



Article citation info:

Jafernik, H., Krasuski, K., Michta, J. Assessment of suitability of radionavigation devices used in air. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016, **90**, 99-112. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.90.9.

Henryk JAFERNIK¹, Kamil KRASUSKI², Jan MICHTA³

ASSESSMENT OF SUITABILITY OF RADIONAVIGATION DEVICES USED IN AIR

Summary. The article characterises/describes the radionavigation devices recommended for and used in contemporary aviation taking into account the requirements of the legal regulations concerning CNS/ATM systems as determined by international aviation organisations. The latest achievements in the field of satellite techniques connected with the development in electronic and information engineering as well as in the area of computing machines have resulted in the higher precision of determining the parameters of technical devices, therefore the article focuses especially on the issues of the application of satellite navigation for aviation and the possibility of its improvement.

Keywords: radionavigation, navigation systems, flight control services, airport

OCENA PRZYDATNOŚCI URZĄDZEŃ RADIONAWIGACYJNYCH STOSOWANYCH W ŻEGLUDZE POWIETRZNEJ

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano urządzenia radionawigacyjne zalecane i wykorzystywane we współczesnym lotnictwie z zaznaczeniem wymagań, wynikających z uregulowań prawnych, dotyczących systemów CNS/ATM, określonych przez międzynarodowe organizacje lotnicze. Ze względu na ostatnie osiągnięcia w dziedzinie technik satelitarnych (związane z rozwojem elektroniki,

¹ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Krasińskiego 13 Street, 40-019 Katowice, Poland. E-mail: henryk.jafernik@polsl.pl.

² Team of Satellite Techniques, 08-530 Dęblin, ul. Zawiszy Czarnego 16, Poland. E-mail: kk_deblin@wp.pl.

³ Polish Air Force Academy, Dywizjonu 303 no 35, 08-521 Dęblin, Poland. E-mail: balot@wp.pl.

informatyki czy maszyn obliczeniowych), a wraz z tym wzrost dokładności określania parametrów urządzeń technicznych, w artykule zwrócono szczególną uwagę na problematykę stosowania i możliwości doskonalenia nawigacji satelitarnej w zastosowaniach lotniczych.

Słowa kluczowe: Radionawigacja, systemy nawigacyjne służba kontroli lotów, port lotniczy

1. WSTĘP

Rozwój nawigacji i związanych z nią sposobów, metod i środków technicznych wykorzystywanych do określania pozycji czy prowadzenia obiektów ruchomych po wyznaczonej trasie do określonego celu początkowo podyktowany był potrzebami żeglugi morskiej, gdzie jednocześnie przez stulecia rozwijano i doskonalono metody określania położenia. Wraz z pojawieniem się pierwszych samolotów nawigacyjne osiągnięcia w żegludze morskiej przetransformowano do żeglugi powietrznej. Szybki postęp techniczny i technologiczny jaki miał miejsce w XIX wieku oraz rywalizacja w doskonaleniu uzbrojenia w trakcie dwóch wojen światowych XX wieku wpłynęły na rozwój i szeroko pojęte wykorzystanie lotnictwa jako szybkiego środka transportu. Po drugiej wojnie światowej duża liczba wojskowych samolotów transportowych znalazła swoje miejsce w lotnictwie cywilnym, które rozwijało się bardzo gwałtownie zarówno w kraju, jak i na świecie. Dość szybko zauważono, że transport lotniczy odgrywa istotną rolę w światowej gospodarce i jest jednym z jej najszybciej rozwijających się sektorów. Oznaczało to, że załogi statków powietrznych miały możliwość wykonywania lotów na duże odległości, często w rejony wcześniej nierozpoznane, co z kolei wpłynęło na konieczność wprowadzania i stosowania pomocy do prowadzenia nawigacji podczas wykonywania lotów w dzień, a szczególnie w nocy oraz w pogorszonych warunkach pogodowych.

Podstawowa i najstarsza metoda określania położenia, niewymagająca stosowania żadnych urządzeń nawigacyjnych, tj. nawigacja wzrokowa, polegająca na obserwacji terenu, nad którym znajduje się statek powietrzny i porównaniu z papierową mapą lotniczą, sprawdzała się w lotach na niedużych dystansach i w sprzyjających warunkach atmosferycznych. Potrzeba lotów w chmurach czy nad chmurami, a następnie zniżanie i podejście do lądowania przy ograniczonej widzialności, z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa związanych z zachowaniem m.in. minimalnego przewyższenia nad przeszkodami terenowymi czy dokładności określania położenia, wymusiła rozwój innego działu nawigacji, jakim jest radionawigacja. Polega ona na stosowaniu urządzeń zainstalowanych na ziemi lub umieszczonych w kosmosie oraz odpowiednio współpracujących z nimi urządzeń pokładowych.

2. ASPEKTY PRAWNE OBEJMUJĄCE STOSOWANIE URZĄDZEŃ RADIONAWIGACYJNYCH

Pisząc o regulacjach prawnych w lotnictwie należy zacząć od Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ang. International Civil Aviation Organization, ICAO), która jest odpowiedzialna za opracowywanie i wdrażanie międzynarodowych przepisów regulujących bezpieczeństwo ruchu lotniczego i ekonomię transportu lotniczego. ICAO została powołana w 1944 r. na mocy konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym. Faktyczną działalność rozpoczęła w kwietniu 1947 r., jako organizacja wyspecjalizowana systemu Narodów Zjednoczonych. Celem działalności ICAO, określonym w art. 44 konwencji chicagowskiej, jest „rozwijanie zasad i techniki międzynarodowej

żeglugi powietrznej oraz popieranie planowania i rozwoju międzynarodowego przewozu lotniczego”.

Jednym z podstawowych narzędzi działania ICAO jest wdrażanie Norm i Zalecanych Metod Postępowania. Uregulowania dla łączności lotniczej, w tym pomocy nawigacyjnych po raz pierwszy zostały przyjęte przez Radę 30 maja 1949 r., zgodnie z założeniami artykułu 37 konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (Chicago 1944 r.) i oznaczone, jako Załącznik 10 do Konwencji. Obowiązywać zaczęły jako jeden dokument od 1 marca 1950 r. Od 20 marca 1995 r., Załącznik 10 został przeredagowany i zawierał pięć tomów, z czego Tom I dotyczył – Pomocy radionawigacyjnych.

W lotnictwie cywilnym i państwowym wykorzystuje się standardowe systemy nawigacyjne zbudowane na podstawie urządzeń infrastruktury nawigacyjnej naziemnej i kosmicznej. Do urządzeń znajdujących się na ziemi zaliczamy radiolatarnie bezkierunkowe (NDB), radiolatarnie ogólnokierunkowe (VOR), dalmierze radioelektroniczne (DME), TACAN, system lądowania wg wskazań przyrządów (ILS), mikrofalowy system lądowania (MLS), natomiast infrastrukturę kosmiczną stanowi globalny system nawigacji satelitarnej (GNSS). Ponadto charakterystyka pomocy radionawigacyjnych jako standard międzynarodowy została uregulowana w opracowanych Normach i Zalecanych Metodach Postępowania (SARPs) i wprowadzona do Załącznika nr 10 do Konwencji Chicagowskiej ICAO – Łączność Lotnicza, tom I (Pomoce radionawigacyjne).

Od wielu lat mówi się o wycofaniu z użycia klasycznych pomocy nawigacyjnych. Jako główny powód podaje się wysokie koszty ich instalacji i utrzymania, a większość tych urządzeń wymaga częstych kontroli i konserwacji. Aneks 10 ICAO stawia ostre wymagania techniczne i nakłada obowiązek wykonywania okresowych kontroli z powietrza. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że aktualnie Globalny Plan Żeglugi Powietrznej dla Systemów CNS/ATM (Doc. 9750) uznaje globalny satelitarny system nawigacyjny (GNSS) jako kluczowy element systemów łączności, nawigacji i dozoru w procesie zarządzania ruchem lotniczym (CNS/ATM) i jako fundament, na którym państwa mogą budować usprawnione służby oraz usługi żeglugi powietrznej.

Na współczesnych SP w zależności od ich zastosowania wykorzystywane są różne urządzenia i systemy radionawigacyjne. Najbardziej rozpowszechnionymi i najprostszymi urządzeniami radionawigacyjnymi są, pracujące na falach długich i średnich, automatyczne radiokompas. W ratownictwie rozbitków stosowane są radionamierniki, pracujące w zakresie fal ultrakrótkich. W lotnictwie cywilnym do bliskiej nawigacji powszechnie jest stosowany system typu VOR oraz radiodalmierz typu DME. Występują również połączenia systemu VOR z radiodalmierzem DME (system odległościowo-namiarowy typu VOR/DME) lub radiodalmierzem systemu TACAN (system VORTAC). System radionawigacyjny TACAN znajduje zastosowanie w lotnictwie wojskowym.

Naziemne systemy nawigacyjne przeznaczone są do pomiaru azymutu i odległości statku powietrznego od miejsca rozwinięcia systemu.

Naziemne systemy nawigacyjne przy współpracy z aparaturą pokładową, z dużą dokładnością i w dowolnych warunkach atmosferycznych, w dzień i w nocy, zapewniają:

- ciągle przekazywanie pilotowi na pokład statku powietrznego miejsca jego położenia w współrzędnych biegunowych (azymut, odległość),
- wyprowadzenie statku powietrznego w dowolny wyznaczony punkt, leżący w zasięgu systemu,
- określenie momentu dolotu statku powietrznego do wyznaczonego punktu oraz momentu przelotu nad punktem,
- korekcję autonomicznych liczników przebytej drogi,
- lot z wykorzystaniem automatycznego pilota,
- podawanie na pokład statków powietrznych sygnału rozpoznawczego.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa, krytyczną fazą lotu SP jest lądowanie. Ze względu na to, że lądowanie często przebiega w warunkach złej widoczności i przy niskim pułapie chmur opracowano układy nawigacyjne, ułatwiające pomyślne zakończenie lotu na planowanym lotnisku, a także związane z nimi przepisy, które regulują standard urządzeń naziemnych, wyposażenie samolotu i kwalifikacje załogi. Systemy lądowania wymagają spełnienia dużej liczby kryteriów. Do trzech podstawowych, które każdy z systemów lądowania musi spełniać, należą:

- wysoka dokładność określania miejsca położenia użytkownika względem wirtualnej ścieżki schodzenia,
- ciągłość dostarczania sygnałów dla potrzeb realizacji procesu lądowania,
- wiarygodność podawanych sygnałów.

Systemy lądowania można podzielić na systemy czynne i bierne.

Systemy czynne (ILS, MLS, satelitarne systemy lądowania) są to takie systemy, gdzie pilot na podstawie wskazań przyrządów pokładowych (odbierających sygnały od urządzeń naziemnych), sam podejmuje decyzję o wykonaniu odpowiednich manewrów samolotem. W skład czynnych systemów lądowania wchodzi część naziemna (radiolatarnie) oraz pokładowa (urządzenia odbiorcze).

W systemach biernych pilot, za pośrednictwem radiostacji pokładowej, otrzymuje polecenia, zazwyczaj od kontrolera ruchu lotniczego (SRA, PAR) wykonania odpowiednich manewrów, które prowadzą po nakazanej ścieżce zniżania i kursie do osiągnięcia minimów związanych z lądowaniem, nawiązania kontaktu wzrokowego z lotniskiem i bezpiecznym lądowaniem.

3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA NAZIEMNYCH URZĄDZEŃ NAWIGACYJNYCH

Radionamiernik VHF (VHF direction finder – VHF DF lub VDF) jest urządzeniem naziemnym, którego zadaniem jest określenie kąta między północnym kierunkiem lokalnego południka magnetycznego a linią namiaru statku powietrznego (QDR czyli radial). Rolę pokładowej części systemu pełni radiostacja komunikacyjna samolotu, która w czasie namierzania musi być przełączona na nadawanie. Ponieważ do pełnego określenia pozycji samolotu potrzeba minimum dwóch linii namiaru, więc radionamierniki VHF pracują sprzężone po dwa lub więcej, ze wspólnym urządzeniem wskaźnikowym. Dokładność typowych radionamierników VHF wynosi $\pm 2^\circ$, z tym że jest ona w dużym stopniu zależna od lokalizacji – w zakresie VHF rzeźba terenu może mieć duży wpływ na propagację fal radiowych. Wadą radionamierników VHF jest nieciągłość pomiaru. Najszybsze układy radionamierników dokonują pomiaru w ciągu od 2 do 3 sekund. Zaletą jest możliwość korzystania z namiarów przez każdy statek powietrzny dysponujący radiostacją komunikacyjną VHF.

Do radionamierzania przeznaczona jest częstotliwość 130 MHz, ale niekiedy używa się także częstotliwości 122.7 MHz. Na dzień dzisiejszy urządzenie stosowane jest bardzo sporadycznie.

Radiolatarnia NDB (Non-directional Beacon) jest naziemnym nadajnikiem bezkierunkowym, pracującym na falach średnich (od 200 do 600 kHz). Sygnał nadawany przez radiolatarnię NDB zawiera znak rozpoznawczy w postaci trzech znaków alfabetu Morse'a, powtarzanym co około 30 sekund. Znaki Morse'a są nadawane tonem 1020 Hz (w starszych radiolatarniach także 400 Hz). Przerwa między nimi jest równa 600 ms. W uzasadnionych przypadkach, np. okolicach o dużym poziomie zakłóceń, dopuszczalne jest

stosowanie radiolatarni z tzw. kluczowaniem fali nośnej (emisja A1A). Zasięg sygnałów NDB zależy od mocy nadajnika i pory doby. Dla radiolatarni o mocy 100 W zasięg w dzień wynosi około 350 km, w nocy około 50% więcej, ze względu na lepsze warunki propagacyjne fal średnich. Bezpośrednio nad radiolatarnią wskazania systemu są zmienne i niestabilne. Obszar ten nazywa się stożkiem niejednoznaczności wskazań lub stożkiem martwym.

Odbiornik pokładowy systemu NDB, czyli radiokompas (ADF – Automatic Direction Finder), po dostrojeniu do częstotliwości radiolatarni wskazuje kąt kursowy na radiolatarnię NDB z dokładnością $\pm 6,9^\circ$. Zakres częstotliwości odbiornika wynosi od 150 do 1750 kHz – jest rozszerzony w stosunku do typowego zakresu NDB dla zachowania możliwości namierzania publicznych radiostacji średniofalowych.



Rys. 1. Trasowa radiolatarnia NDB

Radiolatarnia ogólnokierunkowa VOR (VHF Omnidirectional Range) jest najszerszej stosowanym kątowym systemem radionawigacyjnym. Często odbiornik VOR nazywa się po prostu odbiornikiem nawigacyjnym (tzw. NAV). VOR jest bardziej uniwersalny i znacznie dokładniejszy od NDB (dopuszczalny błąd $\pm 2,5^\circ$, dokładność prowadzenia po linii drogi $\pm 5,2^\circ$). W sygnale VOR jest zawarta informacja azymutalna, która zostaje odczytana i zobrazowana przez pokładową (odbiorczą) część systemu w postaci:

- namiaru SP od radiolatarni względem kierunku północy magnetycznej,
- osiągnięcia żadanego namiaru do lub od radiolatarni VOR,
- sygnału minięcia radiolatarni przez statek powietrzny,
- dźwiękowego sygnału rozpoznawczego radiolatarni (trzy znaki alfabetu Morse'a).

Kierunek północy magnetycznej należy rozumieć jako północny kierunek lokalnego południka przechodzącego przez statek powietrzny, względnie radiolatarnię.



Rys. 2. Typowa radiolatarnia VOR

Radiolatarnie VOR pracują zasadniczo w zakresie od 112 do 117.9 MHz (co 100 kHz). Dopuszcza się wykorzystanie częstotliwości od 108 do 112 MHz, z odstępem 200 kHz (tzn. 112.0; 112.2; 112.4 itd). Moc wyjściowa radiolatarni VOR wynosi od 100 do 200 W. Radiolatarnie VOR o mocy zmniejszonej do 50 W, tzw. T-VOR (Terminal VOR) są przeznaczone do instalowania na obszarach dużego zagęszczenia pomocy radionawigacyjnych, np. w okolicy portów lotniczych. Odmianą VOR jest tzw. D-VOR (Doppler-VOR), w dużym stopniu odporny na wpływ przeszkód terenowych. Pomimo odmiennej zasady pracy radiolatarni jest całkowicie kompatybilny z klasycznymi odbiornikami. Na lotniskach czasem spotyka się radiolatarnie testowe, nazywane VOT (VHF Omnidirectional Test facility), służące do kontroli i kalibracji pokładowych zestawów VOR. VOT mają moc wyjściową nie większą niż 5 W. Pracują na częstotliwościach 108.0 i 108.05 MHz.



Rys. 3. Radiolatarnia D-VOR

Połączenie systemu VOR z radioodległościomierzem DME (Distance Measuring Equipment) nazywa się **systemem VOR/DME**. System odległościowo-kątowy VOR/DME jest obecnie podstawowym systemem radionawigacji bliskiego i średniego zasięgu.

Radiolatarnia VOR/DME jest wspólnie zamontowanym VOR i DME. Poszczególne kanały VOR są ściśle przyporządkowane kanałom DME, tak że dostrajając odbiornik VOR na podaną częstotliwość radiolatarni ustawia się także kanał zblokowanego z nim DME.

DME pracuje na zasadzie odzewowej; pomiar odległości w urządzeniu pokładowym odbywa się na podstawie zliczenia czasu od wysłania impulsów zapytania do otrzymania odpowiedzi od naziemnej radiolatarni VOR/DME.



Rys. 4. Radiolatarnia VOR/DME z anteną DME

System TACAN (TACTical Air Navigation) jest wojskowym systemem odległościowo-kątowym. Pracuje w zakresie częstotliwości 962-1213 MHz (podobnie jak DME). Dokładność wyznaczania azymutu, przy dobrej lokalizacji radiolatarni, wynosi 1° , a dokładność odległości około 0,1 NM. Pomiar odległości w Tacanie odbywa się tak samo, jak w urządzeniach DME, dlatego często spotyka się radiolaternie Tacan instalowane razem z radiolaterniami VOR. Taki zestaw, nazywany VORTAC albo VOR/DMET (VOR-DME-Tacan), jest kompatybilny z pokładowym zestawem VOR/DME.

Osiągnięcia naukowe w zakresie: elektroniki, optoelektroniki, informatyki i metod numerycznych doprowadziły do rozpowszechnienia się inercjalnych systemów nawigacji powszechnie stosowanych na okrętach podwodnych, w raketach, w samolotach wojskowych, pociskach manewrujących, statkach kosmicznych i w samolotach cywilnych. Postęp w dziedzinie komputerów cyfrowych pozwolił zwiększyć dokładność i niezawodność **bezwładnościowych systemów nawigacji – INS** (Inertial Navigation System). Podstawowymi elementami pomiarowymi, tworzącymi INS i mającymi bezpośredni wpływ na dokładność systemu są: przyspieszeniomierze i giroskopy. Przyspieszeniomierze są urządzeniami przetwarzającymi przyspieszenia działające wzdłuż osi pomiarowej na sygnał elektryczny, proporcjonalny do jego wartości.

Przyspieszeniomierze ze względu na liczbę stopni swobody przemieszczania się elementu pomiarowego względem obudowy można podzielić na: jedno-, dwu- i trójosiowe.

W zależności od kinematyki połączenia masy pomiarowej z obudową wyróżnia się przyspieszeniomierze:

- osiowe (element pomiarowy przemieszcza się liniowo),
- wahadłowe (element pomiarowy przemieszcza się kątowo).

Przyspieszeniomierze stosowane w INS muszą się charakteryzować: dużą czułością min. (10-4...10-5), jednostek przyspieszenia, dużym zakresem pomiarowym, zależnym od możliwości manewrowych samolotu – ± 20 jednostek przyspieszenia, powtarzalnością pomiarów, liniowością charakterystyki, niezależnością pomiarów od temperatury, a błąd względny nie powinien przekraczać 0,01%.

4. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SATELITARNYCH SYSTEMÓW ŁĄDOWANIA

Nazwą **GPS (Global Positioning System)** potocznie określa się amerykański, wojskowy system nawigacyjny Navstar (Navigational Satellite Time and Ranging). GPS Navstar oparty jest na zespole 24 satelitów, krążących na orbitach 20200 km (11 tys. NM) nad Ziemią (dwukrotne okrążenie Ziemi w ciągu doby).

Działanie systemu jest oparte na wyznaczaniu odległości między odbiornikiem a satelitami. Wyznaczenie położenia odbiornika w przestrzeni wymaga więc odbioru z minimum trzech satelitów (wymagane są cztery). Satelity GPS emitują dwa sygnały: kod C/A (Coarse Acquisition, częstotliwość L1 = 1575,42 MHz) dla użytkowników SPS i kod P dla PPS (Precise, L2 = 1227,6 MHz) dla zastosowań wojskowych. GPS przewiduje dwa poziomy dokładności: PPS (Precise Positioning System) – dokładny serwis nawigacyjny i SPS (Standard Positioning System) – standardowy serwis nawigacyjny.



Rys. 5. Segment satelitarny systemu GPS NAVSTAR

PPS jest przeznaczony głównie dla wojsk NATO, a SPS dla użytkowników na całym świecie, bez żadnych ograniczeń i opłat. Dokładność SPS wynosi co najmniej 100 m przy pomiarach dwuwymiarowych (w praktyce osiągalna jest powtarzalna dokładność rzędu 10 m) i 156 m przy pomiarach trójwymiarowych. Dokładność pomiaru czasu wynosi 340 nanosekund.

Pomocnicze systemy nawigacji lotniczej wykorzystujące GPS podzielono na klasy według funkcji:

Klasa A: Urządzenia łączące odbiornik GPS i boki realizujące funkcje nawigacyjne. Odbiorniki muszą być wyposażone w funkcje wewnętrznej kontroli spójności danych (RAIM – Receiver Autonomous Integrity Monitoring, algorytm weryfikujący poprawność wyznaczania współrzędnych GPS na podstawie analizy sygnału, wysokości barometrycznej i/lub VOR/DME).

A1 – Urządzenia nawigacji trasowej, nawigacji w rejonie lotniska, urządzenia do podejścia nieprecyzyjnego.

A2 – Urządzenia tylko do nawigacji trasowej i w rejonie lotniska.

Klasa B: Urządzenia, w których odbiornik GPS jest źródłem danych dla zintegrowanego systemu nawigacyjnego.

B1 – Urządzenia nawigacji trasowej, nawigacji w rejonie lotniska i urządzenia do podejścia nieprecyzyjnego, których odbiorniki GPS muszą być wyposażone w funkcje RAIM.

B2 – Urządzenia tylko do nawigacji trasowej i w rejonie lotniska, których odbiorniki GPS muszą być wyposażone w funkcje RAIM.

B3 – Urządzenia nawigacji trasowej, nawigacji w rejonie lotniska i urządzenia do podejścia nieprecyzyjnego, w których funkcje równoważne RAIM są realizowane przez zintegrowany system nawigacyjny.

B4 – Urządzenia tylko do nawigacji trasowej i w rejonie lotniska, w których funkcje równoważne RAIM są realizowane przez zintegrowany system nawigacyjny.

Klasa C: Urządzenia, w których odbiornik GPS jest źródłem danych dla zintegrowanego systemu nawigacyjnego, sterującego lotem automatycznym (autopilotem).

C1, C2, C3, C4 jak wyżej.

Wnioski płynące z doświadczeń z satelitarnymi systemami nawigacyjnymi wskazują, że niezbędny jest ogólnosiwiatowy cywilny system nawigacji, określany jako Global Navigation Satellite System (GNSS). Koncepcja systemu zakłada eliminację typowych niedomagań GPS-u przez zwielokrotnienie źródeł informacji pozycyjnej, zapewnienie nieprzerwanego dopływu danych korekcyjnych oraz możliwość stałego monitoringu jakości danych pozycyjnych.

GPS (lub GLONASS) jest systemem nawigacyjnym spełniającym w lotnictwie cywilnym wymogi systemu pomocniczego (*supplementary*). Aby można było uznać go za system podstawowy (jakim jest GNSS) konieczne było poprawienie osiągnięć systemów źródłowych (GPS/GLONASS) – szczególnie w zakresie ich integralności, dostępności i ciągłości. Uzyskuje się to przez wspomaganie GPS-u dodatkową funkcjonalnością i/lub dodatkowymi systemami.

Obecnie stosowane są trzy rodzaje wspomagania GPS:

- ABAS – Aircraft Based Augmentation System – system wspomagania oparty na dodatkowej funkcjonalności wyposażenia pokładowego,
- SBAS – Space Based Augmentation System – system wspomagania oparty na dodatkowych sygnałach satelitarnych,
- GBAS – Ground Based Augmentation System – system wspomagania oparty na dodatkowym systemie naziemnym.

ABAS jest oparty na funkcjonalności RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) odbiornika GNSS.

RAIM – monitoruje spójność sygnałów GPS; alarmuje w sytuacji utraty wymaganej dokładności nawigacji w danej fazie lotu (trasa/dolot/podejście). Oparty jest na algorytmie FD – Fault Detection – pozwalającym na wykrycie błędnych wskazań jednego z satelitów, przyjętych do obliczenia pozycji.

RAIM działa, jeśli jest widocznych/dostępnych minimum 5 satelitów, zapewniających satysfakcjonującą geometrię do obliczenia pozycji (FD).

Nowocześniejsze wersje RAIM wykorzystują algorytm FDE – Fault Detection & Exclusion, dostępny przy minimum 6 dostępnych satelitach, który pozwala nie tylko na wykrycie błędnych wskazań satelity, ale również na ich wykluczenie z obliczeń pozycji nawigacyjnej – co umożliwia kontynuację nawigacji bez alarmu RAIM.

SBAS – jest oparty na wykorzystaniu dodatkowych danych, przesyłanych przez satelitę geostacjonarnego (innego systemu niż GPS), zwiększających dokładność i spójność nawigacji.

W Europie wspomaganie SBAS jest zapewniane przez system EGNOS.

W dużym uproszczeniu – naziemne stacje referencyjne systemu zbierają dane do korekt GPS, przekazują je do głównej stacji kontrolnej, która transmituje je do swego satelity geostacjonarnego. Satelita retransmituje te dane do użytkownika; zapewniając dodatkowo również pomiar odległości i informację o użyteczności nawigacyjnej satelitów GPS.

Pozwala to na zwiększenie dokładności nawigacji; dzięki zwiększeniu dokładności w płaszczyźnie pionowej możliwość zastosowania prowadzenia pionowego GNSS w podejściach do lądowania (APV).

GBAS – jest oparty na wykorzystaniu dodatkowych danych przesyłanych przez dedykowany system naziemny, zwiększających dokładność i spójność nawigacji do poziomu porównywalnego z systemem ILS (do podejść precyzyjnych).

Naziemne anteny zbierają sygnały GPS, przekazują je do jednostki centralnej, która oblicza i transmituje na pokład statku powietrznego dane dotyczące ścieżki podejścia, bieżące korekty do sygnałów GPS oraz informacje dotyczące użyteczności satelitów.

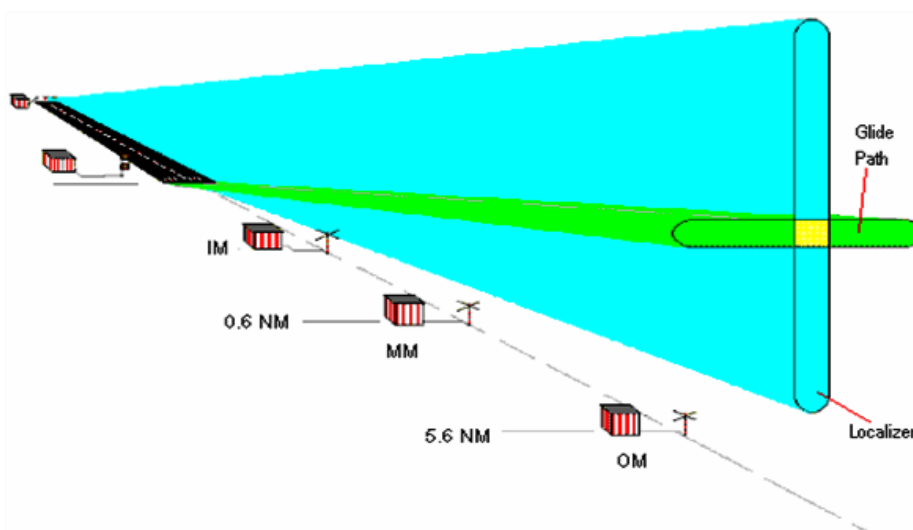
Stosowany jest wyłącznie w zakresie podejść do lądowania. Jeden system zainstalowany na lotnisku jest w stanie „oprzyrządownić” w podejścia precyzyjne wszystkie drogi startowe.

5. SYSTEMY LĄDOWANIA

Aktualnie na lotniskach funkcjonuje wiele systemów. Powszechne zastosowanie zyskał system lądowania wg wskazań przyrządów ILS (Instrument Landing System).

System wspomaganie lądowania przy ograniczonej widzialności ILS ma za zadanie prowadzić statek powietrzny z nakaznym kursem lądowania po ścieżce podejścia. ILS występuje w trzech klasach, które m.in. wpływają na kategorię lotniska. System składa się z trzech zespołów urządzeń:

- nadajnik kierunku (Localizer),
- nadajnik ścieżki schodzenia (Glide Path),
- radiolatarnie markerów (MRK), pełniące zadanie znaczników odległości do progu drogi startowej.



Rys. 6. Rozmieszczenie naziemnych elementów systemu lądowania ILS

Obecnie często spotyka się instalacje ILS z radiolatarnią DME do pomiaru odległości. Antenę DME instaluje się na maszcie nadajnika ścieżki schodzenia.

Nadajnik kierunku podejścia ILS (oznaczany LOC lub LLZ) formuje płaską pionową wiązkę radiową, która wyznacza kierunek lądowania. Pracuje w zakresie częstotliwości 108.1-111.9 MHz (co 200 kHz). Ponadto nadajnik kierunku emituje również sygnał identyfikacyjny ILS: trzy znaki Morse'a poprzedzone znakiem „i”, nadawane tonem 1020 Hz.

Radiolatarnia ścieżki (oznaczana GP) wyznacza pochyloną płaszczyznę podejścia. Pracuje na częstotliwościach 328-335 MHz.

System ILS ma trzy markery:

- wewnętrzny (inner) IM; 75 m od progu drogi startowej,
- środkowy (middle) MM; 1070 m od progu,
- zewnętrzny (outer) OM; 7240 m od progu.

Markery odróżnia się na podstawie emitowanych przez nie sygnałów. Odbiornik na pokładzie statku powietrznego daje sygnał akustyczny w słuchawkach pilota oraz sygnał wizualny zapalających się lampek w momencie przelotu nad określonym markerem.

Obecnie stosuje się tylko dwa markery zewnętrzne, ponieważ wewnętrzny przy dzisiejszych prędkościach podejścia, jest właściwie bez znaczenia.

Niekiedy markery montuje się razem z radiolatarnią NDB, tworząc tzw. lokator (COMLOC – Compass Locator). Lokator oznacza się dodając literę L do oznaczenia: LMM – Locator Middle Marker, LOM – locator outer marker. Lokator ułatwia zaplanowanie wejścia w sektor kierunku ILS w pożądanym miejscu.

Jeżeli taki lokator jest umieszczony w drodze lotniczej nazywa się markerem trasowym. Marker trasowy nadaje kropki.

Zestaw pokładowy ILS jest zintegrowany z zestawem VOR i składa się z trzech odbiorników: VOR/LOC, GP i odbiornika markerów. Częstotliwość odbioru LOC i GP jest wybierana razem (pary kanałów kierunku i ścieżki są opublikowane w „Aneksie 10” ICAO).

Spotyka się także uproszczone pomoce nawigacyjne emitujące tylko sygnał kierunku lądowania, określane jako LDA (localizer directional aid) albo SDF (simplified directional facility). Nie są one pomocami do podejścia precyzyjnego, ponieważ nie emitują sygnałów ścieżki schodzenia.

Następcą ILS miał być mikrofalowy system lądowania MLS (Microwave Landing System). Jego zaletami są: większa dokładność i sektory pokrycia, niewrażliwość na zakłócenia i warunki propagacji fal, możliwość kształtowania linii podejścia w zależności od warunków terenowych lotniska, mniejsze wymagania co do lokalizacji radiolatarni naziemnych. Ponadto MLS standardowo zapewnia prowadzenie SP w na kierunku przeciwnym do kierunku lądowania za pomocą tzw. tylnego kursu (manewr odejścia na drugi krąg).

Do pomiaru odległości w MLS służy podsystem DME/P (Precision DME) o dokładności około 30 m. DME/P wymaga specjalnego transpondera pokładowego, chociaż może współpracować także ze zwykłymi pokładowymi zestawami DME (dokładność jak dla DME).

System MLS używany jest głównie przez lotnictwo wojskowe NATO. Zastosowania cywilne spotyka się sporadycznie.

Zgodnie z danymi opublikowanymi w rejestrach Urzędu Lotnictwa Cywilnego w Polsce funkcjonuje 16 lotnisk wojskowych, 13 cywilnych portów lotniczych oraz 278 lądowisk. Bezpieczne wykonywanie operacji lotniczych, szczególnie w lotach według wskazań przyrządów, możliwe jest dzięki korzystaniu z działających i odpowiednio zlokalizowanych lotniczych urządzeń naziemnych – urządzeń radionawigacyjnych. Swobodne użytkowanie przestrzeni powietrznej kontrolowanej, z uwzględnieniem obowiązującego wymogu

charakterystyki nawigacyjnej RNP 5 możliwe jest dzięki urządzeniom trasowym głównie VOR/DME lub DVOR/DME, TACAN, GNSS. Natomiast procedury związane z odlotem, dolotem czy procedury podejścia do lądowania według wskazań przyrządów odbywają się z wykorzystaniem: NDB, VOR lub DVOR, TACAN, GNSS, ILS, DME oraz radarowe SRA, PAR.

Pośród podejść do lądowania można wyróżnić podejścia nieprecyzyjne (NPA – non-precision approach procedure).

NPA to procedura podejścia według wskazań przyrządów, w której wykorzystuje się prowadzenie poziome, ale nie wykorzystuje się prowadzenia pionowego.

Zgodnie z obowiązującymi wymaganiami minima systemu dla procedur podejścia nieprecyzyjnego nie mogą być niższe od wartości minimalnej wysokości względnej zniżania (MDH):

- 250 stóp dla systemu ILS bez ścieżki schodzenia (tylko LLZ),
 - 250 stóp dla SRA (kończący się na 1/2 Mm),
 - 300 stóp dla SRA (kończący się na 1 Mm),
 - 350 stóp dla SRA (kończący się na 2 Mm),
 - 300 stóp dla RNAV/LNAV,
 - 300 stóp dla VOR,
 - 250 stóp dla VOR/DME,
 - 350 stóp dla NDB,
 - 300 stóp dla NDB/DME.
- podejścia precyzyjne (PA – precision approach procedure).

PA to procedura podejścia według wskazań przyrządów, w której wykorzystuje się precyzyjne prowadzenie: poziome i pionowe oraz minima określone dla kategorii operacji. Prowadzenia poziome i pionowe odnoszą się do prowadzenia zapewnianego przez:

- a) naziemne pomoce nawigacyjne,
- b) komputerowe dane nawigacyjne.



Rys. 7. Approach Radar

Dodatkowo podejścia precyzyjne dzieli się na:

- operacje w kategorii I.
Operacją w kategorii I jest podejście precyzyjne według wskazań przyrządów i lądowanie przy użyciu ILS, MLS lub PAR z wysokością względną decyzji (DH) nie niższą niż 200 stóp oraz RVR nie mniejszą niż 550 m.
- Operacje w kategorii II.
Operacją w kategorii II jest podejście precyzyjne według wskazań przyrządów i lądowanie przy użyciu ILS lub MLS, kiedy:
 - wysokość decyzji jest mniejsza niż 200 stóp, ale nie mniejsza niż 100 stóp;
 - RVR jest nie mniejsza niż 300 m.
- Operacje w kategorii III.
Dzieli się one na:
 - operacje w kategorii IIIA, czyli operacje podejścia precyzyjnego i lądowania według wskazań przyrządów z użyciem ILS lub MLS w warunkach, kiedy:
 - wysokość decyzji (DH) jest niższa niż 100 stóp,
 - RVR jest nie mniejsza niż 200 m;
 - operacje w kategorii IIIB. Operacje podejścia precyzyjnego i lądowania według wskazań przyrządów z użyciem ILS lub MLS w warunkach, kiedy:
 - wysokość decyzji (DH) jest niższa niż 50 stóp lub nie jest określona,
 - RVR jest mniejsza niż 200 m, ale nie mniejsza niż 75 m.
- Podejścia z prowadzeniem pionowym (APV - approach procedure with vertical guidance).
APV to procedura podejścia według wskazań przyrządów, w której wykorzystuje się prowadzenie: poziome i pionowe, ale która nie spełnia wymagań precyzyjnego podejścia do lądowania, z wysokością decyzji nie niższą niż 250 stóp oraz widzialnością wzdłuż drogi startowej nie mniejszą niż 600 m, z wyjątkiem odstępstw zatwierdzonych przez organ.

W związku z tym, że procedury podejścia do lądowania według wskazań przyrządów są jednymi z trudniejszych do wykonania elementami lotu i wymagają od pilotów profesjonalnego działania, które nie zawsze kończy się lądowaniem na lotnisku docelowym, ze względu na ograniczenia pomocy nawigacyjnych, należy poszukiwać i doskonalić stosowane procedury m.in. poprzez próby wdrażania nowoczesnych technologii i osiągnięć naukowych szczególnie w zakresie technik satelitarnych.

Aktualnie wykorzystywane na lotniskach cywilnych procedury podejścia do lądowania RNAV GNSS do minimum LNAV opartych na nawigacji satelitarnej (sensor GNSS).

Procedury podejścia do lądowania NPA RNAV (GNSS) są zgodne z obowiązującą koncepcją PBN (Performance Based Navigation) w specyfikacji nawigacyjnej RNP APCH na polskich lotniskach. Następnie planowane jest opracowanie i wdrożenie procedur podejścia do lądowania z prowadzeniem pionowym (procedury APV – Approach with Vertical Guidance), które obejmują dwa typy podejścia: z tzw. sensorem barometrycznym (RNP APCH LNAV/VNAV (APV Baro), gdzie prowadzenie w pionie jest zapewniane przez sprzężony z FMS wysokościomierz barometryczny oraz podejścia GNSS wspomagane SBAS (EGNOS), gdzie prowadzenie w pionie jest zapewniane przez system satelitarny (RNP APCH LPV (APV SBAS).

6. WNIOSKI

Konkludując aktualnie użytkowane urządzenia i systemy nawigacyjne stanowią spójny system, wzajemnie się uzupełniający, który zapewnia bezpieczne wykonywanie lotów. Analizując stronę ekonomiczną i rosnące możliwości systemów satelitarnych wydają się one być systemami przyszłościowymi. Już teraz, pomimo że satelitarne procedury podejść do lądowania mają porównywalne parametry są tylko podejściami nieprecyzyjnymi, co jednoznacznie wskazuje, że potencjał technik satelitarnych jest wykorzystany tylko częściowo. Tym samym taki stan rzeczy wyznacza kierunki działań, obejmujące zastosowanie systemów satelitarnych co najmniej do podejść precyzyjnych trzeciej kategorii.

References

1. Bilski J., Z. Polak, A. Rypulak. 1999. *Awionika, przyrządy i systemy pokładowe*. [In Polish: *Avionics, instruments and onboard systems*]. Dęblin: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych.
2. Ćwiklak J. 2002. *Wykorzystanie techniki satelitarnej w kontroli ruchu lotniczego w przestrzeni powietrznej RP*. [In Polish *The use of satellite technology in air traffic control in the Polish airspace*]. Olsztyn: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski.
3. Lamparski J. 2001. *NAVSTAR GPS od teorii do praktyki*. [In Polish: *NAVSTAR GPS from theory to practice*]. Olsztyn: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski.
4. Narkiewicz J. 1999. *Podstawy układów nawigacyjnych*. [In Polish: *Fundamentals of navigation*]. Warszawa: WKŁ.
5. Parkinson W., J. Spilker. 1996. *Global Positioning System. Theory and applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
6. *Systemy i pomoce nawigacyjne zalecane przez European Radionavigation Plan ICAO/NATO. Poradnik dla personelu latającego i naziemnego*. [In Polish: *Systems and navigational aids recommended by the European Radio Navigation Plan ICAO / NATO. Guidance for flight crew and ground*]. 2002. Poznań.
7. Ćwiklak J., A. Fellner, H. Jaferník, K. Kusek, R. Fellner. 2014. *Wykonywanie lotów według IFR*. [In Polish: *Flying under IFR*]. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

Received 02.07.2015; accepted in revised form 25.09.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License