAV trajectory design using total field collision avoidance. – Konferencja AIAA nt. sterowania, nawigacji i kontroli, sierpień 2003. 11 s.
346. Su-Cheol Han, Hyochoong Bang. 2004. Proportional Navigation-Based Optimal Collision Avoidance for UAVs. – 2 Międzynarodowa Konferencja nt. Autonomicznych Robotów i Urządzeń, grudzień. – Palmerston North, Nowa Zelandia: 76–81 s.
347. Capozzi B.J. 2001. Evolution-Based Path Planning and Management for Autonomous Vehicles. – University of Washington. 363 s.
348. Kharchenko V., Kuzmenko N. Minimization of Unmanned Aerial Vehicle trajectory deviation during the complicated obstacles overfly. Materiały National Aviation University. – Kijów, 2012.

– № 2(51). – s. 70–76.

349. Chawla Charu, Padhi Radhakant. 2011. Partially Integrated Guidance and Control of UAVs for Reactive Collision Avoidance. Bangalore. 92 s.
350. Gardiner B., Waseem A. 2011. Collision Avoidance Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. Raport techniczny #CSSE11 – 01. Auburn University. 24 s.
351. Liao Tingsheng. 2012. UAV Collision Avoidance using A* Algorithm. Alabama, 7 maja 2012. 53 s.
352. Loe Oivind. 2007. Collision Avoidance Concepts for Marine Surface Craft. Trondheim, 19 grudnia 2007. 111 s.
353. Singh Shashiprakash; Padhi Radhakant. 2009. Automatic Path Planning and Control Design for Autonomous Landing of UAVs using Dynamic Inversion. USA. 6 s.
354. Kharchenko V., Kuzmenko N. Unmanned Aerial Vehicle Collision Avoidance Using Digital Elevation Model. Materiały National Aviation University. 2013. Nr 1 (54): 21–25.
355. Little R., Rubin D. Statistical Analysis with Missing Data. Wiley-Interscience, 2002. 408 s.
356. Draper N., Smith H. Applied regression analysis. Wiley-Interscience, 1998. 706 s.
357. Zloba E., Yatskiv I. Statistical methods of reproducing of missing data. Computer Modelling & New Technologies, Ryga, 2002. s. 51–61 (tekst rosyjski).
358. Frank A. Interpolation of 3D Surfaces for Contact Modeling. University of Twente, Niderlandy, 2005. 51 s.
359. Kharchenko V., Kuzmenko N. Unmanned Aerial Vehicle Flight Data Processing By Spline Approach. Materiały National Aviation University. 2015. Nr 1(62). s. 12–16.
360. Dokument roboczy Komisji B: Towards a European strategy for the development of civil applications of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) // Komisja Europejska. – Bruksela, 2012. – 26 s.
361. Jones E., New Approaches for Autonomous Logistics Aircraft and Ground Systems / Institution of Engineering and Technology; II Konferencja nt. Systemów Autonomicznych, Londyn, listopad, 2007. – s. 1–7.
362. McCoy J.V., Unmanned aerial logistics vehicles: a concept worth pursuing? / Master of military art and science thesis. Faculty of the U.S. Army Command and General Staff College, Florida Institute of Technology, USA, 2002. – 68 s.
363. Technical data sheet of inertial measurement unit ADIS 16362. Źródło elektroniczne // <http://www.analog.com/en/mems-sensors>.
364. Karta danych technicznych magnetometru HMC5843. Źródło elektroniczne // www.honeywell.com/magneticsensors [6] Karta danych technicznych czujnika BMP085. Źródło elektroniczne // <http://www.datasheetarchive.com/BMP085-datasheet.html>.
365. Karta danych technicznych odbiornika GNSS OEMV-1. Źródło elektroniczne // www.novatel.com/Documents/Chapters/OEMV-1.pdf.
366. Larin V.B. Attitude-Determination Problems for a Rigid Body // Int. Appl. Mech. – 2001. – 37. – №7. – s. 870 – 898. [9] Kharchenko V.P. Analysis of unmanned aerial vehicle kinematic equations integration algorithms / V.P. Kharchenko, S.I. Ilynska // Materiały NAU – 2010. – №3 (44). – s. 9–17.
367. Larin V.B. About correction of inertial navigation system functioning / A.A. Tunik, V.B. Larin // Problems of control and informatics. – 2010. – №4. – s. 130–142.
368. Kharchenko V.P. Analysis of the efficiency of algorithms of integrated inertial-satellite navigation system / V.P. Kharchenko, S.I. Ilynska // Mechanics of gyroscopic systems. Magazyn naukowy Kyiv Polytechnic university. Wyd. 22. Kijów 2010 – s. 32–43.
369. Kharchenko V., Ilynska S. Multipurpose Remotely Piloted Aircraft System Integrated Navigation System Development And Testing. Logistics and Transport. – 2013. – № 3(19). – s. 85–90.
370. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев и др.; Под ред. С.Г. Пятко и А.И. Красова. – СПб.: Политехника. 2004. – 446 с.
371. Концепция и системы CNS /ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов,

- Г.А. Крыжановский и др.; Под ред. Г.А. Крыжановского. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 415 с.
372. The Operational Role of Airborne Surveillance in Separating Traffic // FAA/Eurocontrol Cooperativ R&D, wersja 0.2 – 8 listopada 2008. – 105 s.
373. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В.П. Харченко, В.І. Чепіженко, А.А. Тунік, С.В. Павлова. – К.: ТОВ «Абрис-принт», 2012. – 464 с.
374. McInnes C.R. Velocity field path-planning for single and multiple unmanned aerial vehicles / C.R. McInnes // The Aeronautical Journal. – lipiec 2003. – s. 419–426.
375. Stanley A. Flight Path Deconfliction of Autonomous UAVs / A. Stanley // AIAA 2005–6978. In Infotech@Aerospace, 26–29 września 2005. – Arlington, Wirginia, 2005. – s. 1–21.
376. Lissone M. Opening the sky to unmanned air vehicles. Skyway magazine / Eurocontrol, lato 2012, s. 32–35.
377. Eby M.S. A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts / M.S. Eby // The Lincoln Laboratory Journal. – 1994. – t.7, №2. – s. 239–254.
378. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. II / [Под ред. А.А. Колесникова]. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000 – 559 с.
379. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
380. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепури. – М.: Мир, 2002. – 464 с.
381. Савельев И.В. Курс общей физики, том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: «Наука», 1970. – 517 с.
382. Векилов Ю.Х. Межатомное взаимодействие и электронная структура твердых тел / Ю.Х. Векилов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №11. – С. 80–86.
383. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://www.fizika.khstu.ru/files/posob/\\$file/molek.pdf](http://www.fizika.khstu.ru/files/posob/$file/molek.pdf)>.
384. Коулсон К. Межатомные силы – от Максвелла до Шрёдингера / К. Коулсон // Успехи физических наук. Из истории физики. – 1963. – Т. LXXXI, вып. 3. – С. 545–556.
385. Виртуальные Эйнштейновские силовые поля в синергии навигационного пространства сложных эргатических систем. С.В. Павлова, В.В. Павлов, В.И. Чепиженко // Вісник НАУ. – 2012 – № 3 – С. 15–27.
386. Енергетико-потенціальне управління повітряним рухом в середовищі CNS/ATM / В.В. Павлов, В.П. Харченко, В.І. Чепіженко // Вісник НАУ. – 2011. – № 4. – С. 10–19.
387. Manual on Required Navigation Performance (RNP): Doc 9613-AN/937, [wyd. 2]. – Montreal, Kanada, 1999. – 41 s.
388. Kharchenko V., Chepizhenko V., Pavlova S. Synergy of Piloted, Remoterly Piloted and Unmanned air Systems in Single air Navigation Space. Logistics and Transport. – 2013. – № 2(18). – s. 77–83.
389. Oficjalna strona internetowa ICAO. Dostępne na: <http://www.icao.int>.
390. Convention on International Civil Aviation – Doc 7300. Dostępne na: <http://www.icao.int/publications/pages/doc7300.aspx>.
391. The Convention on International Civil Aviation. Annexes 1 to 18 booklet. Dostępne na: www.icao.int/documents/annexes_booklet.pdf.
392. The Convention on International Civil Aviation Annex 19 Safety Management. Dostępne na: <http://www.icao.int/secretariat/PostalHistory/annex_19_safety_management.htm>.
393. Publikacje ICAO. Dostępne na: <<http://www.icao.int/publications>>.
394. Oficjalna strona internetowa IATA. Dostępne na: <<http://www.iata.org>>.
395. Oficjalna strona internetowa ACI. Dostępne na: <<http://www.aci.aero>>.
396. Oficjalna strona internetowa TIACA. Dostępne na: <<http://www.tiaca.org>>.
397. Oficjalna strona internetowa IBAC. Dostępne na: <<http://www.ibac.org>>.
398. Oficjalna strona internetowa IAOPA. Dostępne na: <<http://www.iaopa.org>>.
399. Oficjalna strona internetowa IFALPA. Dostępne na: <<http://www.ifalpa.org>>.

400. Oficjalna strona internetowa WCO. Dostępne na: <<http://www.wcoomd.org>>.
401. Oficjalna strona internetowa UPU. Dostępne na: <<http://www.upu.int>>.
402. Oficjalna strona internetowa FIATA. Dostępne na: <<http://fiata.com>>.
403. Oficjalna strona internetowa GEA. Dostępne na: <<http://www.global-express.org>>.
404. Oficjalna strona internetowa GTO. Dostępne na: <<http://www.gtoglobal.com>>.
405. Oficjalna strona internetowa ECAC. Dostępne na: <<https://www.ecac-ceac.org>>.
406. Oficjalna strona internetowa EASA. Dostępne na: <<https://www.easa.europa.eu>>.
407. Oficjalna strona internetowa EUROCONTROL. Dostępne na: <<https://www.eurocontrol.int>>.
408. Oficjalna strona internetowa AEA. Dostępne na: <<http://www.aea.be>>.
409. Oficjalna strona internetowa ACI-Europe. Dostępne na: <<https://www.aci-europe.org>>.
410. Oficjalna strona internetowa EBAA. Dostępne na: <<http://www.ebaa.org>>.
411. Oficjalna strona internetowa ECA. Dostępne na: <<https://www.eurocockpit.be/pages/about-eca>>.
412. Oficjalna strona internetowa National Aviation University. Dostępne na: <<http://nau.edu.ua>>.
413. Unmanned Aircraft Systems /Circ. ICAO 328 – AN/190. – Kanada, Montreal: ICAO, 2011. – 325 s.
414. Joint Unmanned Aircraft Systems Minimum Training Standards: – Guidance / Joint Staff Waszyngton – 2012 – 32 s.
415. Augusti Giuliano. Quality and Accreditation in Engineering Education in Europe. Materiały. Międzynarodowe Sympozjum nt. Innowacji i Jakości w Kształceniu w Kierunkach Inżynierskich. Valladolid (Hiszpania), 26–28 kwietnia 2012.
416. Collaborative Doctoral Education – University-Industry Partnerships for Enhancing Knowledge Exchange. Doc-Careers Project by Lidia Borrell- Damian. Publikacje EUA. 2009.
417. Realising the European Higher Education Area. / Komunikat z konferencji ministrów szkolnictwa wyższego. Berlin. 19 września 2003.
418. Science and Innovation. Kijów, National Aviation University. 2009.
419. The European Higher Education Area – Achieving the Goals. Komunikat z konferencji ministrów szkolnictwa wyższego. Bergen. 19-20 maja 2005.
420. Towards the European Higher Education Area: responding to challenges in a globalised world. Komunikat z konferencji ministrów szkolnictwa wyższego. Londyn, 18 maja 2007.
421. Trends V. Universities shaping the European Higher Education Area. By David Crosier, Lewis Purser & Hanne Smidt. Raport EUA. Publikacje EUA. 2007.
422. Kharchenko V., Prusov D. Strategy for the training of highly qualified scientific personnel at the national aviation university / Materiały NAU. – 2014. – № 3(60). – s. 103–108.
423. Bugayko D., Kulyk M., Iliencko O. Safety of Aviation in Global Context of the World Air Transport Development. Materiały NAU. – K.: NAU, 2013. – №3. – s. 112–117.

O autorach



Volodymyr Kharchenko

Doktor nauk technicznych, profesor, zasłużony pracownik naukowo-techniczny Ukrainy, laureat ukraińskiej nagrody państwowej w dziedzinie nauki i technologii.

Badania profesora V.P. Kharchenki dotyczą skutecznego zarządzania złożonymi systemami socjotechnicznymi, rozwoju i doskonalenia systemów nawigacji lotniczej, opartych na wykorzystaniu systemów satelitarnych. Profesor Kharchenko kierował licznymi badaniami naukowymi związanymi z opracowaniem skutecznych metod wykrywania i rozwiązywania sytuacji konfliktowych w systemach socjotechnicznych; opracowaniem zasad konstruowania i symulacji opartych na danych systemów rozpoznania i analizy sytuacji krytycznych; tworzeniem automatycznych systemów podejmowania decyzji umożliwiających optymalizację przepływów; analizą naukowych i technicznych aspektów wdrożenia światowych systemów łączności satelitarnej; a także analizą i doskonaleniem organizacji ruchu lotniczego na Ukrainie. Uczestniczył również w licznych krajowych i międzynarodowych projektach naukowych związanych z bezpieczeństwem lotnictwa. Najważniejsze rezultaty pracy naukowej profesora V.P. Karchenki można znaleźć w 490 publikacjach naukowych – 400 monografiach, podręcznikach, artykułach, podsumowaniach, a także materiałach kongresowych i konferencyjnych. Ich znaczenie naukowe i innowacyjność potwierdza ponad 90 świadectw autorskich oraz patentów.

Profesor V.P. Kharchenko zasiada jako ekspert w Komitecie Transportu Polskiej Akademii Nauk, jest członkiem Akademii Transportu Ukrainy, Engineers of Electric and Electronics Institute of USA oraz Russian Academy of Navigation and Control. Jest także przewodniczącym i członkiem rad wydawniczych najważniejszych magazynów technicznych i naukowych na Ukrainie, Litwie i w Polsce. Profesor Kharchenko otrzymał liczne nagrody i wyróżnienia, państwowe i naukowe.



Dmytro Bugayko

Doktor ekonomii, profesor nadzwyczajny. Badania profesora Bugayki skupiają się na zarządzaniu i ekonomice systemu międzynarodowego transportu lotniczego, zarządzaniu bezpieczeństwem lotnictwa, zarządzaniu portami i liniami lotniczymi, a także systemie taryf i opłat lotniczych. Jest autorem i współautorem 76 prac naukowych, których wartość potwierdzają 4 patenty.

Profesor Bugayko jest także instruktorem Instytutu Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego działającego przy National Aviation University.