

SAFE SKY



Biuletyn Bezpieczeństwa Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej

1(30)/2026

W trosce o bezpieczeństwo

W numerze:

➤ Emergency Autoland

➤ AI w ATM

➤ Zakłócenia GNSS

PANSA

Szanowni Państwo,

Witamy Państwa na łamach trzydziestego numeru Safe Sky! Gdy w 2018 roku rozpoczynaliśmy wydawanie biuletynu, nikt nie mógł przewidzieć czy formuła się sprawdzi i czy zyskamy zainteresowanie odbiorców. Dziś, osiem lat później, Safe Sky nadal dostarcza angażujących treści. Dotyczą one szeroko pojętego bezpieczeństwa ruchu lotniczego, a także wszystkiego co na nie wpływa. Liczymy, że w przyszłości pozostaną Państwo z nami.

Po kilkuletniej przerwie, na nasze łamy wraca Andrzej Rutkowski – postać szeroko znana w środowisku lotniczym, ceniona za profesjonalizm i zamiłowanie do General Aviation. Andrzej przedstawi założenia i działanie systemu mogącego uratować życie wielu lotników. Czy Emergency Autoland stanie się standardem?

Wykorzystanie sztucznej inteligencji w co raz większej gamie działalności człowieka to już fakt, a nie pieśń przyszłości. Żeby pozostać efektywnym i konkurencyjnym, należy dostosować się do nowej rzeczywistości i nauczyć się wykorzystywać narzędzia AI. O ich zastosowaniu w zarządzaniu ruchem lotniczym opowie Piotr Dmochowski.

Gdy nawigacja satelitarna upowszechniła się we wszystkich rodzajach lotnictwa, począwszy od szerokokadłubowych odrzutowców dalekiego zasięgu, po ultralekkie statki powietrzne budowane w garażu – okazało się, że nie można traktować jej jako pewnik. Zakłócenia sygnału GNSS stanowią jedno z wyzwań, przed którymi stoi współczesna awiacja. Różne rodzaje zakłóceń i ich wpływ na bezpieczeństwo opisze Paweł Szpakowski.

Zapraszamy do lektury!

Biuro SMS

Spis treści

Gdy pilot „odleci” - Emergency Autoland 4

Andrzej Rutkowski

Sztuczna inteligencja w przyszłym zarządzaniu ruchem lotniczym. Od koncepcji do odpowiedzialnego wdrożenia. Część 1: Od idei do zaufania 13

Piotr Andrzej Dmochowski

Nawigacja lotnicza w warunkach zakłócania sygnałów GNSS 32

Paweł Szpakowski



Masz ciekawą propozycję artykułu dotyczącą bezpieczeństwa w ruchu lotniczym? Napisz do nas: safe.sky@pansa.pl

Redakcja:

Piotr Ostaszewski, Sebastian Sobczyński

Opracowanie, łamanie:

Piotr Ostaszewski

Dział Monitorowania Bezpieczeństwa

Biurow SMS

Polska Agencja Żeglugi Powietrznej
www.pansa.pl

ul. Wieżowa 8
02-147 Warszawa
tel. +48 22 574 67 28

Zdjęcie na okładce: **TBM910, fot. Andrzej Rutkowski**
Opracowanie graficzne: **Dział Komunikacji**

Gdy pilot „odleci”

Emergency Autoland



Andrzej Rutkowski



Fot.1. Piper M600, pierwszy samolot z rodziny PA-46, który może być wyposażony w Garmin Autoland, źródło: Andrzej Rutkowski

Żyjemy w erze niezwykłych rozwiązań technicznych. Współczesna lotnicza technologia potrafi rozwiązywać problemy, które dotąd oznaczały wyrok dla załogi statku powietrznego. Problem w tym, by zapewniając służby ruchu lotniczego, być przygotowanym na poradzenie sobie z tym jak samolot ratuje załogę...

Temat choroby pasażera na pokładzie statku powietrznego nie jest jakoś specjalnie nowy czy zaskakujący. W każdym unie służb ruchu lotniczego zapewne taka sytuacja kiedyś się wydarzyła. Jest to scenariusz, który ćwiczy się na szkoleniu ratingowym i odświeżającym. Aby w takiej sytuacji dobrze się odnaleźć należy ćwiczyć to na symulatorze. Uczestnik szkolenia ma na koniec wyjść z przeświadczeniem, że dysponuje wiedzą, umiejętnościami i narzędziami by poradzić sobie z taką sytuacją. Gorzej, kiedy chorym na pokładzie jest pilot, a konkretnie: jedyny pilot, który samolotem leci. No i ta „choroba” generuje np. utratę jego przytomności.

Do tej pory – przynajmniej na szkoleniach dla FIS – przyjmowaliśmy założenie, że jeżeli w ogóle dowiemy się, że ma miejsce taka sytuacja, to na pokładzie jest ktoś, kto potrafi nadać przez radio komunikat, że pilot jest nieprzytomny. W związku z tym zakładaliśmy, że taka osoba w stopniu choć minimalnym będzie potrafiła pilotować samolot. Nie chodzi o to by nim bezpiecznie wylądowała w asyście poleceń kontrolera ruchu lotniczego lub informatora FIS, bo jest to zadanie dla wszystkich arcytrudne, lecz by przez jakiś czas utrzymała maszynę w powietrzu, dając czas pilotowi by jego stan się na tyle poprawił, aby przejął pilotaż. Scenariusz i pomysł na rozwiązanie problemu mocno życzeniowy, ale jak się zastanowić to nie bardzo mamy tu cokolwiek innego.

Można by pomarzyć, że na pokładzie jest taki system, że w podobnej sytuacji samolot potrafi wylądować sam, ratując załogę. Pofantazjować można, ale nie potrzeba. Takie rozwiązanie już jest. I należy liczyć się z tym, że każdego tygodnia przelatuje przez nasz FIR statek powietrzny w nie wyposażony. Ten system nazywa się Emergency Autoland (EAL) i nie należy go mylić z autolandem dostępnym na samolotach komunikacyjnych zwalniającym załogę od własnoręcznego lądowania na wskazanym przez kontrolera pasie.

Emergency Autoland został opracowany przez firmę Garmin z przeznaczeniem dla małych i średnich samolotów general aviation – tych dopuszczonych do lotów w załodze jednoosobowej. EAL integruje podstawowe zasoby danych i systemy sterowania, czego efektem jest autonomiczny lot. Zarządza takimi funkcjami jak bazy danych o przestrzeni powietrznej, autopilot, zarządzanie pracą silnika, wypuszczanie klap i podwozia, hamowanie na pasie po wylądowaniu, rozgłaszanie komunikatów radiowych czy wreszcie: informowanie osób na pokładzie co się dzieje, jaki ogólnie jest plan, za ile minut będzie lądowanie i... czego w kokpicie nie dotykać.



Fot. 2. Po uruchomieniu Autolandu na ekranach w kokpicie prezentowane są uproszczone informacje dla pasażerów, np. czas do lądowania. Źródło: Piper Aircraft.

Co Autoland robi

Po aktywacji EAL dokonuje wyboru lotniska spośród zawartych w jego własnych zasobach danych i (o ile w danym FIR dostępny jest digital NOTAM) na podstawie depesz dotyczących dostępności lotniska czy pasa startowego. Jeżeli – tak jak w Polsce – digital NOTAM jest dalej w planach, należy się liczyć z tym, że samolot polecie... na zamknięte lotnisko lub wylądje na zamkniętej drodze startowej.

Kiedy już samolot postanowi dokąd leci, będzie w stanie omijać przeszkody terenowe i rejony złej pogody (tu też wszystko zależy od dostępności danych meteorologicznych w danym FIR). Jeśli trzeba – uruchomi instalacje przeciwbłędzeniowe. Ominie także strefy prohibited.

Po uruchomieniu EAL samolot poinformuje o tym fakcie służby ATS na ostatnio używanej przez pilota częstotliwości i zmieni squawk na 7700 (kod transpondera informujący o niebezpieczeństwie – przyp. red.). Gdy zostanie wybrane lotnisko awaryjnego lądowania, system na drugim zestawie nadawczym na częstotliwości awaryjnej 121,5 MHz rozpocznie nadawanie automatycznego komunikatu dla służb ruchu lotniczego. Natomiast gdy będzie bliżej lotniska docelowego rozpocznie nadawanie na częstotliwości lotniskowej. Samolot wykona podejście RNP w oparciu o GNSS i radiowysokościomierz, przekonfiguruje się do lądowania, wykona lądowanie z utrzymaniem się na linii centralnej, zahamuje, wyłączy silnik i wyświetli komunikat dla pasażerów, że mogą wysiadać.



Fot. 3. Pierwszym samolotem o napędzie tłokowym wyposażonym w Autoland jest Cirrus SR22 generacji 7+. Zdjęcie wykonane na lotnisku Babice. Źródło: Andrzej Rutkowski

Czego Autoland nie robi

Warto podkreślić, że EAL nie ma żadnych funkcjonalności związanych z omijaniem innego ruchu. Nie ważne czy samolot wyposażony jest w TCAS – system nie jest tymi danymi zasilany. Istotną więc sprawą jest opróżnienie przestrzeni powietrznej przed takim statkiem powietrznym, bo on leci już tylko po wybranej przez system trasie.

Podobnie, samolot nie ominie żadnych struktur przestrzeni powietrznej z wyjątkiem wspomnianych stref zakazanych. Jeśli po drodze na wybrane przez automat lotnisko będą jakieś struktury przestrzeni kontrolowanej, samolot przez nie przeleci bez żadnego zezwolenia informując tylko squawkiem i komunikatami na



Fot. 4. Cirrus w modelu SR22 G7+ umieszcza przycisk do aktywowania Autolandu w suficie kabiny – tak by był on łatwo dostępny także dla pasażerów z tylnego rzędu. Źródło: Andrzej Rutkowski

121,5 MHz, że to sytuacja awaryjna. Analogicznie, EAL nie respektuje granic FIR, więc w drodze na wybrane lotnisko awaryjnego lądowania może wlecieć do innego kraju.

Należy się spodziewać, że tak jak w miarę postępu dolotu do lotniska zmieniać się będą struktury przestrzeni powietrznej, samolot nie będzie co chwila zmieniał aktywnej częstotliwości radiowej. Automatyczny komunikat o awaryjnym przekierowaniu lotu na wybrane lotnisko nadal będzie transmitowany co 5 minut na 121,5 MHz. Dopiero na 12 NM przed lotniskiem docelowym (albo poniżej 10 000 ft) samolot rozpocznie nadawanie na częstotliwości lotniskowej.

Poza tym należy pamiętać, że samolot nie będzie w stanie wykonać odejścia na drugi krąg, jeśli wybrany przez Autoland pas okaże się być zajęty. System przeprowadzi lądowanie bez względu na przeszkody na pasie – przewidziano wykonanie tylko jednego podejścia. Po lądowaniu samolot zatrzyma się na pasie, a pas startowy będzie na jakiś czas zablokowany. Zablokowana zostanie także częstotliwość radiowa lotniska, ponieważ samolot będzie rozgłaszał, że znajduje się na pasie.

Wreszcie to, co najważniejsze: Autoland nie wykona polecenia kontrolera ruchu lotniczego. To jest automat. Nie ma więc sensu wydawać mu jakichkolwiek poleceń przez radio. Ale czy jest sens w ogóle z nim rozmawiać? Tak – EAL umożliwia pasażerom nadawanie do służb ruchu lotniczego na aktywnej częstotliwości, więc jakaś wymiana informacji pomiędzy pasażerem a kontrolerem może się pojawić. Należy jednak podkreślić, że taki pasażer nie może zaingerować w lot wedle polecenia kontrolera.

Kiedy Autoland zostanie uruchomiony

EAL może zostać uruchomiony przez człowieka, ale może to również wydarzyć się automatycznie. Ten pierwszy przypadek sprowadza się do naciśnięcia i przytrzymania specjalnego przycisku znajdującego się w widocznym miejscu na tablicy przyrządów, bądź na suficie kabiny samolotu. Może to zrobić pasażer po stwierdzeniu, że pilot odpłynął, albo wręcz ów „odpływający” pilot.

Automatyczne uruchomienie Autolandu pojawia się w przypadku dehermetyzacji kabiny (i braku dezaktywacji trybu Emergency Descent Mode lub innej reakcji po zakończonym awaryjnym zniżaniu) lub braku jakiegokolwiek aktywności pilota przez ustalony czas. Oczywiście nie od razu samolot zmienia destynację, kod transpondera i rozpoczyna nadawać o sytuacji awaryjnej. Po oznajmieniu załodze aktywowania systemu

– co odbywa się poprzez komunikat głosowy i stosowne komunikaty na glasscockpicie – przez pierwsze 10 sekund nie dzieje się na pozór nic innego. W przypadku uruchomienia automatycznego czas zwłoki wynosi 2 minuty. To czas żeby np. zaspany pilot się ocknął i wyłączył system zanim ten na serio zacznie działać.

Kryteria wyboru lotniska

O Autolandzie mówimy w kontekście general aviation, ale takiego trochę bardziej zaawansowanego technologicznie, osiągowo, no i cenowo. Czy zatem system może wybrać któreś z lotnisk aeroklubowych i na nim automatycznie wylądować?



Fot. 5. We francuskich samolotach rodziny TBM, Autoland dostępny jest począwszy od wersji 940. Źródło: Andrzej Rutkowski

Po pierwsze, tak go zaprojektowano, że wybierze lotnisko w promieniu 200 NM od miejsca aktywacji i jednocześnie znajdujące się w zasięgu samolotu (bo przecież to może się wydarzyć także pod koniec lotu, gdy w zbiornikach będzie znacznie mniej paliwa).

Wcześniej wspominałem, że niezbędną rzeczą by lotnisko się do takiego lądowania nadawało są opublikowane podejścia RNP. Zatem w Polsce praktycznie odpadają już nam wszystkie lotniska poza portami lotniczymi. Dalej, w założeniach systemu pojawia się to, że Autoland nie wybierze lotniska wojskowego. Nie wybierze też lotniska bez służb ruchu lotniczego. Wreszcie – nie wybierze portu lotniczego o rocznym ruchu przekraczającym 15 milionów pasażerów. Odnieśmy to do realiów polskich: ze względu na to kryterium odpada tylko Port Lotniczy im. Fryderyka Chopina w Warszawie. Wszystkie inne lotniska komunikacyjne mogą zostać przez EAL wybrane. Czy zatem przy powyższych założeniach w TMA Warszawa nigdy nie pojawi się samolot z uruchomionym Autolandem? Niekoniecznie. System może do lądowania wybrać np. port lotniczy w Modlinie albo jakieś inne lotnisko komunikacyjne, na które najszybciej będzie dolecieć przez TMA Warszawa.

Rola ATS

System Autoland wygląda spektakularnie. Inżynierom z Garmina udało się zintegrować go z systemami kilku typów statków powietrznych uzyskując możliwość w pełni automatycznego, bezpiecznego zakończenia lotu. W maju 2020 Garmin Autoland uzyskał pierwszy certyfikat FAA (czyli „amerykańskiego ULC”) na Piperze M600 SLS. Natomiast EASA (czyli „ULC” Unii Europejskiej) certyfikowała TBM 940 z systemem Autoland w sierpniu 2025 roku. To z pewnością duże osiągnięcie inżynierii lotniczej. Jedyne problemy są aktualnie w tym, że chyba nie do końca cokolwiek wiedzą o nim służby ruchu lotniczego. A przecież w sytuacji awaryjnej, obserwowanej z drugiej strony mikrofonu, fakt, że mały samolot ląduje zupełnie automatycznie, może zostać odebrany jako jakieś niezłe science-fiction.

Sprawy nie ułatwia to, że Garmin nie przygotował materiałów edukacyjnych dla służb ruchu lotniczego. To, co można znaleźć w Internecie, to w zasadzie wyłącznie filmy reklamowe przygotowane przez producentów samolotów, zachwalające dostępny w ich produktach pod różnymi nazwami handlowymi Autoland. Niełatwo też od samego Garmina, czy od przedstawicieli producentów samolotów uzyskać odpowiedź na bardziej szczegółowe pytania co taki samolot dokładnie robi.

Piloci... wiedzą z grubsza, że samolot wyląduje automatycznie i wiedzą, że mają zbriefować pasażerów na umiejętność skutecznego wciśnięcia przycisku Autoland, gdyby zaszła taka potrzeba podczas lotu. I tyle. W tym otoczeniu braku wiedzy o Autolandzie myślę, że warto „na sucho” zastanowić się jaka w przypadku uruchomienia tego systemu powinna być rola służb ruchu lotniczego.

Podstawowa sprawa to rozpoznanie, że to właśnie jest TEN przypadek – pilot jest nieresponsywny, uruchomiony został Autoland, samolot leci i wyląduje automatycznie. Może to zacząć się w przestrzeni obszaru, zbliżania lub w CTR, ale także w przestrzeni odpowiedzialności FIS.

W zależności od tego, co uda się wychwycić na 121,5 MHz w kwestii dokąd samolot postanowił lecieć, chyba najważniejszą sprawą będzie powiadomić wszystkie zainteresowane służby na trasie lotu i skutecznie wytłumaczyć co tu się właściwie dzieje. Gdy już wiemy, dokąd samolot leci, to teraz musimy zadbać o inne załogi w naszej przestrzeni, bo taka maszyna leci jak taran – nie dostrzeże i nie ominie żadnego ruchu. W przestrzeni niekontrolowanej pewnie na potęgę będziemy o takim locie informować innych, w kontrolowanej dobrze by było oczyścić przestrzeń na takie podejście i lądowanie. Na samym lotnisku – takie lądowanie powinno samolotowi udać się po mistrzowsku, ale nigdy nie wiadomo... Wreszcie: nie zapomnijmy, że to jest historia z chorym na pokładzie i w całym tym „autolandowym” zamieszaniu priorytetem jest jak najszybsze dotarcie wykwalifikowanej pomocy medycznej do (np. wciąż nieprzytomnego) pilota.

Który samolot może nas Autolandem zaskoczyć?

Zastanówmy się jak bardzo nierealne jest wydarzenie się takiej historii na następnej godzinie naszego dyżuru na wieży, na obszarze, na zbliżaniu, czy na FIS. Wg danych z połowy 2024 system zainstalowano w 800 samolotach general aviation. Czyli w 4 lata od certyfikacji w Stanach i w Europie. Myślę, że dynamika jest dość spora.

Jak dotąd EAL co do zasady instalowany był wyłącznie w nowych, wychodzących z fabryki maszynach. W styczniu 2025 FAA i EASA certyfikowały Autoland jako retrofit (czyli system do montowania na starszych egzemplarzach) na samolotach serii KingAir 350.

Różne są polityki producentów samolotów, ale Autoland to raczej wyposażenie dodatkowe, więc nie każdy np. Piper M600 będzie mógł awaryjnie wylądować w pełni automatycznie. System, co prawda, jest dość drogi, ale znika w ogromie kosztów zakupu wysokoosiągowego samolotu general aviation. Aktualnie dostępny jest w samolotach:

- ▶ Piper M600, M700 (nazwa handlowa systemu: HALO)
- ▶ TBM940 (HomeSafe)
- ▶ PC-12 PRO (Autoland)
- ▶ Honda Jet
- ▶ Beechcraft KingAir 350
- ▶ Cirrus SF50 (safe return)
- ▶ Cirrus SR22 (safe return)

Co robi EAL:

- ▶ wybór optymalnego lotniska do lądowania,
- ▶ automatyczne rozgłaszanie intencji na ostatnio używanej częstotliwości oraz na 121,5 MHz (12 NM od destynacji/10000 ft nad elewacją lotniska zmiana FQ na lotniskową i rozgłaszanie intencji co 90 s.),
- ▶ ustawienie squawku 7700,
- ▶ omijanie terenu,
- ▶ omijanie rejonów złej pogody,
- ▶ omijanie stref prohibited,
- ▶ automatyczne wykonanie opublikowanego podejścia RNP w oparciu o dane z GNSS i radiowysokościomierz,
- ▶ automatyczne lądowanie z utrzymaniem samolotu na linii centralnej, hamowanie, wyłączenie silnika.

Czego EAL nie robi:

- ▶ nie uwzględni granic FIR,
- ▶ nie ominie przestrzeni kontrolowanej, stref restricted i danger,
- ▶ nie wykona avoiding action, nie będzie przestrzegał reguł pierwszeństwa w powietrzu, nie zareaguje na informacje z TCAS,
- ▶ nie opuści pasa startowego,
- ▶ nie wykona odejścia na drugi krąg, jeżeli wybrany pas będzie zablokowany,
- ▶ NIE WYKONA POLECEŃ ATC!
- ▶ w przypadku dekompresji: uruchomienie Emergency Descent Mode, odejście od trasy o 90 stopni, sprawne zniżanie do FL150.

Kryteria wyboru lotniska

- ▶ w promieniu 200 NM od pozycji A/C,
- ▶ w zasięgu samolotu,
- ▶ nie wybierze lotniska wojskowego,
- ▶ nie wybierze portu lotniczego obsługującego ponad 15 milionów pasażerów rocznie,
- ▶ nie wybierze lotniska bez ATS,
- ▶ nie wybierze lotniska bez opublikowanej procedury RNP,
- ▶ jeśli dostępny jest Digital NOTAM, nie wybierze destynacji zamkniętych NOTAMem.

Rola ATS

- ▶ identyfikacja co to za przypadek,
- ▶ oczyszczenie przestrzeni dla takiego lotu,
- ▶ informowanie kolejnych zainteresowanych służb,
- ▶ potraktowanie sytuacji jako awaryjnej wraz z „chorym na pokładzie”.

Z rozmów z polskimi przedstawicielami producentów tych samolotów (grudzień 2025), do naszego kraju zostało sprzedanych już około 15 samolotów wyposażonych w ten system.

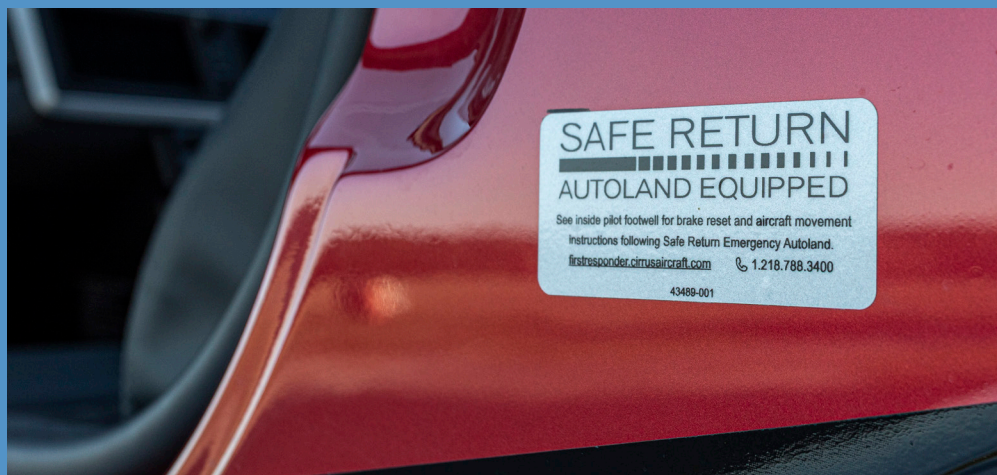
Jak widzimy, powyższe samoloty to raczej finansowa awangarda general aviation. Trzeba jednak pamiętać, że podobną rewolucję, a potem „trafienie pod strzechy” w małym lotnictwie przechodziliśmy już kilkakrotnie. Podobnie było np. z pojawieniem się glasscockpitów w małych samolotach. Z początku było to rozwiązanie jakby nadmiarowe, bardzo nowoczesne i niezwykle drogie. Obecnie – powszechne jest choćby w samolotach ultralekkich. Część ich typów nie da się już skonfigurować w oparciu o przyrządy klasyczne.

Podobnie było ze spadochronem ratowniczym dla całego statku powietrznego. Tu 30 lat temu pionierem była amerykańska firma Cirrus, która od początku spadochron montowała do swoich samolotów jako wyposażenie standardowe, nie dało się więc kupić Cirrusa bez spadochronu. Dziś firma szczyci się, że jak dotąd (dane na 3 listopada 2025) na świecie były 143 użycia spadochronów w Cirrusach, które uratowały 283 osoby. Znowu, na początku wizjonerskie wyposażenie bezpieczeństwa zarezerwowane dla najbogatszych, a dziś około połowy latających w Polsce ultralajtów ma zamontowany spadochron ratowniczy.

Czy „koncept autoland” zejdzie w dół, do szerokiej grupy producentów i wielu typów samolotów – nie mam co do tego wątpliwości. Na razie ograniczeniem dla ultralajtów są zaawansowane funkcje autopilota – np. sterowanie mocą (autothrottle), czy sterowanie na ziemi. Ale przecież jeszcze przecież nie tak dawno nikt w ogóle nie śnił o jakimkolwiek autopilocie w samolocie ultralekkim...

Na marginesie, spójrzmy w rubrykę „wyposażenie awaryjne” formularza planu lotu. Oczywiście nie znajdziemy kwadracika do zaznaczenia, że dany samolot ma system Autoland bo to śpiewka ostatnich kilku lat. Ale też... nie znajdziemy tam śladu zauważenia przez lotnicze władze świata, że małe lotnictwo na potęgę lata dziś ze spadochronami ratowniczymi, a to trwa już od dekad. Za to znajdziemy nieśmiertelne ELT, radiostację VHF czy wyposażenie dżunglowe lub polarne.

Informacja dla służb lotniskowych



źródło: Andrzej Rutkowski

Samolot wylądował i co dalej? Należy zakładać, że po wylądowaniu i ewakuowaniu się pasażerów, zahamowany samolot pozostanie na środku dogi startowej i będzie nadawać na częstotliwości TWR ostrzeżenie o swojej obecności.

Na ekranie glasscockpitu powinna pojawić się informacja dla służb przybyłych na miejsce zdarzenia o tym jak wyłączyć nadawanie komunikatu i jak odhamować samolot w celu usunięcia go z pasa – żeby nie robić tego na siłę, co mogłoby się skończyć jego uszkodzeniem. Niektórzy producenci (jak np. Cirrus) umieszczają dodatkowe informacje na ten temat na nalepkach na kadłubie przy drzwiach do kabiny.

Miles Remaining
0 Miles

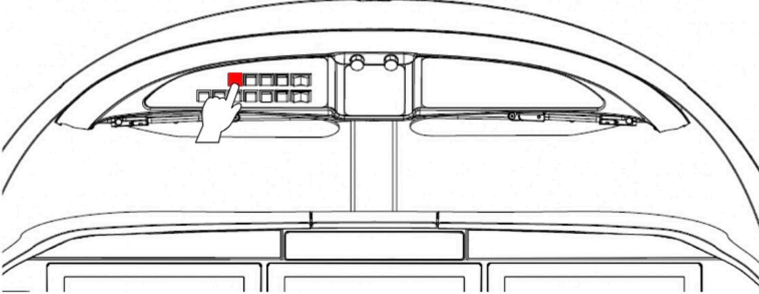
EMERGENCY AUTOLAND ACTIVE

Total Fuel Remaining
 0.0 Hours

LANDED

FOR FIRST RESPONDERS

Press Battery Switch on Overhead Switch Panel to Shutdown Aircraft



THIS WILL RELEASE BRAKES AND END EMERGENCY TRANSMISSIONS

Shutdown Procedure

źródło: Piper Aircraft

No i na koniec zagadka: a co się wydarzy, jeśli aktywowany w polskim FIR Autoland wybierze Szymany na lotnisko awaryjnego lądowania, czyli port lotniczy w rejonie, którego piloci borykają się z częstymi zakłóceniami GNSS? Wątpię czy inżynierowie z Garmina przewidując wszystko przewidzieli także taki przypadek.

Andrzej Rutkowski
współpraca Bartłomiej Rabiński

Frazeologia awaryjna systemu Autoland

Po aktywacji Autolandu, samolot nada następujący komunikat na ostatnio używanej częstotliwości ATS: *"May-day, May-day, May-day, aircraft <callsign> has activated an emergency automatic landing system. Standby for information."*

Następnie, po dokonaniu wyboru miejsca lądowania z drugiego zestawu radiostacji na 121,5MHz będzie nadawał co 5 minut:

"Aircraft <callsign>, pilot incapacitation, <distance from destination airport> miles <direction from destination airport> of <destination airport>, Emergency Autoland in <estimated time remaining> on runway <runway> at <destination airport>."

Następnie pojawi się komunikat:

"Aircraft <callsign>, diverting to <destination airport> on runway <runway>."

Po lądowaniu, samolot będzie rozgłaszał:

"Attention <destination airport> traffic, aircraft <callsign> disabled on runway <runway>."

Na początku, jeżeli pojawiłyby się problemy z wyborem miejsca awaryjnego lądowania samolot będzie nadawał:

"Aircraft <callsign>, pilot incapacitation. Searching for a destination."

Warto dodać, że pasażer także może zacząć prowadzić korespondencję radiową poprzez włączenie przycisku PTT przerywając tym samym automatyczne nadawanie komunikatów. Po zakończonej transmisji przez pasażera system wznowi automatyczne nadawanie powyższych komunikatów.

Post scriptum

20 grudnia 2025 miało miejsce pierwsze operacyjne (czyli nie na potrzeby testów) użycie systemu Autoland. Samolot KingAir 200 bezpiecznie wylądował w Rocky Mountain Metropolitan Airport w Kolorado. O ile nie są na ten moment wyjaśnione okoliczności uruchomienia systemu, należy podkreślić, że Autoland zadziałał zgodnie z założeniami – samolot w autonomicznym locie bezpiecznie wylądował na wybranym przez „siebie” lotnisku.



Andrzej Rutkowski

**Informator FIS, instruktor OJTI, local safety expert,
inspektor ATS, pilot turystyczny.**

Sztuczna inteligencja w przyszłym zarządzaniu ruchem lotniczym

Od koncepcji do odpowiedzialnego wdrożenia

Część 1: Od idei do zaufania



Piotr Andrzej Dmochowski

Sztuczna inteligencja (Artificial Intelligence, AI) przestaje być technologiczną ciekawostką, a staje się jednym z istotnych narzędzi transformujących sektor lotniczy. Jako technologia ogólnego przeznaczenia umożliwia analizę dużych zbiorów danych, identyfikację złożonych zależności oraz wsparcie decyzji operacyjnych w skali niedostępnej dla klasycznych systemów automatyzacji. Jej potencjał jest szczególnie widoczny w lotnictwie, gdzie bezpieczeństwo, czas reakcji i jakość informacji mają kluczowe znaczenie.

Zarządzanie ruchem lotniczym w Europie staje wobec nowych wyzwań. Presja wzrostu ruchu, ambicje środowiskowe, większa zmienność pogodowa, potrzeba zwiększania przepustowości bez rozbudowy infrastruktury, nowi uczestnicy ruchu (drony, U-space, operacje autonomiczne) oraz obecna struktura instytucjonalna europejskiego ATM (Air Traffic Management), oparta na współpracy wielu podmiotów, wszystko to razem generuje złożoność, która sprawia, że obecne narzędzia wsparcia decyzji stopniowo tracą swoją efektywność.

W tym kontekście sztuczna inteligencja oferuje zmianę jakościową. Modele predykcyjne, algorytmy uczenia maszynowego i narzędzia analizy wielowymiarowych danych mogą zwiększyć dokładność prognoz trajektorii, przyspieszyć wykrywanie konfliktów, poprawić zarządzanie przepływaniami oraz wesprzeć podejmowanie decyzji w sytuacjach niestandardowych. Wdrożenie AI nie oznacza jednak prostego rozszerzenia funkcjonalności istniejących systemów. Wymaga ono spójnych ram regulacyjnych, odpowiedniego podejścia do odpowiedzialności, integracji z systemami legacy (tzw. dziedzicznymi), przede wszystkim jednak zachowania nadrzędnej roli człowieka w procesie decyzyjnym.

Niniejszy cykl artykułów pt. „Sztuczna inteligencja w przyszłym zarządzaniu ruchem lotniczym” został podzielony na dwie komplementarne części. Pierwsza z nich koncentruje się na fundamentach odpowiedzialnego wdrażania AI w środowisku ATM. Wyjaśnia, dlaczego potrzeba wykorzystania tych technologii staje się coraz bardziej wyraźna, jak zmienia się relacja człowieka z systemami oraz jakie zasady etyczne i regulacyjne warunkują dopuszczalność ich stosowania. Omawia również europejskie ramy prawne i normalizacyjne. Od EU AI Act, przez działania EASA (European Union Aviation Safety Agency), po standardy

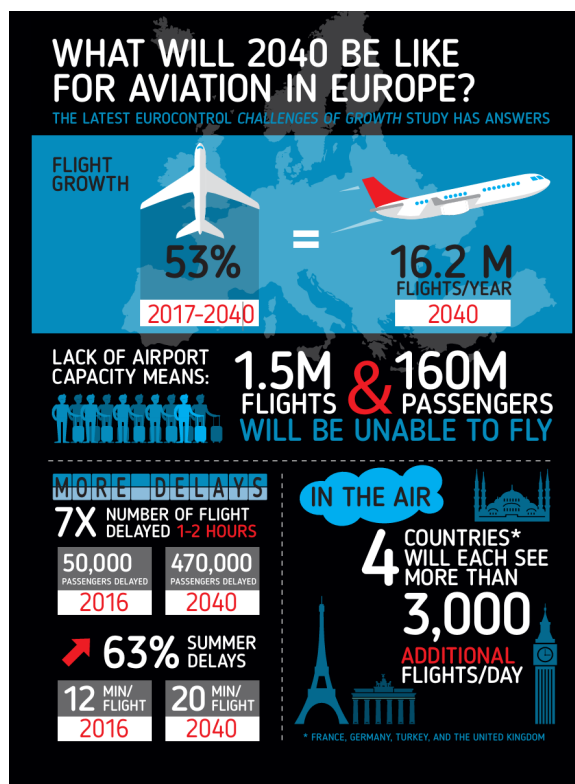
EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment), które będą kształtować przyszły proces certyfikacji systemów opartych na uczeniu maszynowym.

Druga część cyklu (będzie nosiła podtytuł: „AI w praktyce – technologie i zastosowania w ATM”) przeniesie rozważania na poziom praktyczny. Przedstawi istniejące i rozwijane zastosowania AI w ATM, omówi kierunki dalszego rozwoju oraz związane z nimi wyzwania techniczne, operacyjne i organizacyjne, a także spojrzy na wdrażanie tych technologii z perspektywy polskiej, w tym roli PAŻP w europejskiej transformacji ATM.

Punktem odniesienia dla obu części pozostaje bezpieczeństwo. Każdy nowy element wprowadzany do systemu ATM musi wzmacniać jego stabilność i odporność. AI może realnie zwiększyć przewidywalność i efektywność zarządzania ruchem lotniczym, ale wyłącznie wtedy, gdy jej działanie pozostaje transparentne, poddane nadzorowi człowieka i zgodne z zasadami środowiska safety-critical.

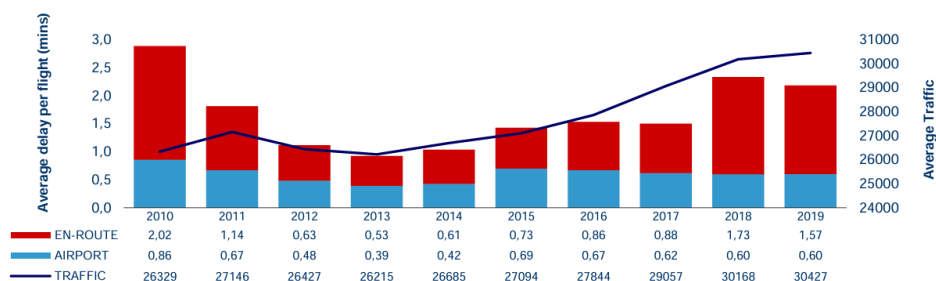
1. AI w ATM – dlaczego teraz?

Znaczenie sztucznej inteligencji w zarządzaniu ruchem lotniczym nie wynika z chwilowej fascynacji nową technologią, lecz z narastających wyzwań operacyjnych i strategicznych, które w nadchodzących latach będą determinować rozwój europejskiego ATM. Prognozy EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation) wskazują, że do 2040 roku ruch lotniczy w Europie może wzrosnąć nawet o ponad 50% (Rys. 1.).



Rys. 1. Rok 2040 w europejskim lotnictwie, źródło: [60]

Bez wprowadzenia nowych, wydajniejszych narzędzi wsparcia decyzji grozi to powrotem do chronicznych opóźnień znanych z lat 2018–2019, wynikających z ograniczonej przepustowości sieci (Rys. 2.).



Rys. 2. Średni dzienny ruch i opóźnienia ATFM na lot (w trakcie lotu i na lotnisku) w latach 2009–2019, źródło [64]

Wzrost ruchu nie jest jednak jedynym czynnikiem presji. Równolegle rosną wymagania środowiskowe, sformułowane m.in. w inicjatywach *Destination 2050* oraz *ICAO LTAG (Long-Term Global Aspirational Goal for CO₂)*. ATM jest jednym z kluczowych obszarów, w których możliwe jest ograniczanie emisji poprzez skracanie trajektorii lotów, lepszą koordynację strategiczną i redukcję holdingów. Realizacja tych celów wymaga jednak precyzyjnych systemów predykcyjnych zdolnych do analizy złożonych zależności w czasie zbliżonym do rzeczywistego, czyli możliwości, które oferują narzędzia oparte na AI.

Istotnym wyzwaniem pozostaje także rosnąca zmienność warunków meteorologicznych. Analizy EUROCONTROL NM (European Organisation for the Safety of Air Navigation, Network Manager), IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) oraz publikacje SKYbrary potwierdzają, że zdarzenia pogodowe coraz częściej destabilizują operacje lotnicze. Zarządzanie taką sytuacją wymaga modeli przewidujących nie tylko trajektorie, lecz również dynamikę zjawisk meteorologicznych. Klasyczne modele deterministyczne nie zapewniają wystarczającej adaptacyjności, podczas gdy rozwiązania wykorzystujące AI są już stosowane w krótkoterminowym prognozowaniu pogody (tzw. nowcasting), m.in. w projektach SESAR (Single European Sky ATM Research).

Kolejnym ograniczeniem są zasoby infrastrukturalne i kadrowe. Niedobory personelu ATC oraz długi cykl inwestycyjny systemów CNS/ATM (Communications, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management) sprawiają, że zwiększanie przepustowości musi opierać się przede wszystkim na bardziej efektywnym wykorzystaniu istniejących zasobów. Obejmuje to lepsze planowanie przepływów, dynamiczne zarządzanie przestrzenią powietrzną oraz automatyzację wybranych elementów pracy operacyjnej – obszary, w których AI wykazuje największy potencjał.

EUROCONTROL NMOC (Network Manager Operations Centre) i SESAR Deployment Manager identyfikują przy tym szereg powtarzających się problemów operacyjnych, takich jak ograniczona dokładność predykcji trajektorii, niska odporność sieci na zakłócenia pogodowe czy wydłużający się czas reakcji na zdarzenia nieplanowane. Analizy zdarzeń publikowane w SKYbrary wskazują, że wiele zagrożeń narasta w sposób trudny do dostrzeżenia na wczesnym etapie. Modele predykcyjne oparte na AI mogą wykrywać takie sygnały wcześniej, zwiększając margines czasowy na reakcję kontrolera. Przykładem takich prób są testy w ramach programów SESAR Exploratory Research, m.in. projektów OPTICS2 (Observation Platform for Technological and Institutional Consolidation of research in Safety and Security) i SINAPSE (Software defined networking architecture augmented with Artificial Intelligence to improve aeronautical communications performance, security and efficiency).

ATM generuje ogromne ilości danych: radarowych, ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), meteorologicznych, planistycznych i operacyjnych. Klasyczne systemy automatyzacji nie są w stanie efektywnie wykorzystywać tej skali informacji. AI wprowadza nową jakość, umożliwiając adaptacyjne i probabilistyczne przetwarzanie wielowymiarowych strumieni danych. Badania realizowane w ramach SESAR pokazują, że może to prowadzić m.in. do poprawy dokładności krótkoterminowych prognoz trajektorii, ograniczenia liczby fałszywych alarmów oraz zwiększenia precyzji prognoz pogodowych.

Równocześnie europejskie instytucje regulacyjne podkreślają konieczność odpowiedzialnego wdrażania tych technologii. EASA w dokumencie *AI Roadmap 2.0* jednoznacznie wskazuje, że rozwój AI w lotnictwie musi opierać się na zasadach transparentności, odtwarzalności i nadzoru ludzkiego. AI ma wspierać bezpieczeństwo i przewidywalność działania systemu, a nie zastępować człowieka w procesie decyzyjnym.

Podsumowując, presja wzrostu ruchu i wymagań środowiskowych, ograniczone zasoby oraz rosnąca zmienność operacyjna sprawiają, że dotychczasowe podejścia wyczerpują swój potencjał. Jednocześnie rozwój uczenia maszynowego, dostępność danych i europejskie ramy regulacyjne tworzą warunki do kontrolowanego wdrażania AI. W tym sensie sztuczna inteligencja staje się nie tyle opcją, co koniecznym narzędziem wspierającym bezpieczeństwo, odporność i spójność europejskiego systemu ATM.

UWAGA:

Na koniec każdej sekcji zbiorczo podane zostaną wskazania bibliograficzne, opracowań wykorzystanych do napisania tego fragmentu tekstu. Będą to odwołania do zbiorczej bibliografii umieszczonej na końcu artykułu.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [2], [27], [30], [51], [56], [57], [59], [60], [64], [68], [83], [86], [98], [118], [120], [123], [124], [132], [133].

2. Od automatyzacji do współpracy człowiek-AI

Automatyzacja w zarządzaniu ruchem lotniczym ma już długą historię, a jej kolejne odsłony znacząco zmieniały sposób pracy kontrolera. Systemy takie jak ERATO (En-Route Air Traffic Organiser), iFACTS (interim Future Area Control Tools Support) czy MTCD (Medium-Term Conflict Detection) stopniowo przesuwają ATM od podejścia reaktywnego w stronę coraz bardziej predykcyjnego. Była to jednak automatyzacja oparta głównie na regułach i statycznych algorytmach. Dopiero rozwój sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego umożliwił przejście od klasycznej automatyzacji do modelu współpracy człowiek-AI, określanego obecnie jako Human-AI Teaming.

Różnica pomiędzy tymi podejściami ma charakter fundamentalny. Tradycyjne systemy automatyczne realizują z góry zdefiniowane procedury, reagują na określone zdarzenia i prezentują wynik w postaci alertów lub rekomendacji. Nie uczą się jednak i nie adaptują do zmieniających się warunków operacyjnych. W modelu współpracy człowiek-AI, system pełni rolę inteligentnego partnera. Analizuje duże zbiory danych, identyfikuje zależności i proponuje rozwiązania, które człowiek ocenia, modyfikuje lub odrzuca. Odpowiedzialność decyzyjna pozostaje po stronie kontrolera, co jest zgodne z europejską zasadą automatyzacji zorientowanej na człowieka (Human-Centric Automation).

Przejście do tego modelu oznacza zmianę roli kontrolera. Z operatora reagującego na bieżące zdarzenia staje się on menedżerem złożonych procesów, podejmującym decyzje w oparciu o pogłębioną analizę dostarczaną przez inteligentne narzędzia.

Klasycznym punktem odniesienia dla opisu relacji człowiek–system pozostaje 10-stopniowa skala poziomów automatyzacji Sheridana i Verplancka (Levels of Automation – LoA). Skala ta nie jest modelem predykcyjnym, lecz taksonomią porządkującą możliwe konfiguracje podziału odpowiedzialności, czyli od pełnej kontroli człowieka po całkowitą autonomię systemu. Jej znaczenie polega na tym, że pokazuje automatyzację jako kontinuum, a nie wybór „wszystko albo nic” (Tabela 1.).

Poziom	Opis działania
Niski	1. Komputer nie oferuje żadnej pomocy, człowiek musi podejmować wszystkie decyzje i działania
	2. Komputer oferuje kompletny zestaw alternatywnych decyzji/działania lub
	3. Zawęża wybór do kilku opcji lub
	4. Sugeruje jedną alternatywę i
	5. Wykonuje tę sugestię, jeśli człowiek wyrazi zgodę, lub
	6. Pozwala człowiekowi na ograniczony czas na weto przed automatycznym wykonaniem
	7. Wykonuje automatycznie, a następnie koniecznie informuje człowieka, oraz
	8. Informuje człowieka tylko na jego prośbę, lub
	9. Informuje człowieka tylko wtedy, gdy komputer sam tak zdecyduje
Wysoki	10. Komputer decyduje o wszystkim, działa autonomicznie, ignoruje człowieka

Tab. 1. Poziomy automatyzacji podejmowania decyzji i wyboru działań, źródło: [145]

Twórczym rozwinięciem tej koncepcji jest model zaproponowany przez Parasuramana, Sheridana i Wickensa, który porządkuje automatyzację według czterech funkcji: pozyskiwania informacji, analizy informacji, podejmowania decyzji oraz realizacji działań. Model ten podkreśla, że automatyzacja zmienia charakter pracy człowieka i może generować nowe wymagania koordynacyjne, dlatego wybór funkcji i poziomu automatyzacji musi być świadomy i oparty na analizie wpływu na wydajność oraz bezpieczeństwo.

Na tej podstawie w ramach SESAR opracowano macierz poziomów automatyzacji (LOAT), która zastępuje jedną liniową skalę podejściem wielowymiarowym. Pokazuje ona, że w rzeczywistych systemach ATM automatyzacja niemal nigdy nie jest jednolita, ponieważ różne funkcje mogą być zautomatyzowane na różnych poziomach. Takie podejście lepiej odzwierciedla złożoność środowiska operacyjnego i umożliwia projektowanie systemów wspierających, a nie zastępujących człowieka (Tabela 2.).

Analiza tych modeli jednoznacznie wskazuje na obszary, w których kompetencje kontrolera pozostają niezastąpione. Należą do nich m.in. intuicyjne łączenie informacji z wielu źródeł, rozpoznawanie zamiarów i niestandardowych zachowań, elastyczność poznawcza oraz zarządzanie sytuacjami nietypowymi i awaryjnymi. W literaturze lotniczej cechy te są wskazywane jako kluczowy argument za utrzymaniem człowieka w pętli decyzyjnej w systemach ATM.

W tym kontekście AI jest projektowana jako „drugi analityk”, który filtruje dane, wykrywa odchylenia od normy i wspiera proces decyzyjny, szczególnie w obszarach charakteryzujących się dużą złożonością danych, nieliniowymi zależnościami oraz presją czasu. Najbardziej dojrzałe zastosowania obejmują predykcję konfliktów i detekcję anomalii, prognozowanie trajektorii i czasów przylotu, wsparcie sekwencjonowania ruchu (AMAN/DMAN, Arrival Manager / Departure Manager) oraz analizę ruchu naziemnego w systemach wież cyfrowych.

Od INFORMACJI do DZIAŁANIA →

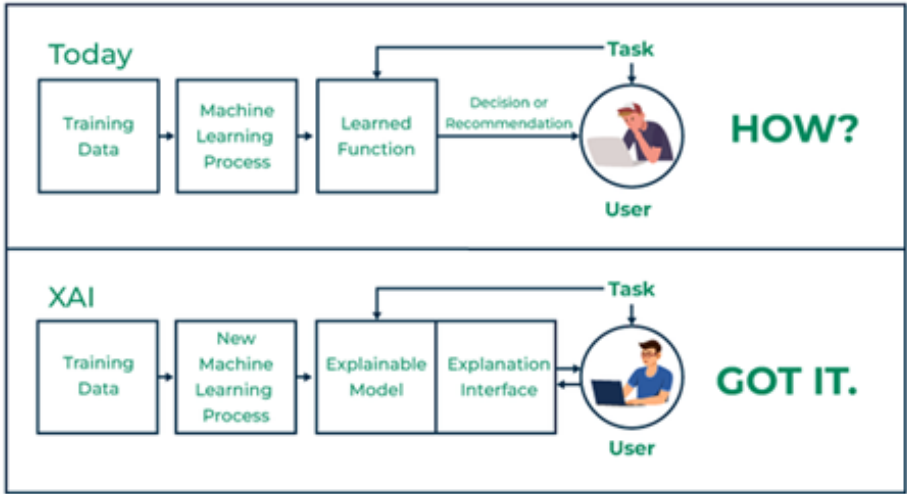
↓
ZWIĘKSZANIE AUTOMATYZACJI

A POZYSKIWANIE INFORMACJI	B ANALIZA INFORMACJI	C PODEJMOWANIE DECYZJI I WYBÓR DZIAŁAŃ	D REALIZACJA DZIAŁAŃ
A0 Ręczne pozyskiwanie informacji	B0 Analiza oparta na pamięci roboczej	C0 Podejmowanie decyzji wyłącznie przez człowieka	D0 Ręczna akcja i kontrola
A1 Wspomagane artefaktami	B1 Wspomagana artefaktami	C1 Wspomagane artefaktami	D1 Wspomagana artefaktami
A2 Wsparcie niskiego poziomu	B2 Wsparcie niskiego poziomu	C2 Automatyczne wsparcie decyzji	D2 Wsparcie krok po kroku
A3 Wsparcie średniego poziomu	B3 Wsparcie średniego poziomu	C3 Sztwyne automatyczne wsparcie decyzji	D3 Wsparcie niskiego poziomu wykonywania sekwencji akcji
A4 Wsparcie wysokiego poziomu	B4 Wsparcie wysokiego poziomu	C4 Automatyczne podejmowanie decyzji – niski poziom	D4 Wsparcie wysokiego poziomu wykonywania sekwencji akcji
A5 Pełna automatyzacja	B5 Pełna automatyzacja	C5 Automatyczne podejmowanie decyzji – wysoki poziom	D5 Automatyzacja niskiego poziomu sekwencji akcji
		C6 Pełne automatyczne podejmowanie decyzji	D6 Automatyzacja średniego poziomu sekwencji akcji
			D7 Automatyzacja wysokiego poziomu sekwencji akcji
			D8 Pełna automatyzacja sekwencji akcji

Tab. 2. Macierz LOAT, źródło: [136]

Wszystkie te zastosowania mają charakter wspierający, a nie decyzyjny. Warunkiem ich operacyjnego wykorzystania jest zrozumienie działania systemu przez użytkownika. Z tego powodu europejskie regulacje, w tym *AI Roadmap 2.0* EASA, podkreślają znaczenie wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (Explainable AI – XAI). Jej celem jest zapewnienie przejrzystości rekomendacji, wskazanie danych wpływających na wynik oraz umożliwienie kontroli poprawności działania algorytmu, co przeciwdziała efektowi tzw. „czarnej skrzynki” (Rys. 3. i Tabela 3.).

Badania EUROCONTROL Experimental Centre (EEC) potwierdzają, że akceptacja rekomendacji systemu przez kontrolerów znacząco rośnie, gdy są one opatrzone krótkim, jednoznacznym uzasadnieniem. Zrozumienie logiki działania algorytmu staje się warunkiem zaufania, a zaufanie warunkiem bezpiecznego wykorzystania AI w środowisku operacyjnym.



Rys. 3. XAI versus AI, jak dane wejściowe wpłynęły na końcowy wynik, źródło: [77]

Cecha	Black-box AI	XAI
Przejrzystość	Niska – logika niewidoczna	Wysoka – decyzje wyjaśnione globalnie i lokalnie
Dokładność	Zwykle wyższa	Zwykle niższa
Skalowalność	Bardzo dobra, ale wymaga retreningu przy dryfie danych	Dobra i łatwiejsza w utrzymaniu jakości, ale droższa
Odpowiedzialność	Problematiczna	Zintegrowana – pełna dokumentacja, śledzenie decyzji i logów

Tab. 3. Czarna skrzynka versus wyjaśnialne AI (XAI), źródło: [5]

Podsumowując, ATM zmierza w stronę architektury opartej na współpracy człowiek-AI. Kierunek ten wynika zarówno z ograniczeń technologicznych, jak i z nadrzędnych zasad bezpieczeństwa lotniczego. Automatyzacja pozostaje kluczowym elementem systemu, lecz jej nową formą jest inteligentne wsparcie, które zwiększa świadomość sytuacyjną i przewidywalność operacji, przy zachowaniu odpowiedzialności decyzyjnej po stronie człowieka. Jest to podejście konsekwentnie potwierdzane w dokumentach EUROCONTROL, EASA, SESAR oraz w literaturze naukowej.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [5], [30], [39], [42], [43], [63], [65], [77], [101], [104], [105], [107], [112], [119], [126], [128], [131], [134], [135], [136], [137], [144], [145].

3. Etyka i zaufanie w systemach opartych na AI

W środowisku zarządzania ruchem lotniczym bezpieczeństwo stanowi wartość nadrzędną, a każdy element systemu, począwszy od procedur, przez technologie, po interfejsy operatorskie musi tę wartość wzmacniać. W przypadku systemów opartych na sztucznej inteligencji zaufanie nie jest pojęciem abstrakcyjnym ani „miękkim”, lecz warunkiem operacyjnym dopuszczenia technologii do pracy w czasie

rzeczywistym. AI może wspierać kontrolera wyłącznie wtedy, gdy jej działanie jest przejrzyste, zrozumiałe i poddane skutecznemu nadzorowi człowieka.

Takie podejście jest zgodne z europejską koncepcją Human-Centric AI, według której systemy powinny wzmacniać kompetencje użytkownika, a nie przejmować odpowiedzialność decyzyjną. Ich rolą jest filtrowanie danych, wykrywanie zagrożeń oraz wspieranie procesu decyzyjnego zwłaszcza w sytuacjach, w których złożoność operacyjna przekracza możliwości percepcyjne człowieka. Jak podkreśla EASA w *AI Roadmap 2.0*, poziom technicznego zaawansowania algorytmu nie ma znaczenia, jeśli system nie budzi zaufania użytkownika operacyjnego. Brak zaufania prowadzi bowiem do ignorowania rekomendacji lub traktowania systemu jako czynnika rozpraszającego, co może negatywnie wpłynąć na bezpieczeństwo.

W ATM każda decyzja operacyjna, typu: zmiana trasy, prędkości ma bezpośrednie konsekwencje dla bezpieczeństwa, przepustowości i stabilności sieci. Z tego powodu użytkownik musi mieć pewność, że rekomendacje AI opierają się na wiarygodnych danych, poprawnych modelach oraz jasno określonych zasadach działania. Raport EUROCONTROL *FLY AI* wskazuje, że AI może znacząco odciążyć kontrolera w analizach predykcyjnych i monitorowaniu trajektorii, jednak tylko wtedy, gdy kontroler rozumie logikę systemu i zachowuje pełną kontrolę nad decyzją końcową. Zaufanie w ATM ma więc charakter ściśle operacyjny i jest warunkiem koniecznym wykorzystania AI w środowisku o wysokiej krytyczności.

Europejskie standardy projektowania i certyfikacji systemów AI opierają się na trzech fundamentalnych filarach: transparentności, odpowiedzialności oraz braku uprzedzeń w danych i modelach (tzw. *bias*). Dokumenty EASA, SESAR oraz AI Act jednoznacznie wskazują, że systemy ATM należą do kategorii wysokiego ryzyka. Oznacza to, że brak przejrzystości działania, niekontrolowany bias danych lub niemożność audytu procesu decyzyjnego wykluczają ich certyfikację i wdrożenie operacyjne. W praktyce systemy AI stosowane w ATM muszą zapewniać identyfikowalne źródła danych, uzasadnienie rekomendacji, możliwość pełnego audytu oraz mechanizmy monitorowania degradacji modelu lub jakości danych wejściowych.

Z tych powodów wdrażanie AI w ATM wymaga rygorystycznych, wieloetapowych procesów weryfikacji. Metodyka SESAR zakłada najpierw walidację danych i testy w środowiskach symulacyjnych, w tym symulacje w czasie rzeczywistym z udziałem kontrolerów (*human-in-the-loop*). Następnie systemy przechodzą fazę pracy równoległej w trybie *shadow-mode*, w której generują rekomendacje bez wpływu na operację. Dopiero po potwierdzeniu stabilności, przewidywalności i odporności na przypadki skrajne możliwe jest ich stopniowe włączanie do środowiska operacyjnego. Niezależnie od etapu wdrożenia obowiązkowy pozostaje nadzór człowieka oraz ciągły monitoring działania systemu, zgodnie ze standardami EUROCAE i zaleceniami EASA dotyczącymi AI Assurance.

Jednym z kluczowych wyzwań etycznych i technicznych pozostaje tzw. efekt „czarnej skrzynki”. W systemach safety-critical, takich jak ATM, nieprzejrzystość algorytmu jest nie do zaakceptowania. Dlatego wyjaśnialność (Explainable AI – XAI) stanowi podstawowy warunek budowania zaufania operacyjnego i przyszłej certyfikacji rozwiązań opartych na uczeniu maszynowym. Badania Fennedy, K., Hilburn, B., Nadirsha, T. N. M., Alam, S., Le, K.-D., & Li, H., EUROCONTROL Experimental Centre oraz projekty SESAR, takie jak ARTIMATION (Transparent AI and Automation To ATM Systems) czy TAPAS (Towards an Automated and explainable ATM System), pokazują, że nawet krótkie, precyzyjne uzasadnienia rekomendacji znacząco zwiększają akceptację systemu przez kontrolerów. Brak możliwości wyjaśnienia decyzji prowadzi natomiast do ich odrzucania, nawet jeśli skuteczność techniczna algorytmu jest wysoka.

Analogiczne podejście obserwowane jest w innych domenach o wysokich wymaganiach bezpieczeństwa, takich jak: medycyna, gdzie systemy AI klasyfikowane są jako *clinical decision support tools*, czy motoryzacja, gdzie nawet przy wysokich poziomach automatyzacji według klasyfikacji SAE (Society of Automotive

Engineers), konieczny jest aktywny nadzór człowieka. W tych sektorach AI pełni funkcję narzędzia wspierającego decyzje, przy zachowaniu odpowiedzialności po stronie człowieka oraz wymogu przejrzystości działania systemu. Doświadczenia te potwierdzają, że zaufanie użytkownika nie wynika z samej obecności technologii, lecz z jakości interakcji człowiek–system i jasnego określenia granic autonomii.

Wyniki inicjatyw EUROCONTROL FLY AI Forum oraz projektów SESAR, w tym SafeOPS (Safe Operations in Air Traffic Management), prowadzą do spójnego wniosku, że zaufanie operacyjne nie jest cechą algorytmu, lecz relacji między człowiekiem a systemem AI. Sztuczna inteligencja może zwiększać przewidywalność i odporność operacji ATM tylko wtedy, gdy użytkownik rozumie jej działanie, zna ograniczenia modelu i ma możliwość przejęcia kontroli w każdej chwili. W tym sensie etyka, zaufanie i bezpieczeństwo nie stanowią dodatku do technologii AI, lecz jej warunek brzegowy w środowisku zarządzania ruchem lotniczym.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [8], [9], [11], [20], [21], [24], [25], [29], [35], [37], [53], [55], [70], [78], [80], [87], [92], [94], [95], [100], [112], [113], [114], [116], [117], [121], [122], [125], [127], [138], [140], [143].

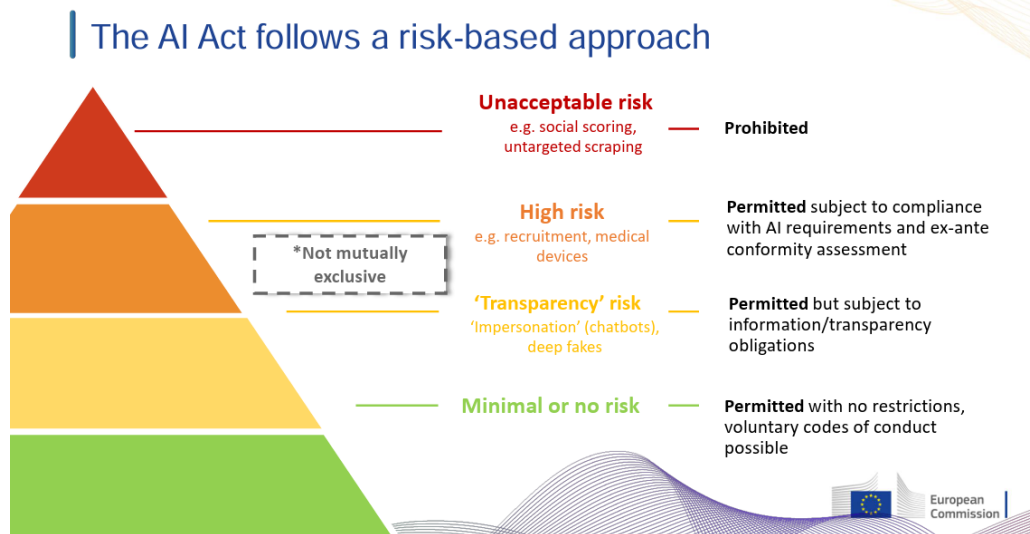
4. Regulacje i standardy AI Act i ramy europejskie

Wdrożenie sztucznej inteligencji w środowisku zarządzania ruchem lotniczym stanowi nie tylko wyzwanie technologiczne, lecz przede wszystkim bardzo delikatne i złożone zadanie regulacyjne. W Europie ramy dopuszczania systemów AI do operacji ATM tworzą trzy wzajemnie powiązane filary: EU AI Act, działania EASA (w tym *AI Roadmap 2.0*) oraz standardy techniczne rozwijane przez EUROCAE. Razem określają one, na jakich zasadach i pod jakimi warunkami systemy oparte na uczeniu maszynowym mogą być projektowane, certyfikowane i wykorzystywane operacyjnie.

EU AI Act wprowadza jednolity, europejski system regulacyjny oparty na analizie ryzyka. Zgodnie z nim wszystkie systemy AI, które mogą wpływać na bezpieczeństwo lub zdrowie ludzi, są klasyfikowane jako systemy wysokiego ryzyka (*high-risk*). Do tej kategorii jednoznacznie zaliczają się systemy wykorzystywane w krytycznej infrastrukturze transportowej, w tym w lotnictwie cywilnym i ATM. Obejmuje to m.in. narzędzia wspomagania decyzji operacyjnych, predykcji konfliktów, zarządzania obciążeniem sektorów, alokacji przestrzeni powietrznej oraz automatyzację opartą na uczeniu maszynowym – niezależnie od poziomu autonomii (rys. 5.).

Klasyfikacja *high-risk* nakłada na producentów i użytkowników systemów szereg wiążących obowiązków obejmujących cały cykl życia rozwiązania. Należą do nich m.in. ocena zgodności przed wdrożeniem, stosowanie wysokiej jakości danych, zarządzanie ryzykiem modelu, dokumentacja wyjaśniająca działanie systemu, audytowalność oraz rejestrowanie ścieżki decyzyjnej. Zgodnie z zasadą *compliance before deployment* system niespełniający tych wymagań nie może zostać dopuszczony ani do rynku, ani do użytku operacyjnego. W środowisku safety-critical, jakim jest ATM, podejście to gwarantuje, że innowacje nie są wdrażane kosztem bezpieczeństwa.

AI Act tworzy ramy prawne o charakterze horyzontalnym, celowo pozostawiając część pojęć takich jak *robustness*, *fairness*, *data quality* czy *resilience* na wysokim poziomie ogólności. Dla ATM oznacza to konieczność ich doprecyzowania w harmonizowanych standardach technicznych. Kluczową rolę odgrywają tu EASA, EUROCAE (m.in. grupy WG-114 i WG-115) oraz europejskie organizacje normalizacyjne CEN/CENELEC (Comité Européen de Normalisation / Comité Européen de Normalisation Électrotechnique). Dopiero standardy branżowe określają, jak interpretować wymagania AI Act w kontekście operacyjnym zarządzania ruchem lotniczym.

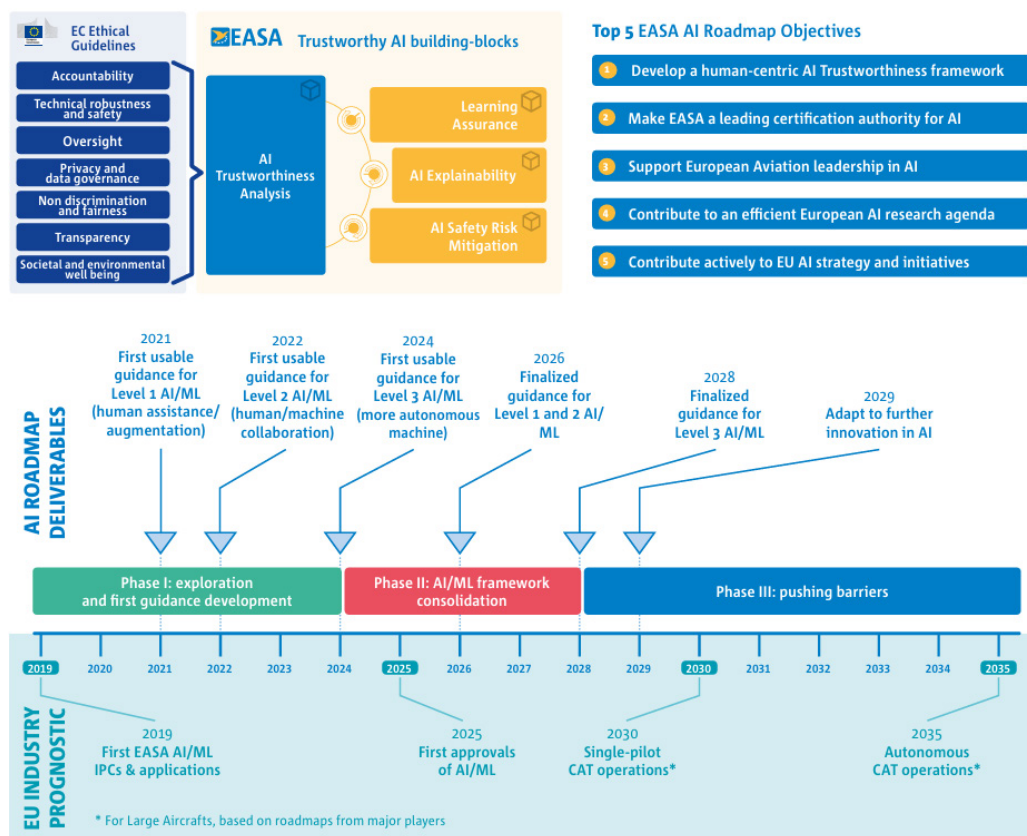


Rys. 5. Akt o sztucznej inteligencji (AI Act) opiera się na podejściu opartym na ryzyku, źródło: [38]

EASA pełni funkcję wiodącego regulatora dla zastosowań AI w lotnictwie. W *AI Roadmap 2.0* definiuje poziomy zdolności AI – od systemów bez elementów AI (Level 0), przez obecnie stosowane narzędzia wspomagające człowieka (Level 1), aż po bardziej zaawansowane formy współpracy człowiek-AI i automatyzacji, przewidywane po 2030 roku. ATM znajduje się dziś wyłącznie na poziomie Level 1, co oznacza, że AI może wspierać operatora, lecz nie przejmować autonomicznego podejmowania decyzji. Przejście do wyższych poziomów będzie możliwe jedynie po opracowaniu pełnych standardów technicznych i metod zapewnienia bezpieczeństwa (Rys. 6.).

Równoległe do działań EASA (zgodnie z *AI Roadmap 2.0*), EUROCAE we współpracy z SAE International (grupa WG-114/G-34) rozwija globalne normy techniczne dla systemów uczenia maszynowego (ML). Kluczowym dokumentem jest standard ED-324 / ARP6983, którego publikacja planowana jest na pierwszą połowę 2026 roku (po fazie Open Consultation 2025). Dokument ten określi procesy projektowania, weryfikacji i certyfikacji ML, stanowiąc niezbędne uzupełnienie dla norm DO-178C (oprogramowanie pokładowe) oraz ARP4754B (systemy ATM/ANS i procesy systemowe). Pierwsza edycja skupia się na nadzorowanym uczeniu maszynowym (Supervised ML), wprowadzając rygorystyczne wymagania dotyczące jakości danych, stabilności modelu oraz monitorowania jego degradacji w czasie rzeczywistym. Wraz z dokumentami takimi jak ER-022 (Statement of Concerns) i ER-027 (Taxonomy), ED-324 tworzy pierwszy na świecie kompletny system certyfikacji dla krytycznych z punktu widzenia bezpieczeństwa komponentów ML w lotnictwie.

Nowe regulacje fundamentalnie zmieniają sposób projektowania i wdrażania systemów automatyzacji w ATM. Oprócz funkcjonalności i niezawodności oceniane są teraz także dane, procesy uczenia, wyjaśnialność, audytowalność i odporność modeli. Dla instytucji ANSP oznacza to konieczność budowania kompetencji w obszarach zarządzania danymi, oceny ryzyka modeli, walidacji systemów ML oraz przygotowywania dokumentacji certyfikacyjnej.



Rys. 6. EASA AI Roadmap, źródło: [35]

AI Act wprowadza również obowiązki związane z ciągłym monitoringiem i raportowaniem incydentów po wdrożeniu systemu. Obejmuje to wykrywanie degradacji danych, spadku pewności modelu oraz zdarzeń mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo operacji. Niezmiennym wymogiem pozostaje nadzór człowieka (*human-in-the-loop* / *human-on-the-loop*), który musi być zapewniony na wszystkich etapach eksploatacji systemu.

W efekcie regulacje i standardy stają się fundamentem każdego wdrożenia AI w ATM. Proces rozwoju technologii przestaje być zbiorem lokalnych eksperymentów, a staje się spójnym, audytowalnym i nadzorowanym cyklem – od analizy ryzyka, przez projektowanie zgodne z wymogami prawa, testy w trybie *shadow-mode*, certyfikację, aż po ciągły monitoring. Dla ATM oznacza to dłuższe i bardziej wymagające procedury, ale jednocześnie większą przewidywalność, interoperacyjność i bezpieczeństwo. Jest to koszt, który stanowi inwestycję w to, aby sztuczna inteligencja mogła stać się realnym, bezpiecznym i użytecznym narzędziem operacyjnym.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [1], [6], [7], [10], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [21], [28], [30], [31], [33], [34], [35], [38], [40], [41], [45], [46], [62], [67], [69], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [81], [82], [91], [96], [97], [99], [103], [106], [118], [120], [123], [124], [132], [133].

5. Kompetencje przyszłości – AI literacy w służbach ATM

Rosnące wykorzystanie sztucznej inteligencji w zarządzaniu ruchem lotniczym zmienia profil kompetencji wymaganych od wszystkich grup zawodowych w ATM. Aby narzędzia AI mogły być stosowane bezpiecznie i efektywnie, człowiek musi rozumieć ich logikę działania, ograniczenia oraz sposób generowania rekomendacji. Oznacza to przejście od modelu pracy opartego wyłącznie na procedurach do modelu współpracy człowieka z inteligentnym systemem, w którym operator świadomie ocenia i interpretuje wsparcie algorytmiczne. Kluczowym pojęciem staje się tu AI literacy.

Podstawowym elementem AI literacy jest ogólna wiedza o sztucznej inteligencji. Kontrolerzy, inżynierowie i menedżerowie nie muszą być specjalistami od uczenia maszynowego, lecz powinni rozumieć, czym są modele probabilistyczne, na czym polega predykcja, jakie są różnice między danymi treningowymi, walidacyjnymi i testowymi oraz jakie ograniczenia mają modele ML. Taka wiedza pozwala realistycznie ocenić wiarygodność rekomendacji systemu.

Drugim kluczowym obszarem jest zdolność krytycznej oceny wyników generowanych przez AI. Systemy nie podejmują decyzji autonomicznie, odpowiedzialność zawsze spoczywa na człowieku. Operator musi być świadomy, że modele mogą popełniać błędy, zwłaszcza w sytuacjach nietypowych, przy niekompletnych danych lub w warunkach dynamicznych zmian operacyjnych. Umiejętność rozpoznawania takich sytuacji stanowi fundament efektywnego human-AI teaming.

Istotna jest również świadomość danych, ich źródeł, jakości, aktualności oraz potencjalnych ograniczeń. Ponieważ jakość działania AI jest bezpośrednio zależna od jakości danych, brak wiedzy w tym zakresie może prowadzić do błędnych interpretacji i zwiększonego ryzyka operacyjnego. Kompetencje związane z danymi stają się więc elementem bezpieczeństwa systemowego.

Nieodzowną częścią AI literacy jest także znajomość ram regulacyjnych. Wymogi EU AI Act, zasady transparentności, audytowalności, dokumentowania decyzji oraz nadzoru człowieka nie są kompetencją dodatkową, lecz warunkiem dopuszczenia do pracy z systemami AI w środowisku safety-critical. Bez zrozumienia tych zasad spełnienie wymagań regulacyjnych w praktyce jest niemożliwe.

Kolejnym aspektem jest umiejętność efektywnej współpracy z systemami AI, czyli rozpoznawanie sytuacji, w których rekomendacja powinna zostać przyjęta, zakwestionowana lub zastąpiona działaniem manualnym. Wymaga to odpowiedniego szkolenia, doświadczenia oraz zrozumienia granic automatyzacji. Ze względu na szybki rozwój technologii niezbędna staje się także gotowość do ciągłego uczenia się i aktualizacji kompetencji.

W polskim systemie ATM szczególną rolę w kształtowaniu tych kompetencji odgrywa PANSa jako narodowy dostawca służb żeglugi powietrznej. W obliczu rosnącej automatyzacji to właśnie PANSa może wyznaczać kierunek transformacji kompetencyjnej, obejmującej zarówno personel operacyjny, jak i zaplecze szkoleniowe oraz badawczo-rozwojowe. Jednym z możliwych działań jest stworzenie spójnego programu szkoleniowego „AI w ATM”, łączącego elementy teoretyczne (AI literacy, regulacje, etyka), praktyczne (praca z narzędziami predykcyjnymi, interpretacja rekomendacji) oraz szkolenia okresowe.

Uzupełnieniem tych działań powinna być pogłębiona współpraca z uczelniami technicznymi, instytutami badawczymi i europejskimi inicjatywami, takimi jak SESAR, EASA czy EUROCAE. Aktywne uczestnictwo w projektach badawczych i pracach standaryzacyjnych pozwala nie tylko na transfer wiedzy, lecz także na realny wpływ na kształt przyszłych rozwiązań i norm.

Badania europejskie wskazują, że brak zaufania i zrozumienia systemów AI wynikający z niskiego poziomu AI literacy jest jedną z głównych przyczyn ich odrzucania w środowiskach operacyjnych. Inwestycja w kompetencje staje się więc warunkiem zarówno bezpieczeństwa, jak i efektywności operacyjnej. Wraz z rosnącymi wymaganiami regulacyjnymi oraz planowanym wdrażaniem bardziej zaawansowanych poziomów AI po 2030 roku, przygotowanie użytkowników staje się kluczowym czynnikiem sukcesu transformacji ATM.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [3], [18], [19], [22], [23], [26], [36], [49], [50], [52], [58], [84], [85], [88], [89], [90], [93], [102], [108], [109], [110].

6. Podsumowanie – odpowiedzialna transformacja ATM

Europejski system zarządzania ruchem lotniczym stoi dziś u progu największej transformacji od czasu wprowadzenia radarów wtórnych i zautomatyzowanych systemów planowania lotów. Na podstawie wytycznych EASA, SESAR i EUROCONTROL można wskazać cztery fundamentalne zasady, które muszą pozostać nienaruszalne przy wdrażaniu sztucznej inteligencji w ATM: bezpieczeństwo, przejrzystość, interoperacyjność oraz human-centric oversight. To filary odpowiedzialnego i trwałego wykorzystania AI w środowisku safety-critical:

► **Bezpieczeństwo – wartość nadrzędna**

Niezależnie od stopnia zaawansowania technologii, bezpieczeństwo pozostaje absolutnym priorytetem ATM. Sztuczna inteligencja może zwiększać odporność systemu, przewidywać konflikty czy optymalizować obciążenie sektorów, jednak jej wdrażanie musi zawsze podlegać zasadzie *safety first, automation second*. Bezpieczeństwo nie jest jednym z kryteriów wdrożeniowych, lecz warunkiem brzegowym wszystkich decyzji technicznych, operacyjnych i regulacyjnych. Kluczowym elementem tego podejścia są m.in. obowiązkowe testy w trybie *shadow-mode* przed dopuszczeniem systemu do pracy operacyjnej.

► **Przejrzystość – warunek zaufania i dopuszczenia do operacji**

W ATM przejrzystość systemów AI ma charakter operacyjny, a nie wyłącznie techniczny. Kontroler musi rozumieć, dlaczego algorytm generuje daną rekomendację, szczególnie w sytuacjach przeciążenia lub niestandardowych warunków pracy. System, którego działania nie da się wyjaśnić, staje się bezużyteczny niezależnie od jego skuteczności. Z tego powodu EASA i EUROCAE traktują wyjaśnialną AI (XAI) jako warunek konieczny dopuszczenia AI do środowiska safety-critical. Systemy niewyjaśnialne nie mogą zostać zatwierdzone operacyjnie.

► **Interoperacyjność – AI jako element europejskiej sieci**

ATM funkcjonuje jako zintegrowana sieć europejska, dlatego systemy AI muszą być projektowane jako jej spójna część, a nie lokalne, izolowane rozwiązania (tzw. wyspy technologii). Interoperacyjność obejmuje cztery wzajemnie powiązane poziomy:

- techniczny (wspólne formaty danych, SWIM, 4D trajektorii),
- operacyjny (zgodność z europejskimi koncepcjami operacyjnymi),
- regulacyjny (zgodność z AI Act, EASA i standardami EUROCAE),
- organizacyjny (harmonizacja wdrożeń i praktyk).

Brak interoperacyjności prowadzi do fragmentacji systemu i obniżenia przewidywalności sieci ATM.

► **Human-centric oversight – człowiek w centrum odpowiedzialności**

Kluczowym wnioskiem płynącym z analiz EASA, SESAR i EUROCONTROL jest to, że AI nie zastępuje kontrolera ruchu lotniczego. Odpowiedzialność operacyjna musi pozostać po stronie człowieka. Wynika to z kilku fundamentalnych powodów: algorytmy działają probabilistycznie, nie posiadają pełnej świadomości sytuacyjnej, są ograniczone jakością danych i nie ponoszą odpowiedzialności prawnej.

W odpowiedzi na te ograniczenia rozwijana jest koncepcja Human-Machine Teaming, w której AI dostarcza analiz, predykcji i filtruje dane, natomiast ATCO (Air Traffic Control Officer) interpretuje informacje, ocenia ryzyko i podejmuje decyzję końcową. Nie jest to klasyczna automatyzacja, lecz zgodne z europejską filozofią bezpieczeństwa inteligentne wsparcie człowieka.

Odpowiedzialna transformacja. Co to oznacza w praktyce?

Odpowiedzialna transformacja ATM z udziałem AI jest procesem długofalowym, obejmującym technologię, procedury, kompetencje i kulturę organizacyjną. Europejskie instytucje (EASA, EUROCONTROL, SESAR i EUROCAE) podkreślają, że AI może zwiększyć bezpieczeństwo i efektywność wyłącznie wtedy, gdy jej wdrażanie odbywa się w sposób kontrolowany, przejrzysty i zgodny z zasadą human-centric. W praktyce oznacza to:

1. stosowanie AI tylko tam, gdzie wnosi realną wartość operacyjną,
2. pełną przejrzystość i audytowalność,
3. stały nadzór człowieka,
4. zgodność z ramami regulacyjnymi,
5. interoperacyjność europejską,
6. systematyczne szkolenia użytkowników,
7. wysoką jakość i etyczne wykorzystanie danych,
8. ciągły monitoring modeli,
9. obowiązkowe testy *shadow-mode*.

Odpowiedzialna transformacja wymaga współpracy regulatorów, ANSP, przemysłu, organizacji zawodowych i środowisk akademickich. Tylko takie podejście pozwala wdrażać AI w sposób, który wzmacnia bezpieczeństwo i odporność europejskiego ATM, nie naruszając fundamentów zaufania i odpowiedzialności.

Zapowiedź części drugiej

Druga część artykułu, opublikowana w kolejnym numerze *SAFE SKY*, przejdzie od zasad i regulacji do praktyki. Przedstawione zostaną konkretne technologie AI już stosowane w ATM, europejskie wdrożenia w ramach SESAR oraz polski wkład, w szczególności projekty PANSA. Celem będzie odpowiedź na pytanie, jak AI działa dziś operacyjnie, gdzie przynosi realne korzyści i jakie wyzwania pozostają otwarte.

W tej sekcji skorzystano z następujących publikacji: [8], [18], [21], [30], [32], [36], [38], [44], [45], [47], [48], [49], [50], [54], [61], [62], [63], [66], [79], [82], [84], [85], [89], [109], [111], [115], [127], [129], [130], [139].

Słownik pojęć

AI, Artificial Intelligence / Sztuczna inteligencja

Dziedzina informatyki zajmująca się tworzeniem systemów zdolnych do realizacji zadań wymagających elementów ludzkiej inteligencji, takich jak analiza, predykcja, wnioskowanie czy rozpoznawanie wzorców. W ATM AI pełni funkcję systemów wspomagania decyzji, działających zgodnie z zasadą human-centric i pozostających pod nadzorem człowieka.

Główne obszary AI wykorzystywane w ATM:

1. Uczenie maszynowe (Machine Learning, ML) – algorytmy uczące się na danych historycznych i bieżących, wykorzystywane m.in. do predykcji trajektorii, konfliktów i przepływów ruchu.
2. Przetwarzanie języka naturalnego (Natural Language Processing, NLP) – wykorzystywane pomocniczo (np. analiza raportów, wsparcie interfejsów).
3. Wizja komputerowa (Computer Vision, CV) – analiza obrazu i wideo, m.in. w cyfrowych wieżach lotniskowych.
4. Systemy ekspertowe (Expert Systems) – deterministyczne systemy regułowe, historycznie stosowane w ATM, stanowiące fundament dzisiejszej automatyzacji.
5. Planowanie i harmonogramowanie (Automated Planning and Scheduling) – wyznaczanie sekwencji działań i optymalnych scenariuszy operacyjnych.

AI Literacy

to zestaw kompetencji pozwalających człowiekowi rozumieć, krytycznie oceniać i efektywnie współpracować z systemami sztucznej inteligencji.

AMAN / DMAN (Arrival Manager / Departure Manager)

Systemy wspomagania sekwencjonowania przylotów i odlotów na lotniskach, kluczowe dla optymalizacji przepływów, redukcji opóźnień i emisji.

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast)

Technologia nadzoru oparta na automatycznej transmisji danych o pozycji i parametrach lotu, fundament nowoczesnych systemów CNS/ATM.

ARTIMATION (Transparent AI and Automation To ATM Systems), TAPAS (Towards an Automated and exPlainable ATM System)

Projekty ARTIMATION oraz TAPAS, realizowane w ramach programu SESAR, koncentrują się na kluczowym wyzwaniu wdrażania sztucznej inteligencji w lotnictwie: przejrzystości i wyjaśnialności systemów AI (Explainable AI - XAI).

CNS/ATM (Communications, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management).

Globalna koncepcja, która stanowiła podstawę modernizacji całego systemu żeglugi powietrznej. Połączenie infrastruktury technicznej (CNS) z procedurami zarządzania ruchem (ATM), które dzięki technologiom cyfrowym stają się jednym, inteligentnym organizmem. Ewolucja CNS/ATM dąży do koncepcji Digital European Sky. Dzięki integracji wyników projektów badawczych:

1. Łączność jest inteligentna (SINAPSE). SINAPSE (Software defined networking architecture augmented with Artificial Intelligence). Projekt badawczy realizowany w ramach SESAR, skupia się na modernizacji globalnej sieci łączności lotniczej (ATN), wykorzystywanej do komunikacji między statkami powietrznymi a kontrolą ruchu lotniczego.
2. Operacje są przewidywalne (SafeOPS). SafeOPS (Safe Operations in Air Traffic Management) to projekt badawczy realizowany w ramach europejskiego partnerstwa SESAR Joint Undertaking, który w 2025 roku stanowi fundament dla wdrażania sztucznej inteligencji (AI) w wieżach kontroli lotów.
3. Strategia jest spójna z globalnymi celami bezpieczeństwa OPTICS2 (Observation Platform for Technological and Institutional Consolidation of research in Safety and Security). Projekt UE pełni rolę platformy koordynacyjnej i wspierającej, mającej na celu kompleksową ocenę europejskich badań w obszarze bezpieczeństwa lotniczego.

Destination 2050 / ICAO LTAG (Long-Term Global Aspirational Goal for CO₂)

Strategiczne inicjatywy EU i globalne, wyznaczające cel osiągnięcia neutralności klimatycznej lotnictwa do 2050 r., w których AI pełni rolę narzędzia optymalizacyjnego.

EASA AI Roadmap 2.0

EASA (European Union Aviation Safety Agency), to instytucja UE odpowiedzialna za zapewnienie najwyższych standardów bezpieczeństwa oraz ochrony środowiska w transporcie lotniczym w Europie. Roadmap 2.0, to strategiczny dokument określa poziomy zdolności AI w lotnictwie (Level 0–3B), zasady human-centric AI oraz harmonogram certyfikacji.

ERATO (En-Route Air Traffic Organiser) / iFACTS (interim Future Area Control Tools Support) / MTCD (Medium-Term Conflict Detection)

Operacyjne narzędzia wsparcia kontroli obszaru (en-route), służące do predykcji konfliktów i zarządzania ruchem w średnim horyzoncie czasowym.

EU AI Act

Unijne rozporządzenie ustanawiające ramy prawne dla AI, oparte na podejściu opartym na ryzyku (risk-based approach).

EUROCAE (European Organisation for Civil Aviation Equipment)

Opracowuje harmonizowane standardy techniczne dla lotnictwa.

EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation)

Paneuropejska organizacja międzyrządowa wspierająca bezpieczeństwo, płynność i efektywność żeglugi powietrznej.

EUROCONTROL Experimental Centre (EEC)

Obecnie EUROCONTROL Innovation Hub, to centrum badawcze i symulacyjne zajmujące się rozwojem zarządzania ruchem lotniczym (ATM). Znajduje się ono w Brétigny-sur-Orge pod Paryżem, we Francji.

EUROCONTROL Network Manager (NM) / Network Manager Operations Centre (NMOC)

To operacyjne centrum zarządzania ruchem w skali Europy.

Explainable AI (XAI)

Wyjaśnialna sztuczna inteligencja – podejście zapewniające, że rekomendacje systemu AI są zrozumiałe dla użytkownika operacyjnego.

Human-AI Teaming (HAT)

Model współpracy człowieka z systemem AI, promowany przez EASA (*AI Roadmap 2.0*), w którym AI generuje analizy i rekomendacje, natomiast człowiek zachowuje decyzyjność i odpowiedzialność operacyjną.

Human-Centric Automation

Filozofia projektowania systemów lotniczych, zgodnie z którą automatyzacja ma wzmacniać kompetencje operatora, a nie go zastępować. Człowiek pozostaje w pętli decyzyjnej.

Human-in-the-Loop (HITL) / Human-on-the-Loop (HOTL)

- ▶ HITL – system nie może wykonać działania bez zgody człowieka.
- ▶ HOTL – system działa autonomicznie, człowiek sprawuje nadzór i może przerwać działanie.

Nowcasting

Krótkoterminowe prognozowanie pogody (do ~6 godzin), kluczowe dla predykcji trajektorii i zarządzania przepływem ruchu.

Safety-critical system

System, którego awaria lub błędne działanie może prowadzić do katastrofalnych skutków (utrata życia, statku powietrznego, infrastruktury). ATM jest klasycznym przykładem środowiska safety-critical, co narzuca rygorystyczne wymagania dla AI.

SESAR (Single European Sky ATM Research)

Program badawczo-rozwojowy UE, technologiczny filar inicjatywy Jednolitej Europejskiej Przestrzeni Powietrznej. Obejmuje badania rozpoznawcze (Exploratory Research) oraz wdrożenia operacyjne.

SESAR Exploratory Research

Faza badań koncepcyjnych, testująca nowe idee i technologie wykraczające poza bieżące plany modernizacji ATM (np. projekty ARTIMATION, TAPAS, SafeOPS).

System legacy

Dziedziczone systemy informatyczne i techniczne, nadal operacyjne, lecz oparte na przestarzałych architekturach. Stanowią wyzwanie integracyjne dla wdrażania AI.

Bibliografia:

- [1] <https://ai-law-center.orrick.com/eu-ai-act/high-risk-ai/>
- [2] <https://www.aimethods.com/>
- [3] <https://www.ais.pansa.pl/en/>
- [4] <https://aistandardshub.org/guidance/easa-artificial-intelligence-roadmap-2-0/>
- [5] [https://akademia.pit.lukasiewicz.gov.pl/uchylajac-wieko-czarnej-skrzynki-czym-jest-wyjasnialne-ai/#:~:text=Explainable%20AI%20\(XAI\)%20%E2%80%93%20dziedzina,mechanizm%20dzia%C5%82ania%2C%20efektywno%C5%9B%C4%87%20i%20przewidywalno%C5%9B%C4%87](https://akademia.pit.lukasiewicz.gov.pl/uchylajac-wieko-czarnej-skrzynki-czym-jest-wyjasnialne-ai/#:~:text=Explainable%20AI%20(XAI)%20%E2%80%93%20dziedzina,mechanizm%20dzia%C5%82ania%2C%20efektywno%C5%9B%C4%87%20i%20przewidywalno%C5%9B%C4%87)
- [6] <https://www.alg-global.com/blog/aviation/how-regulate-ai-challenges-and-solutions-aviation-sector>
- [7] <https://www.aoshearman.com/en/insights/ao-shearman-on-tech/zooming-in-on-ai-10-eu-ai-act-what-are-the-obligations-for-high-risk-ai-systems>
- [8] <https://arxiv.org/abs/2505.03117>
- [9] <https://arxiv.org/html/2305.02012v3>
- [10] <https://arxiv.org/html/2511.15620v1>
- [11] https://artificialintelligenceact.com/eu-ai-act/chapter-iii-high-risk-ai-system/section-2-requirements-for-high-risk-ai-systems/?utm_source=chatgpt.com
- [12] <https://artificialintelligenceact.eu/>
- [13] <https://artificialintelligenceact.eu/annex/3/>
- [14] <https://artificialintelligenceact.eu/article/6/>
- [15] <https://artificialintelligenceact.eu/article/9/>
- [16] <https://artificialintelligenceact.eu/article/16/>
- [17] <https://artificialintelligenceact.eu/high-level-summary/>
- [18] <https://www.a6alliance.net/about/pansa/>
- [19] <https://www.a6alliance.net/author/pansa/>
- [20] https://www.bainessimmons.com/media/bxixbmZ/easa_concept_paper_guidance_for_level_1and2_machine_learning_applications_issue_02.pdf
- [21] https://www.caa.ro/uploads/pages/easa_ai_roadmap_2_0_2023.pdf
- [22] <https://canso.org/member/pansa/>
- [23] <https://canso.org/strong-industry-partnerships-dynamic-airspace-and-innovation-unlock-atm-efficiencies-in-europe/>
- [24] <https://cordis.europa.eu/article/id/442209-explainable-ai-for-increased-trust-in-air-traffic-management-software>

- [25] <https://datascience.aero/the-evolution-of-ai-in-aviation-from-ai-infrastructure-to-lmm/>
- [26] <https://dbblue.it/artificial-intelligence-in-future-atm-training-course/>
- [27] <https://www.destination2050.eu/>
- [28] <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai>
- [29] <https://dl.acm.org/doi/full/10.1145/3719384.3719389>
- [30] <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20>
- [31] <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/notices-of-proposed-amendment/npa-2025-07>
- [32] <https://www.easa.europa.eu/en/domains/research-innovation/ai>
- [33] <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/easa-artificial-intelligence-roadmap-20-published>
- [34] <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/news/easas-first-regulatory-proposal-artificial-intelligence-aviation-now-open>
- [35] <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-AI-Roadmap-v1.0.pdf>
- [36] https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/easa_ai_roadmap_2_0_2023.pdf
- [37] https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/easa_concept_paper_first_usable_guidance_for_level_1_machine_learning_applications_-_proposed_issue_01_1.pdf
- [38] https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/2024-07-02_easa_ai_days_presentations_day1.pdf
- [39] <https://www.ecologie.gouv.fr/en/public-policies/erato-electronic-environment#:~:text=ERATO%20is%20a%20server%20that%20provides%20a,filtered%20air%20situation%20that%20contains%20all%20the>
- [40] https://elib.dlr.de/210139/1/HUCAN_SIDs2024_final.pdf
- [41] <https://www.emergobyul.com/news/european-ai-act-requirements-high-risk-ai-systems>
- [42] <https://enac.hal.science/hal-02138131/document>
- [43] https://enac.hal.science/hal-02907597/file/ICRAT_paper.pdf
- [44] https://engagektu.eu/wp-content/uploads/2025/10/Engage-2-D5.1-%E2%80%93-ATM-concepts-roadmap_v.01.00.pdf
- [45] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689
- [46] <https://www.eurocae.net/>
- [47] <https://www.eurocae.net/working-group/wg-114/>
- [48] <https://www.eurocae.net/open-consultation-for-ed-324/>
- [49] <https://www.eurocontrol.int/artificial-intelligence>
- [50] <https://www.eurocontrol.int/article/digitalisation-and-ai-air-traffic-control-balancing-innovation-human-element>
- [51] <https://www.eurocontrol.int/article/why-artificial-intelligence-highly-relevant-air-traffic-control>
- [52] <https://www.eurocontrol.int/event/ai-atm-enablers-and-use-cases>
- [53] <https://www.eurocontrol.int/event/fly-ai-forum-2024>
- [54] <https://www.eurocontrol.int/event/fly-ai-forum-2025>
- [55] <https://www.eurocontrol.int/interview/transforming-eurocontrol-bretigny-experimental-centre-innovation-hub>
- [56] <https://www.eurocontrol.int/publication/fly-ai-report>
- [57] <https://www.eurocontrol.int/service/adverse-weather-management>
- [58] <https://www.eurocontrol.int/service/classroom-and-e-learning-aviation-training-courses>
- [59] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/challenges-of-growth-2018.pdf>
- [60] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/2018-autumn-winter-skyway-issue-69.pdf>
- [61] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/skyway70.pdf>
- [62] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-11/skyway-magazine-autumn-winter-2019.pdf>
- [63] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-03/eurocontrol-fly-ai-report-032020.pdf>
- [64] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/nm-annual-network-operations-report-2019-main-report.pdf>
- [65] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2023-05/20230420-flyai-forum-session1-dfs-machine-learning-arrival-management.pdf>
- [66] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-02/eurocontrol-2023-10-tim-meeting-10-hm-teaming.pdf>
- [67] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-04/20240429-flyai-forum-session-2-guegan.pdf>
- [68] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-06/eurocontrol-ace-benchmarking-report-2025-edition.pdf>
- [69] <https://www.eurocontrol.int/standardisation>
- [70] <https://www.eurocontrol.int/use-cases/trajectory-based-free-routing-lower-airspace-to-befree>
- [71] <https://www.eurocae.net/ed-205a-process-standard-for-security-certification-and-declaration-of-atm-ans-ground-systems/>
- [72] <https://www.eurocae.net/eurocae-and-sae-international-publish-landmark-ai-taxonomy-document-for-the-global-aeronautical-industry/>
- [73] <https://www.eurocae.net/new-working-group-wg-114-artificial-intelligence/>
- [74] <https://www.eurocae.net/open-consultation-for-ed-324/>
- [75] <https://www.eurocae.net/working-group/wg-114/>
- [76] <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2022.896877/full>
- [77] <https://www.geeksforgEEKS.org/artificial-intelligence/explainable-artificial-intelligencexai/>
- [78] <https://globalairspaceradar.com/stories/report-from-the-eurocontrol-flyai-forum-2024/>
- [79] <https://haikuproject.eu/wp-content/uploads/2024/06/D8.1-The-Human-Role-in-Future-Aviation.pdf>
- [80] <https://hdl.handle.net/10779/mit.27552921.v1>
- [81] <https://www.helihub.com/2023/05/11/easa-artificial-intelligence-roadmap-2-0-published/>
- [82] https://www.icao.int/sites/default/files/EURNAT/MeetingDocs/Safety%20workshops/2025%20Safety%20-%20ICAO%20workshop%20on%20use%20of%20artificial%20intelligence%20for%20safety%20data%20processing%20and%20analysis/3-EUROCAE-WG-114-ICAO_AI-Workshop.pdf
- [83] https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/2025/Envreport2025_28.pdf
- [84] <https://ifatca.org/wp-content/uploads/WP-2025-157.pdf>
- [85] <https://ifatca.wiki/kb/working-paper/2022/wp-2022-68/>
- [86] <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

- [87] <https://www.jmir.org/2025/1/e69678>
- [88] <https://learningzone.eurocontrol.int/ATMTraining/Timetable/AI-INTRO.pdf>
- [89] <https://learningzone.eurocontrol.int/ilp/pages/course-description.jsf?courseId=20379660&catalogId=11122787&isTemplate=true>
- [90] <https://learningzone.eurocontrol.int/ilp/pages/course-description.jsf?courseId=22017712&catalogId=11122787&isTemplate=true>
- [91] <https://www.mayerbrown.com/pt/pdf/insights/publications/2024/07/eu-ai-act-published-which-provisions-apply-when>
- [92] <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1295>
- [93] <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/21/11660>
- [94] <https://www.mdpi.com/2226-4310/8/8/224>
- [95] <https://www.nytimes.com/interactive/2024/09/03/technology/zoox-self-driving-cars-remote-control.html>
- [96] [https://oraclelawglobal.com/news/ais-aviation-innovation-meets-regulation/#:~:text=This%20means%20any%20AI%20that%20helps%20manage,on%20an%20aircraft\)%20would%20be%20considered%20high%20risk](https://oraclelawglobal.com/news/ais-aviation-innovation-meets-regulation/#:~:text=This%20means%20any%20AI%20that%20helps%20manage,on%20an%20aircraft)%20would%20be%20considered%20high%20risk)
- [98] <https://www.optics-project.eu/optics2-final-safety-security-integrated-recommendations/>
- [99] https://papers.ein-sas.eu/assets/uploads/files/2db7e-aslj_flying-high-for-ai_pre-print_version.pdf
- [100] <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10916499/>
- [101] https://publications.europa.eu/resource/cellar/b555ad1b-5e57-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1
- [102] https://www.pansa.pl/en/international_affairs/
- [103] <https://www.pinsentmasons.com/out-law/guides/guide-to-high-risk-ai-systems-under-the-eu-ai-act>
- [104] https://www.researchgate.net/publication/11596569_A_model_for_types_and_levels_of_human_interaction_with_automation_IEEE_Trans_Syst_Man_Cybern_Part_A_Syst_Hum_303_286-297
- [105] https://www.researchgate.net/publication/396604780_EXPLAINABLE_AI_IN_FLEET_PREDICTIVE_MAINTENANCE_USING_SHAP_AND_LIME_FOR_TRANSPARENCY_AND_REGULATORY_ALIGNMENT
- [106] <https://www.sae.org/articles/press-releases/2024/12/sae-international-eurocae-publish-landmark-ai-taxonomy-document-global-aeronautical-industry>
- [107] https://sesar.eu/sites/default/files/documents/sid/2022/paper_52.pdf
- [108] <https://www.sesardeploymentmanager.eu/partners/pansa>
- [109] <https://www.sesarju.eu/masterplan>
- [110] <https://www.sesarju.eu/members/pansa>
- [111] <https://www.sesarju.eu/news/air-traffic-control-human-machine-partnership>
- [112] <https://www.sesarju.eu/news/explainable-ai-key-unlocking-potential-automation-air-traffic-management>
- [113] <https://www.sesarju.eu/news/explainable-artificial-intelligence-why-it-matters-air-traffic-management>
- [114] <https://www.sesarju.eu/news/human-loop-simulation-validates-ai-solution-managing-air-traffic-hotspots>
- [115] <https://www.sesarju.eu/news/smells-team-spirit-human-machine-collaboration-air-traffic-management>
- [116] <https://www.sesarju.eu/node/4820>
- [117] <https://www.sesarju.eu/projects/artimation>
- [118] <https://www.sesarju.eu/projects/dart>
- [119] <https://www.sesarju.eu/projects/DTT>
- [120] <https://www.sesarju.eu/projects/fmpmet i>
- [121] <https://www.sesarju.eu/projects/isobar>
- [122] <https://www.sesarju.eu/projects/SAFEOPS>
- [123] <https://www.sesarju.eu/projects/sinapse>
- [124] <https://www.sesarju.eu/projects/sinoptica i>
- [125] <https://www.sesarju.eu/projects/tapas>
- [126] <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/automation%20atm%20vision%20roadmap.pdf#:~:text=Higher%20levels%20of%20automation%20supporting%20air%20traffic,the%20NextGen%E2%80%93SESAR%20State%20of%20Harmonisation%20Document%20%5B9%5D>
- [127] <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/Sesar%20%20white%20paper%20AI%20in%20ATM.pdf>
- [128] https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2023/Papers/SIDs_2023_paper_53%20final.pdf#:~:text=These%20models%2C%20when%20combined%20with%20a%20machine,learning%20models%20to%20improve%20the%20ETA%20predictions
- [129] <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/SESAR%20Master%20Plan%202025.pdf>
- [130] https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2025/papers/SIDs_2025_paper_126-final.pdf
- [131] <https://skybrary.aero/articles/medium-term-conflict-detection-mtcd>
- [132] <https://skybrary.aero/articles/situational-awareness>
- [133] <https://skybrary.aero/operational-issues/weather>
- [134] <https://skybrary.aero/search/google?keys=erato>
- [135] <https://skybrary.aero/search/google?keys=iFACTS+>
- [136] <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2929.pdf>
- [137] <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/33508.pdf>
- [138] <https://smythos.com/managers/ops/explainable-ai-in-autonomous-vehicles/>
- [139] <https://teachingcommons.stanford.edu/teaching-guides/artificial-intelligence-teaching-guide/understanding-ai-literacy>
- [140] <https://www.thinkitive.com/blog/empowering-physicians-with-ai-clinical-decision-support/>
- [141] <https://www.urbanairmobilitynews.com/emerging-regulations/eurocae-sae-finalize-draft-standards-for-ai-based-aeronautical-products-development-and-certification/>
- [142] <https://www.wilmerhale.com/en/insights/blogs/wilmerhale-privacy-and-cybersecurity-law/20240717-what-are-highrisk-ai-systems-within-the-meaning-of-the-eus-ai-act-and-what-requirements-apply-to-them>
- [143] Fennedy, K., Hilburn, B., Nadirsha, T. N. M., Alam, S., Le, K.-D., & Li, H. (2025). Do ATCOs Need Explanations, and Why? Towards ATCO-Centered Explainable AI for Conflict Resolution Advisories (arXiv:2505.03117). arXiv: <https://arxiv.org/abs/2505.03117>

- [144] Parasuraman R., Sheridan T. B., Wickens C. D., A model for types and levels of human interaction with automation, „IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans” 2000, t. 30, nr 3, s. 286–297.
- [145] Sheridan, T. B., & Verplank, W. (1978). Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. Cambridge, MA: Man-Machine Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, MIT



Piotr Andrzej Dmochowski

Operator FMP

Słot Koordynator dla Portu Lotniczego Kraków Balice

Inżynier z wieloletnim doświadczeniem w PAŻP. Zainteresowania badawcze: przepustowość przestrzeni powietrznej, płynność ruchu lotniczego i zarządzanie przepływem ruchu lotniczego.

Nawigacja lotnicza w warunkach zakłócania sygnałów GNSS



Paweł Szpakowski



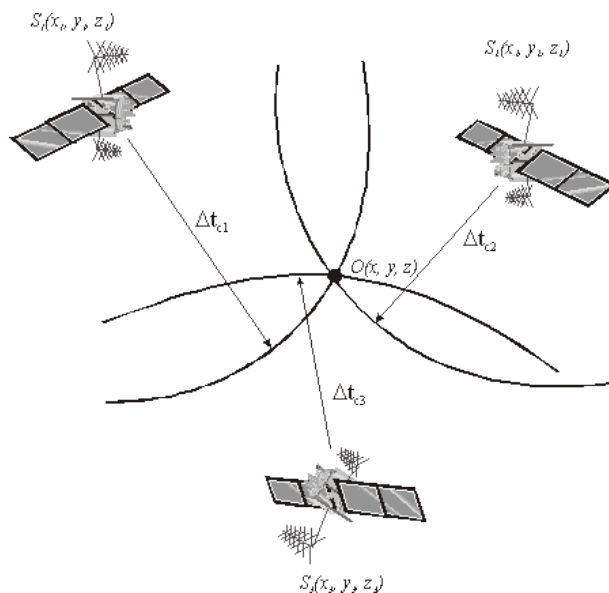
Ryc. 1. System nawigacji satelitarnej GNSS, źródło: AIOS

Współczesne lotnictwo nieustannie dąży do zwiększenia bezpieczeństwa, efektywności i precyzji operacji w przestrzeni powietrznej. Jednym z elementów wspierających te cele jest GNSS, czyli globalny system nawigacji satelitarnej (Global Navigation Satellite System). Dzięki niemu samoloty mogą określać swoje położenie z wysoką dokładnością, niezależnie od warunków atmosferycznych, pory dnia, czy bliskości lotnisk. GNSS zrewolucjonizował sposób planowania i realizacji lotów, umożliwiając wyznaczanie bardziej elastycznych tras, dokładnych podejść do lądowania oraz efektywniejsze zarządzanie ruchem lotniczym.

Jego nowatorstwo w stosunku do tradycyjnych systemów nawigacyjnych polega na radykalnej zmianie sposobu określania pozycji statku powietrznego – z opartego na punktowych, naziemnych urządzeniach do w pełni globalnego, satelitarnego systemu nawigacyjnego, działającego w sposób ciągły

i autonomiczny. Kilka różnych, jednocześnie pracujących systemów satelitarnych, takich jak amerykański GPS, rosyjski GLONASS, europejski Galileo czy chiński BeiDou, od lat stanowią podstawę światowej nawigacji lotniczej, wspierając precyzyjne prowadzenie statków powietrznych w ramach koncepcji Performance-Based Navigation (PBN), opartej na Dokumencie 9613 Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO. Powszechność i zaufanie, jakimi są obdarzane, opierają się na precyzji, dostępności i niezawodności sygnałów satelitarnych. Jednak od dłuższego czasu obserwuje się występujące coraz częstsze i coraz rozleglejsze przypadki zakłóceń GNSS, które mają realny wpływ na bezpieczeństwo i ciągłość realizowania usług nawigacyjnych. W niniejszym artykule omówione zostaną przyczyny i rodzaje zakłóceń sygnałów satelitarnych, a także skutki, jakie wywołują dla funkcjonowania lotnictwa cywilnego. Przedstawione zostaną możliwe metody wykrywania i przeciwdziałania tego rodzaju zagrożeniom oraz działania podejmowane przez krajowe i międzynarodowe organizacje lotnicze w odpowiedzi na ryzyko utraty niezakłóconego korzystania z satelitów.

Na wstępie warto przypomnieć, że system GNSS to sieć satelitów krążących wokół Ziemi, które wysyłają sygnały radiowe do odbiorników satelitarnych zlokalizowanych między innymi w statkach powietrznych, dla których wymagane jest dokładne określenie pozycji lub synchronizacja użytkowanych zegarów. Wyznaczanie pozycji polega na obliczaniu odległości od kilku satelitów, których aktualne, pozycje orbitalne są dokładnie znane. Odbywa się to poprzez pomiar czasu, jaki fala radiowa potrzebuje, aby przebyć drogę od satelity do miejsca pomiaru. Na tej podstawie można obliczyć współrzędne, w których odbiornik satelitarny aktualnie się znajduje. Do wyznaczenia pozycji w przestrzeni trójwymiarowej 3D potrzebne są sygnały z co najmniej czterech satelitów – trzy z nich pozwalają określić współrzędne (x, y, z) , czwarty umożliwia skorygowanie błędu zegara odbiornika. Im więcej satelitów jest dostępnych w danej lokalizacji, tym jakość pozycjonowania dokładniejsza. Dlatego standardowo korzysta się z jak największej liczby aktualnie widocznych satelitów. Jednocześnie, dodatkowo można także odbierać i analizować sygnały z satelitów innych dostępnych systemów nawigacyjnych GNSS (multi-constellation).



Ryc. 2. Wyznaczanie pozycji za pomocą systemów satelitarnych, źródło: ze zbiorów autora

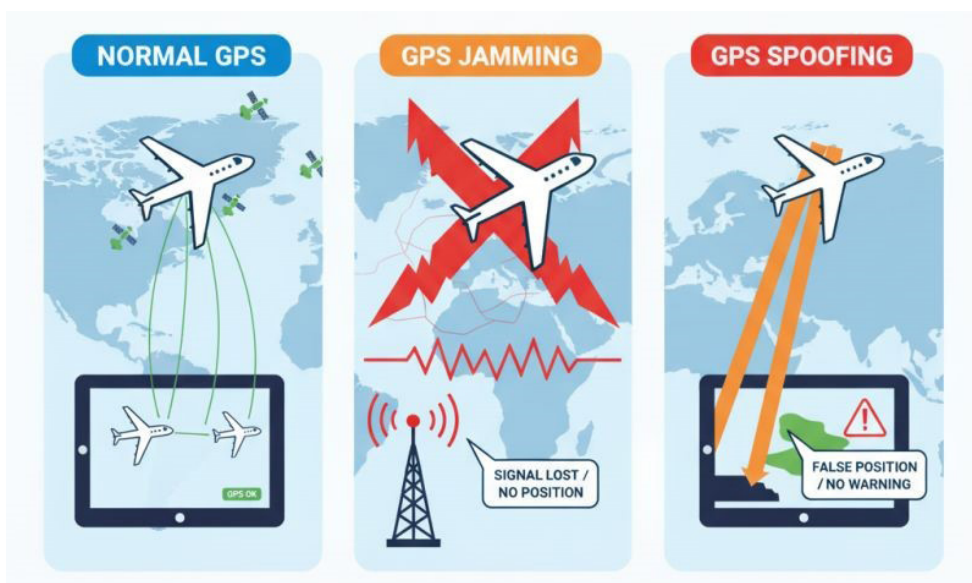
Łatwość użycia nawigacji satelitarnej zachęca do jej powszechnego wykorzystywania. Nie zawsze jednak systemy działają poprawnie. Sygnały satelitarne mogą być przypadkowo lub celowo zakłócone, przez co wyznaczanie pozycji staje się utrudnione lub niemożliwe. W ostatnich kilku latach obserwuje się znaczny wzrost liczby incydentów dotyczących zakłóceń GNSS, rozciągających się między innymi na obszarze wieluset kilometrów kwadratowych europejskiej przestrzeni powietrznej, w tym nad północną i centralną Polską, Litwą, Łotwą, Estonią aż po Finlandię, a także nad obszarem Morza Bałtyckiego i na Ukrainie. W zależności od rejonu zjawisko występuje od powierzchni ziemi nawet do poziomu lotu FL450. Zakłócenia przypisuje się m. in. rosyjskim systemom radiowym z obszaru Królewca, wykorzystywanym do ochrony infrastruktury militarnej przed dronami i potencjalnymi atakami wojska. Zakłócenia nasilają się podczas trwania ćwiczeń wojskowych lądowych i morskich, zarówno po stronie NATO jak i wspólnych Rosji i Białorusi. Potwierdzają to stale prowadzone obserwacje satelitarnych sygnałów nawigacyjnych prowadzone w licznie rozmieszczanych stacjach monitorujących oraz raporty Agencji Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego EASA, Europejskiej Organizacji ds. Bezpieczeństwa Żeglugi Powietrznej EUROCONTROL i ICAO, tworzone w oparciu o zgłoszenia od załóg lotniczych i innych użytkowników przestrzeni powietrznej. Problem zakłóceń GNSS wpływa między innymi na zdolność prowadzenia precyzyjnych podejść do lądowania opartych na satelitarnych systemach wspomagających SBAS, nawigacji RNP, prawidłowym działaniu systemów monitorowania ruchu lotniczego ADS-B.

Zakłócenia w nawigacji lotniczej prowadzą do poważnych konsekwencji operacyjnych i obniżenia bezpieczeństwa lotów. W sytuacji braku lub błędnego sygnału GNSS piloci mogą tracić precyzyjne informacje o swojej pozycji, co szczególnie jest niebezpieczne podczas krytycznych faz lotu, takich jak start czy podejście do lądowania w warunkach ograniczonej widoczności. Kontrolerzy ruchu lotniczego mają ograniczoną możliwość korzystania z technologii satelitarnych wspierających nadzór nad poruszającymi się maszynami. Wszystko to wpływa na zmniejszenie płynności przepływu ruchu lotniczego oraz zwiększa ryzyko wystąpienia niebezpiecznych zbliżeń pomiędzy statkami powietrznymi. Pojawiają się zatem potrzeby ciągłego monitorowania i przeciwdziałania tego rodzaju zagrożeniom. Stanowią one jedno z kluczowych wyzwań stojących przed współczesnym zarządzaniem ruchem lotniczym.

Przyczyny zakłóceń GNSS są zróżnicowane. Mogą być nieintencjonalne, spowodowane między innymi przez interferencje radiowe, awarie sprzętu, warunki atmosferyczne lub celowe, generowane przez specjalistyczne urządzenia zakłócające. Dynamiczne zmiany geopolityczne, wzrost liczby konfliktów zbrojnych w różnych częściach świata, skutkują celowym stosowaniem zakłóceń jako jednej z form walki, czy oddziaływania na otoczenie celem osiągnięcia różnego rodzaju korzyści przez podmioty państwowe i prywatne. Zjawisko zakłócania GNSS polega na celowym zagłuszaniu (jamming) lub fałszowaniu (spoofing) sygnałów satelitarnych. Obie techniki mają na celu uniemożliwienie poprawnego określania pozycji, prędkości lub czasu przez odbiorniki satelitarne zlokalizowane w danej części przestrzeni powietrznej, poprzez uniemożliwienie im swobodnego, niezakłóconego użytkowania sygnałów satelitarnych. Jamming polega na emisji silniejszego sygnału radiowego na tej samej częstotliwości, na której działają systemy GNSS, co prowadzi do ich tłumienia, zagłuszania. Odbiornik nie może odebrać sygnałów satelitarnych, w efekcie czego nie można wyznaczyć aktualnej pozycji. Zjawisko może mieć charakter ciągły lub przerywany, powodując brak możliwości zapewnienia ciągłego nawigowania. Spoofing to nadawanie celowo zmodyfikowanego, fałszywego sygnału GNSS, który odbiornik satelitarny uznaje za prawdziwy. W efekcie urządzenia pokładowe może wyznaczać błędną pozycję, prędkość. Dane dotyczące lokalizacji niekiedy mogą różnić się od rzeczywistych nawet o setki kilometrów.

Zakłócenia GNSS na pokładzie lecącego samolotu mogą powodować różne objawy. W przypadku jammingu na wyświetlaczach nawigacyjnych pojawia się informacja o braku sygnału satelitów lub niskiej jakości sygnału. Wskazania pozycji stają się błędne lub niestabilne, zmieniają się w sposób przypadkowy. Pokładowe systemy zarządzania lotem FMS, wspomagające pracę pilotów i odbiorniki satelitarne mogą wyświetlać ostrzeżenia o utracie danych lub błędach w nawigacji, tzw. alarmy systemowe, typu GPS

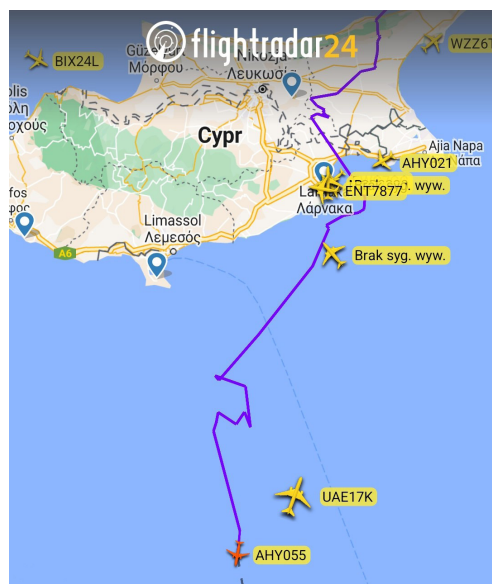
PRIMARY LOST lub NAV ACCURACY DOWNGRADE. Wykrycie spoofingu może stanowić trudność. Wskaźniki nawigacyjne pozornie pracują poprawnie, ale wyliczają i podają w sposób ciągły lub skokowy błędną pozycję. Wielkość błędu i jego występowanie w danej chwili są niewiadome. W oparciu o fałszywe dane pokładowe systemy nawigacyjne mogą dokonywać bieżących, zupełnie niepotrzebnych zmian trajektorii lotu. Wielkość wykonywanych manewrów może być różna, od zupełnie nieznacznych, wręcz niezauważalnych, gdzie dryf kursu samolotu będzie rzędu pojedynczych stopni aż do zwrotów wywołujących widoczne, odczuwalne zmiany kierunku lotu. W konsekwencji piloci mogą tracić orientację przestrzenną, zaś statek powietrzny w sposób przypadkowy, może wchodzić w kolizję z innymi maszynami lub z przeszkodami znajdującymi się w otoczeniu, naruszać zastrzeżone rejony przestrzeni powietrznej, mieć trudności w precyzyjnym podejściu do lądowania.



Ryc. 3. Zakłócenia jamming i spoofing systemu GNSS, źródło: ze zbiorów autora

Nieprawidłowości w odbiorze sygnałów GNSS mogą również wpływać na działanie systemu ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast). Rozwiązanie to umożliwia prezentację w czasie rzeczywistym sytuacji ruchowej statków powietrznych, w którym samoloty automatycznie i bez konieczności wywołania transmitują swoją pozycję oraz inne dane lotu, obliczone na podstawie sygnałów satelitarnych, do statków powietrznych znajdujących się w otoczeniu i do stacji naziemnych znajdujących się w ośrodkach ATC. Pomimo, że zakłócenia powodują błędne określanie lokalizacji, ADS-B nadal transmituje nieprawidłowe dane. Kontrolerzy ruchu lotniczego widzą samoloty w niewłaściwym miejscu na ekranach radarów, mogą pojawiać się „teleportacje” obiektów na mapie, a systemy ATC generują alerty o niespójności danych (w FIR EPWW dane ADS-B nie są wykorzystywane operacyjnie – przyp. red.). Doprowadzi to do trudności z utrzymaniem separacji między statkami powietrznymi i zapewnieniem prawidłowej sekwencji ich ruchu. Co więcej, załogi lotnicze objęte zakłóceniami widzą inne statki powietrzne w błędnych pozycjach, a niepoprawnie wyznaczana wysokość lotu może wywoływać potencjalne konflikty w systemach antykolizyjnych TCAS. Warto zwrócić uwagę, że zakłócenia GNSS dotyczą także innych elementów awioniki montowanych we współczesnych samolotach. Wytwórcy wyposażenia pokładowego sygnalizują komplikacje związane z działaniem GPWS (Ground Proximity Warning System) systemów ostrzegających o zbliżaniu się statku powietrznego do powierzchni ziemi, elektronicznych map lotniczych. Niepoprawne wyznaczanie

czasu towarzyszące zakłóceniom wpływa na CPDLC (Controller–Pilot Data Link Communications) rozwiązania komunikacji między pilotami a kontrolerami, wykorzystujące cyfrowy kanał danych, w tym depe-sze ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System). Błędy pojawiają się w systemach rozliczania stanu paliwa w zbiornikach, poprzez porównanie zużycia z planem lotu i w FDR (Flight Data Recorder) rejestratorach parametrów lotu. Producenci samolotów i systemów pokładowych o wszystkich zidentyfikowanych nieprawidłowościach w działaniu swoich produktów informują operatorów lotniczych i przewoźników, publikując biuletyny informacyjne. Część z nich stanowi podstawę do przeprowadzenia aktualizacji wybranych procedur operacyjnych, wdrażania niezbędnych modyfikacji konstrukcyjnych czy

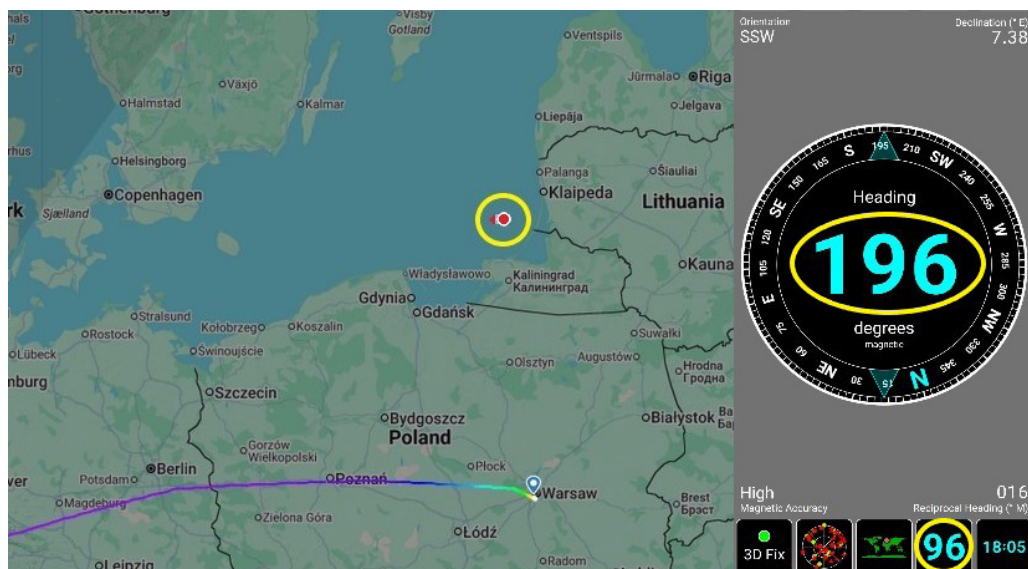


Ryc. 4. Wpływ zakłóceń GNSS na określanie trajektorii lotu, źródło: Flightradar24

przeprowadzenia dodatkowych szkoleń personelu.

Wpływ zjawisk jamming i spoofing na możliwość poprawnego wyznaczania pozycji można prześledzić na przykładzie przelotu samolotu w rejsie rozpoczynającym się w jednym z miast Europy Zachodniej, gdzie nie stwierdza się występowania zakłóceń GNSS do Warszawy, w rejonie której występowanie zjawiska jest częste, okresowo ciągłe i obejmuje szeroki obszar po zachodniej i północnej stronie miasta. Do momentu przekroczenia granicy między Niemcami i Polską nie stwierdza się występowania interferencji. Dalej sytuacja zaczyna stopniowo zmieniać się. Pojawiają się pojedyncze miejsca gdzie pokładowy odbiornik GNSS okresowo, na kilka sekund traci sygnał satelitarny, wyznaczanie pozycji nie przebiega w sposób ciągły, a wyliczana prędkość lotu przyjmuje nierealnie małe wartości. W odległości poniżej 100 km od celu podróży zakłócenia są już tak duże, że pozycja samolotu wyznaczana w oparciu o GNSS jest w sposób ciągły oddalona od rzeczywistej o około 350–400 km i znajduje się nad Morzem Bałtyckim, w rejonie obwodu królewieckiego i Litwy. Poza ewidentnym błędem lokalizacji niepoprawnie wyznaczany jest także kierunek lotu maszyny. Zakłócenia utrzymują się do momentu gdy samolot rozpoczyna zniżanie przed lądowaniem na lotnisku docelowym. Po osiągnięciu wysokości, około 4500 tysięcy stóp i wyjściu spoza zasięgu działania stacji zakłócających, sytuacja powraca do stanu początkowego, bezproblemowej pracy GNSS i poprawnej nawigacji.

W obliczu coraz częściej pojawiających się zakłóceń sygnałów GNSS i na coraz większych obszarach konieczne jest wdrażanie rozwiązań, które ograniczą ich wpływ na bezpieczeństwo lotów. Skuteczne przeciwdziałanie wymaga podejścia wielowarstwowego, łączącego wprowadzanie nowych technologii, procedur operacyjnych i szkolenie personelu. Wśród nich jest między innymi wdrażanie, modernizacja i utrzymywanie w działaniu alternatywnych systemów nawigacyjnych niezależnych od GNSS, monitorowa-



Ryc. 5. Fałszowanie pozycji, kierunku lotu i prędkości w wyniku działania zakłóceń GNSS, źródło: ze zbiorów autora

nie jakości sygnałów satelitarnych oraz rozbudowa systemów dozoru, przygotowanie pilotów i kontrolerów ruchu lotniczego do działania w warunkach zakłóceń.

Z uwagi na masowo rosnącą liczbę incydentów zakłócania sygnałów GNSS międzynarodowe organizacje ICAO i EASA rekomendują utrzymanie i rozwój naziemnych pomocy radionawigacyjnych NAVAID jako systemów zapasowych (back-up), zdolnych zapewnić ciągłość usługi (continuity of service) i podnoszących bezpieczeństwo operacji lotniczych, szczególnie podczas podejść do lądowania i operacji w przestrzeni kontrolowanej. Naziemne pomoce nawigacyjne pomimo ograniczeń operacyjnych w zakresie precyzji pozycjonowania i zasięgu użytkowania w porównaniu do GNSS, charakteryzują się odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne, co wynika z ich pracy w innych zakresach częstotliwości niż systemy satelitarne. Tego rodzaju urządzeniami są radiolatarnie DVOR (Doppler Very High Frequency Omnidirectional Range) i radiodalmierze DME (Distance Measuring Equipment), służące odpowiednio do określania kierunku i obliczania odległości do stacji naziemnej, a także systemy ILS (Instrument Landing System) wspomagające lądowanie, poprzez wyznaczanie elektronicznie w powietrzu osi drogi startowej (LOC) i ścieżki podejścia (GP). W Polsce za organizację i utrzymanie infrastruktury radionawigacyjnej odpowiada Polska Agencja Żeglugi Powietrznej. Lokalizacja NAVAID opiera się na ich strategicznym rozmieszczeniu, które zapewnia stałe, pełne pokrycie sygnałem nawigacyjnym całej przestrzeni powietrznej. Uwzględnia się przy tym, aby samoloty mogły przejść od korzystania z jednego urządzenia na drugie bez utraty pozycji. Stacje, aby mogły pracować w warunkach minimalnych odbić i zakłóceń emitowanych sygnałów, umieszcza się na rozległych terenach płaskich lub wzniesieniach, z dala od dużych przeszkód naturalnych, konstrukcji metalowych, linii energetycznych, masztów GSM. W Polsce dla nawigacji trasowej bazującej na infrastrukturze

naziemnej z wykorzystaniem sensorów DME/DME i DVOR/DME zapewniana jest dokładność nawigacji RNAV 5. Oznacza to, że system nawigacyjny statku powietrznego musi utrzymywać się w odległości ± 5 mil morskich od zaplanowanej osi trasy przez co najmniej 95% czasu lotu. Dla wszystkich lotnisk kontrolowa-



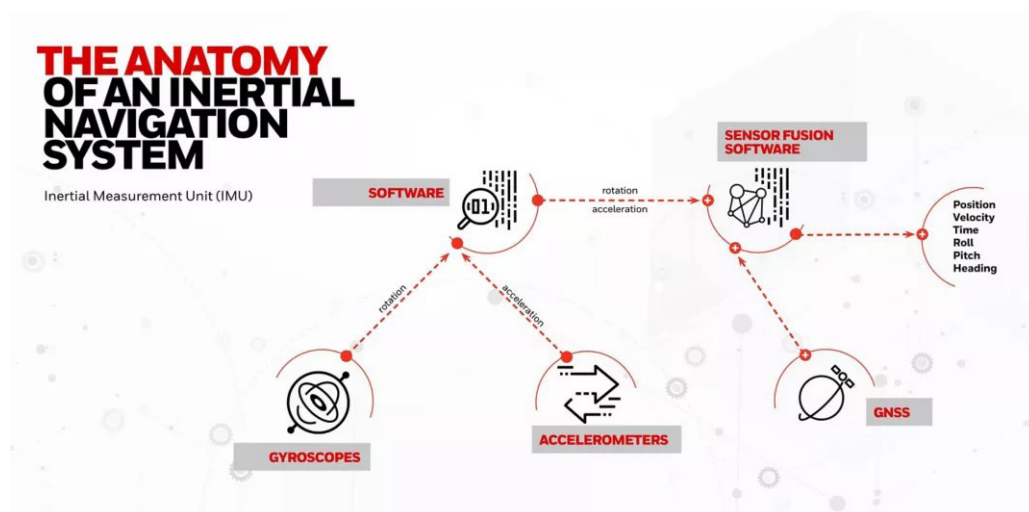
Ryc. 6. Nziemna radiolatarnia DVOR/DME, źródło: ze zbiorów autora

nych, w celu umożliwienia wykonywania operacji precyzyjnego i nieprecyzyjnego podejścia do lądowania, zapewniono infrastrukturę naziemną w postaci systemów ILS/DME oraz radiolatarni DVOR/DME.

Innym skutecznym narzędziem do utrzymania zdolności nawigacyjnych statków powietrznych, bez polegania na zewnętrznych sygnałach takich jak GNSS, jest system inercyjny INS (Inertial Navigation System). Działa on autonomicznie, co czyni go niezależnym i odpornym na zakłócenia radiowe. INS pozwala określać pozycję, prędkość i kierunek ruchu obiektu latającego na podstawie wewnętrznych czujników, którymi są akcelerometry, mierzące przyspieszenia wzdłuż trzech osi (x,y,z) i żyroskopy, określające zmiany orientacji. Dodatkowo stosuje się także magnetometry, barometry i czujniki prędkości kątowej. Dzięki tym danym system inercyjny pozwala obliczyć aktualną pozycję na podstawie wcześniejszego położenia. W sytuacji zakłóceń spoofing system INS służy jako źródło referencyjne, które pozwala wykryć niespójność sygnałów satelitarnych polegającą na nielogicznej, nagłej zmianie pozycji podawanej przez GNSS (spoof detection). Przykładowo, kiedy pojawia się informacja, że samolot przemieścił się o 50 km w ciągu sekundy, system inercyjny tego nie potwierdza i wywołuje alarm. Jeśli porównane dane GNSS i INS są niespójne, system przechodzi w tryb korzystania tylko z danych inercyjnych (INS-only). Ograniczeniem funkcjonalnym systemu bezwładnościowego jest uleganie z czasem dryftowi, polegającemu na pogorszeniu dokładności danych jeśli INS długo nie jest kalibrowany.

Integracja różnych systemów nawigacyjnych i możliwość równoczesnego korzystania z nich stały się podstawą do stworzenia bardziej zaawansowanych technologicznie rozwiązań w zakresie wyznaczania pozycji statków powietrznych, zwanych układami hybrydowymi. Wykorzystując łącznie zalety kilku różnych systemów uzyskuje się znacznie lepszą wydajność, elastyczność i niezawodność działania układu. Różnorodne czujniki, technologie i źródła danych pozycyjnych wzajemnie się uzupełniają zapewniając zwiększoną dokładność i odporność na interferencje. W praktyce oznacza to równoległe korzystanie z nawigacji

satelitarnej, naziemnych pomocy radionawigacyjnych i innych systemów, w tym nawigacji bezwładnościowej. Powstała w ten sposób redundancja zapewnia w przypadku niedostępności lub błędów jednego



Ryc. 7. Zasada działania systemu INS, źródło: Honeywell

systemu, możliwość przejęcia jego funkcji przez pozostałe. Dzięki temu zapewnia się stałe utrzymywanie bezpieczeństwa lotu na podobnym, wysokim poziomie.

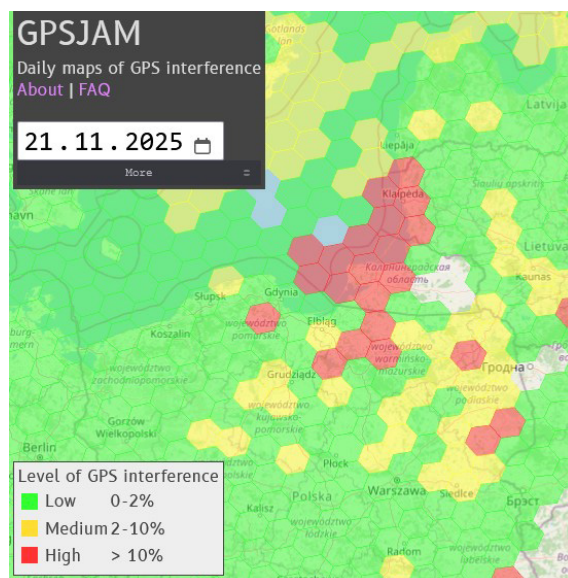
Równolegle z metodyką nawigacji przy wykorzystaniu hybryd prowadzone są modyfikacje dotychczasowego wyposażenia samolotów, mające zwiększyć odporność zakłócenia. Wprowadzane są do użytku specjalne wieloelementowe anteny CRPA (Controlled Radiation Pattern Antenna), które przy pomocy układu procesorowego ze specjalistycznym oprogramowaniem aktywnie analizują kierunki, z których docierają zakłócenia i skutecznie je tłumią. W kwestii uniemożliwienia korzystania z błędnych lub niespójnych sygnałów do wyznaczania pozycji w odbiornikach satelitarnych stosuje się technikę RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) – służy ona kontrolowaniu integralności danych GNSS. W sposób ciągły, krzyżowy wykonywane są obliczenia odległości od pięciu lub więcej satelitów i porównywane z wartościami prognozowanymi. Dzięki temu możliwe jest wykrycie i wyizolowanie z dalszego użycia sygnałów wadliwych, w tym zakłócanych. Powstałe anomalie generują ostrzeżenie (Integrity Alert) dla użytkownika o utracie wymaganej dokładności i zagrożeniu poprawności prowadzenia nawigacji.

Aby zapewnić, że zakłócenia GNSS nie wpłyną na możliwość bezpiecznego wykonywania lotów w danym obszarze niezbędna jest reakcja na zjawisko zarówno załóg statków powietrznych jak i kontrolerów ruchu lotniczego. Piloci stosują wtedy specjalnie przygotowane na takie sytuacje listy czynności niezbędnych do wykonania (checklisty). Ujednolicone kroki zapewniają spójność działań, minimalizują ryzyko pominięcia istotnych do wykonania czynności. Załoga potwierdza wiarygodność uzyskiwanych danych nawigacyjnych, określa czy problem pozycjonowania dotyczy tylko jednego odbiornika nawigacyjnego, czy wszystkich elementów systemu. Jeśli mówimy o drugim scenariuszu, piloci przełączają prowadzenie nawigacji na alternatywne źródła. Analizie poddawane są alerty systemowe, zachowanie systemu zarządzania lotem (FMS) i autopilota. Oceniana jest poprawność wyznaczania aktualnej pozycji, prędkości lotu, zgodność przewidywanych odległości między kolejnymi punktami trasy i czasy dolotu do nich. Pojawiające się nielogiczne zmiany, jak na przykład rosnący dystans pomimo zbliżania się, czy skokowa, nagła zmiana czasu, świadczą o wpływie interferencji na pracę systemów pokładowych. Załoga obserwuje także stabilność

prowadzenia samolotu przez autopilota. Pojawienie się nieuzasadnionych odchyśleń od trasy lotu, zbyt częste i gwałtowne korekty, utrata możliwości działania w trybach zarządczych, czyli zmian kursu, wysokości i prędkości w oparciu o zaprogramowany planu lotu, powodują konieczność przejścia na manualny tryb prowadzenia statku powietrznego. O zaistniałej sytuacji i podjętych działaniach załoga bezzwłocznie informuje kontrolerów ruchu lotniczego sprawujących nadzór nad danym lotem. Personel kontroli ruchu lotniczego (ATC) potwierdza odebranie zgłoszenia i sprawdza, czy inni piloci w sektorze zgłaszają podobne problemy. W sytuacji gdy zjawisko dotyczy dużej liczby maszyn, obejmuje rozległą część przestrzeni powietrznej, w znacznym stopniu utrudnia wykonywanie zaplanowanych przelotów, kontrolerzy mogą podjąć działania mające na celu częściową zmianę tras lotów, zmniejszyć pojemność przestrzeni powietrznej, aby unikać obszarów problematycznych i ograniczyć ruch w danym kontrolowanym sektorze. Wszelkie modyfikacje w tym zakresie uzgadniane są z kontrolerami odpowiedzialnymi za sąsiednie obszary, tak aby utrzymać uporządkowany przepływ ruchu, jego płynność i zachować wymagane separacje między wszystkimi maszynami. Aby zminimalizować ryzyko kolizji w wyniku utrudnionej nawigacji, możliwe działania kontrolerów na lotniskach mogą polegać także na celowym opóźnianiu startów i lądowań lub wstrzymywaniu realizacji wybranych operacji lotniczych. Po zakończeniu lotów piloci sporządzają raporty, które umożliwiają analizę nieprawidłowości w odbiorze sygnałów nawigacyjnych i ich wpływu na nawigację. Kontrolerzy również raportują zakłócenia, co pomaga identyfikować obszary występowania zjawisk interferencji, poprawności przyjętych działań w zakresie bezpiecznego prowadzenia statków powietrznych.

Standardowo śledzenie ruchu statków powietrznych odbywa się przez równoległe korzystanie z różnych źródeł danych jakimi są radary pierwotne, wtórne, multilateracja i ADS-B. Jeśli pojawiają się niespójności w tym aspekcie, takie jak brak aktualizacji pozycji, błędne informacje, kontrolerzy mogą szybko zidentyfikować to jako pojawienie się zakłóceń i rozpocząć wykorzystywanie jedynie dozoru radarowego. Dzięki temu w żadnym momencie nie dochodzi do sytuacji niebezpiecznego, przypadkowego zbliżenia się maszyn w powietrzu do siebie. Część ośrodków ATC posiada własne systemy monitorowania sygnałów satelitarnych, które na bieżąco wykorzystywane są do oceny występowania zakłóceń GNSS na danym terenie i możliwości prowadzenia nawigacji. Polska Agencja Żeglugi Powietrznej monitoruje na lotniskach sygnały satelitarne i raportuje zdarzenia związane z ich zakłóceniami w polskiej przestrzeni powietrznej. Tam, gdzie dochodzi do interferencji GNSS załogi lotnicze i inni zainteresowani informowani są o potencjalnych utrudnieniach związanych ze zjawiskiem za pomocą automatycznie nadawanych, aktualnych komunikatów głosowych systemu ATIS (Automatic Terminal Information Service). Agencja odbiera od załóg statków powietrznych zgłoszenia o utracie lub zakłóceniach sygnałów satelitarnych w dowolnej fazie lotów, ich wpływie na bezpieczeństwo realizowanych operacji lotniczych i przekazuje te dane instytucjom międzynarodowym, takim jak Eurocontrol i EASA, w celu identyfikacji i analizy incydentów. Jednocześnie PAŻP współpracuje z krajowym Urzędem Komunikacji Elektronicznej w kwestii poszukiwania źródeł zakłóceń i ich przeciwdziałaniu. Monitorowanie zakłóceń sygnałów GNSS w dowolnym rejonie świata, możliwe jest online przy wykorzystaniu ogólnodostępnej platformy GPSJAM. W oparciu o dane zbierane globalnie z odbiorników ADS-B, określa się jakość odbieranego sygnału nawigacyjnego. Na tej podstawie tworzona jest i aktualizowana tzw. mapa ciepła, pokazujące miejsca, gdzie występują utrudnienia w korzystaniu z sygnałów satelitarnych i jaka jest intensywność zakłóceń. System pomaga analizować skalę i częstotliwość zakłóceń. Użytkownicy mogą przeglądać dane historyczne i porównywać trendy w zakłóceniach. W ostatnich miesiącach GPSJAM wskazuje na rekordowo dużą liczbę anomalii w północnej i centralnej Polsce, na Litwie oraz nad południową częścią Bałtyku.

Nową propozycją w zakresie sposobów monitorowania GNSS tylko dla obszaru Polski jest system RTGMS (Real-time GNSS Monitoring System for Poland). Produkt stworzony przez Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy we współpracy z Głównym Urzędem Geodezji i Kartografii. Zapewnia on nieprzerwany dostęp do danych nawigacji satelitarnej. Główne funkcje systemu obejmują wykrywanie zakłóceń i/lub niedostępności sygnałów, generowanie alarmów dotyczących przypadków potencjalnie



Ryc. 8. Mapa zakłóceń GNSS, źródło: GPSJAM

nieprawidłowego działania systemów nawigacyjnych, wizualizacji zjawiska w czasie rzeczywistym, w dedykowanym serwisie WWW dostępnym dla wszystkich zainteresowanych użytkowników.

W ostatnich kilku latach, od momentu wzrostu liczby incydentów zakłóceń GNSS, wiele krajów wprowadziło obowiązkowe szkolenia dla załóg latających i kontrolerów ruchu lotniczego w zakresie działania w tego typu sytuacjach niestandardowych. Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO i krajowe władze lotnicze, mając na uwadze zapewnienie najwyższych standardów bezpieczeństwa w ruchu lotniczym, zalecają cyklicznie ich odbywanie. Wprowadzane zmiany procedur operacyjnych, frazeologii, nowe technologie w obszarze wyposażenia statków powietrznych w tym zakresie wymagają stałego uzupełniania wiedzy. Kursy obejmują zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne. Szkolenia skupiają się na zagadnieniach rozpoznawania zakłóceń i ich rodzajów, skutków oddziaływania na systemy pokładowe i możliwość nawigowania. Pilotów kształci się w zakresie swobodnego, sprawnego przechodzenia na alternatywne źródła nawigacji, wykorzystania ręcznych trybów pilotowania, poprawnego raportowania sytuacji i wyrazistej komunikacji ze służbami ATC. Kontrolerzy mogą pogłębiać wiedzę w zakresie przekazywania wektorów radarowych dla samolotów z problemami GNSS oraz współpracy z załogami w kwestii wykorzystywania alternatywnych metod nawigacyjnych. Ćwiczenia praktyczne realizowane w symulatorach obejmują odwzorowanie sytuacji zakłóceń, reagowanie i doskonalenie umiejętności działania, wykorzystywania przygotowanych na takie okoliczności scenariuszy. Istotne wsparcie dla personelu stanowią także regularnie publikowane biuletyny bezpieczeństwa z aktualnymi informacjami o nowo wykrywanych zagrożeniach, istotnych ze względu na ruch lotniczy.

Marginalizowanym zagadnieniem wydaje się być możliwość zapewnienia bezpiecznego nawigowania małych samolotów lotnictwa ogólnego (General Aviation) w rejonach występowania zakłóceń GNSS. Ze względu na postępującą cyfryzację, łatwość użytkowania, przystępność cenową oraz wygodę użytkowania systemów satelitarnych w wielu maszynach rezygnuje się z tradycyjnych instrumentów, takich jak radionamierniki VOR, NDB czy nawigacja realizowana według map i orientacji wzrokowej (VFR). Na pokładach części maszyn wyposażenie oparte o GNSS to niejednokrotnie jedyne źródło informacji o położeniu przestrzennym maszyny i planowanej trasie przelotu. Wśród pilotów GA zanikają kompetencje tradycyjne,

jakimi są między innymi umiejętność nawigacji w oparciu o podstawowe przyrządy pilotażowe. Wielu nowych adeptów latania szkoli się i później korzysta z samolotów z nowoczesną kabiną wyposażoną jedynie w wielofunkcyjne, cyfrowe wyświetlacze (glass cockpit). W ten sposób zdolność do nawigacji wzrokowej, opartej na obserwacji otoczenia, w tym charakterystycznych punktów na ziemi lub radionawigacyjnej zanika. W sytuacji niedostępności sygnałów GNSS lub ich zakłócenia takie zjawisko tworzy poważną lukę w cyberbezpieczeństwie i bezpieczeństwie operacyjnym. W tej sytuacji konieczne jest wprowadzenie różnych działań profilaktycznych, zanim dojdzie do tragicznego incydentu w powietrzu. W zakresie technicznym zaleca się instalację prostych odbiorników VOR lub ADF/NDB jako backup, przechowywanie papierowych map i procedur, stosowanie aplikacji z alertami o zakłóceniach GNSS, np. Garmin Pilot lub ForeFlight. Od strony operacyjnej sugerowane jest szkolenie pilotów z nawigacji klasycznej, z użyciem kompasu, zegara i mapy, regularne ćwiczenia sytuacji „loss of GNSS” i symulacje awarii systemów satelitarnych, zwiększanie świadomości o tego typu zagrożeniach.

Podsumowując należy stwierdzić, że zakłócenia sygnałów GNSS stanowią obecnie jedno z najpoważniejszych wyzwań dla systemów nawigacyjnych wykorzystywanych w lotnictwie, gdzie precyzja i niezawodność określania pozycji mają kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa operacji lotniczych. Działania zagłuszające i fałszujące sygnały prowadzą do obniżenia dostępności, niezawodności oraz dokładności usług realizowanych w oparciu o GNSS, co jest szczególnie istotne w obszarach o wysokim natężeniu operacji powietrznych. Odpowiedzią na zidentyfikowane niedogodności jest przede wszystkim korzystanie z rozwiązań hybrydowych, polegających na integracji systemów satelitarnych z naziemnymi oraz innymi, alternatywnymi metodami lokalizacji. Taka synergia zwiększa odporność całego układu na zakłócenia i awarie, zapewnia stabilność i ciągłość realizowania usług nawigacyjnych. W przeciwdziałaniu skutkom zakłóceń istotną rolę odgrywają także załogi i personel służb ruchu lotniczego. Piloci zmieniają sposób pilotażu, stosując alternatywne źródła nawigacji. Kontrolerzy ruchu lotniczego koordynują trasy i informują o zagrożeniach, zapewniając bezpieczeństwo i ciągłość operacji. Współdziałanie technologii i kompetentnego personelu zwiększa odporność całego systemu lotniczego na utrudnienia w nawigacji lotniczej jakie stanowi zjawisko zakłócania sygnałów satelitarnych GNSS.



Paweł Szpakowski

**Główny Specjalista ds. kontroli urządzeń z powietrza,
Inspektor Pokładowy**

Od ponad 28 lat członek załogi samolotów Inspekcji Lotniczej PAŻP „Papuga”,
Local Safety Expert,
autor publikacji z zakresu bezpieczeństwa lotniczego,
operator i pilot dronów



Biuletyn Bezpieczeństwa
Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej



Polska Agencja Żeglugi Powietrznej

ul. Wieżowa 8
02-147 Warszawa
tel. +48 22 574 67 28
www.pansa.pl