

Krzysztof BANASZEK¹, Marek MALARSKI²

¹ Polska Agencja Żeglugi Powietrznej
ul. Wieżowa 8, 02-147 Warszawa
k.banaszek@pansa.pl

² Politechnika Warszawska, Wydział Transportu
Zakład Inżynierii Transportu Lotniczego
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
mma@it.pw.edu.pl

DOKŁADNOŚĆ POZYCJONOWANIA WSPÓŁCZESNYCH SYSTEMÓW NAWIGACJI SATELITARNEJ A PRZEPUSTOWOŚĆ PORTÓW LOTNICZYCH

Streszczenie:

W grudniu 2009 roku w rejonie lotniska Warszawa Okęcie wprowadzono precyzyjną nawigację obszarową o dokładności ± 1 mila morska (± 1852 m). W pracy analizowany jest problemem jak wprowadzenie nowych metod pozycjonowania i nawigacji w rejonie portów lotniczych wpływa na przepustowość i bezpieczeństwo operacji lotniczych. Podstawowym parametrem oceny nawigacyjnej portu lotniczego i jego rejonu jest przepustowość dla operacji lotniczych startu i lądowania. Do wyznaczenia wpływu zmiany sposobu nawigacji na przepustowość portu lotniczego opracowano uproszczony model operacyjny rejonu portu lotniczego.

Słowa kluczowe: ruch lotniczy, przepustowość portów lotniczych, nawigacja satelitarna

WPROWADZENIE

Nawigacja satelitarna jest działem nawigacji wykorzystującym sygnały nawigacyjne ze sztucznych satelitów umieszczonych na orbitach okołozemskich. Sygnały te są wykorzystywane głównie do określenia położenia odbiornika. Aktualnie podstawowe systemy nawigacji satelitarnej to: GPS NAVSTAR i GLONAS, w opracowaniu i budowie są systemy GALILEO i BAIDOU.

1. SYSTEM NAWIGACJI SATELITARNEJ GPS NAVSTAR

GPS (*Global Positioning System*) **NAVSTAR** (*Navigation Satellite Time and Ranging*) jest nawigacyjnym satelitarnym systemem pozycjonowania i koordynacji czasu kontrolowanym przez armię USA. Pierwszy satelita systemu został umieszczony na orbicie w 1978 r. Z czasem system wielokrotnie był modernizowany. System umożliwia dokładne określenie pozycji (pozycjonowanie), ale także czasu z dokładnością do 10^{-9} w standardzie UTC (*Universal Time Coordinated*). Na system GPS NAVSTAR składają segment satelitarny, kontroli i użytkownika:

- segment satelitarny składa się z 24 satelitów rozmieszczonych na sześciu orbitach, co pozwala na odbiór sygnału z 5 - 12 satelitów z każdego punktu kuli ziemskiej, dodatkowo kilka satelitów służy do zastąpienia innego satelity w przypadku jego awarii,

- segment kontrolny składa się z szeregu naziemnych stacji monitorujących pracę satelitów w celu utrzymania ich w pełnej sprawności technicznej i funkcjonalnej,
- segment użytkownika to odbiorniki GPS, przetwarzające sygnały z satelitów na współrzędne położenia, obliczające prędkość, czas itp.

Na segment naziemny (kontrolny) składają się:

- główna stacja kontrolna,
- stacje monitorujące,
- radiowe stacje nadawcze.

Główna stacja kontrolna MCS (*Master Control Station*) jest odpowiedzialna za sterowanie i koordynowanie całego systemu. W systemie GPS stacja ta znajduje się w bazie wojskowej Colorado Springs w USA. Otrzymuje ona ze stacji monitorujących dane dotyczące funkcjonowania każdego z satelitów i na ich podstawie określa niezgodności pomiędzy stanem aktualnym, a stanem właściwym. Głównym zadaniem jest wyliczanie błędów w położeniu i trajektorii lotu satelitów (efemerydy) i określanie niedokładności zegara każdego z satelitów. Następnie poprzez naziemne systemy nadawcze wysyłane są depeze korygujące położenie i zegar satelitów. Depesze te wysyłane są co 14 dni, chyba że błąd położenia satelity wynosi więcej niż 6 m, a błąd zegara więcej niż 97 ns. Główna stacja kontrolna ma również za zadanie kontrolowanie sprawności technicznej poszczególnych satelitów i w razie potrzeby wyłączenie z systemu danego satelity, bądź inne rozwiązanie problemu. System naziemny uzupełniony jest przez stacje monitorujące i radiowe systemy nadawcze.

Segmentem użytkownika są wszelkiego rodzaju odbiorniki. W ruchu lotniczym dane z GPS wykorzystane są do określenia pozycji statku powietrznego. W przypadku systemów lądowania i precyzyjnego podejścia, dane pochodzące z GPS mogą być zobrazowane dokładnie jak w przypadku systemów ILS, MLS. Odległość mierzona jest dzięki dokładnemu pomiarowi czasu, w jakim sygnał radiowy dociera od nadajnika do odbiornika. Pomiar ten obarczony jest wieloma błędami – nazwany więc został pseudoodległością. Rozwiązaniem w odbiorniku odpowiedniego układu czterech równań wyznacza współrzędne położenia odbiornika, a czwartą niewiadomą jest błąd zegara, wyliczany na potrzeby przekształcenia pseudoodległości w odległość rzeczywistą.

GPS i inne systemy satelitarne charakteryzują się pewną niedokładnością pomiarów. Błędy te mają różne źródła a ich wpływ na pomiar został sklasyfikowany i oszacowany. Błędy pomiarów dzielą się na:

- błędy efemeryd satelitów - to różnica pomiędzy położeniem satelity wyliczonym z danych orbitalnych a rzeczywistym, powodowane są grawitacją Słońca i Księżyca, a także wiatrem słonecznym, poprawki różnicowe eliminują ten błąd całkowicie,
- błędy zegara satelity,
- błędy odbiornika - błędy pomiaru i obliczania pozycji, wynikają z dokładności oprogramowania lub zakłóceń,
- błędy jonosferyczne – wywołane opóźnieniem fal radiowych, są większe w dzień a mniejsze w nocy,
- błędy troposferyczne – powstają w dolnych warstwach atmosfery i są zależne od temperatury, ciśnienia i wilgotności,
- błędy wielodrogowości - praktycznie niemożliwe do skompensowania, ograniczane przez odpowiednią konstrukcję anten.

W celu eliminacji tych błędów wstępne oszacowanie wyznaczonej pozycji uzyskujemy przez iloczyn wartości informacji wyliczonej z sygnałów satelitarnych - estymowanego odchylenia standardowego pomiaru odległości UERE (*User Estimate Range Error*) poprzez

odpowiedni współczynnik geometryczny dokładności systemu pozycjonowania DOP (*Dilution Of Precision*) – rozmycie precyzji, współczynnik błędów wzajemnego ustawienia satelitów.

Tablica 1. Średnie błędy w dokładności uzyskiwanej pozycji dzięki GPS

źródło błędu	błąd [m]
efemerydy	2,1
zegar	2,1
opóźnienie jonosferyczne	4,0
opóźnienie troposferyczne	0,7
odbicia	1,4
odbiornik	0,5

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem [10]

Wszystkie odbiorniki GPS mają taką samą zasadę działania. Różnią się jedynie cechami użytkowymi w zależności od wymagań środowiska, w jakim mają pracować, możliwościami pomiarów czy odpornością na zakłócenia. Zasadniczą różnicą między odbiornikami jest ich możliwość uzyskania większej lub mniejszej dokładności pomiaru.

2. SYSTEM NAWIGACJI SATELITARNEJ GLONAS

System GLONASS (*Globalnaja Nawigacionnaja Sputnikowaja Sistiema*) jest rosyjskim (dawniej radzieckim) systemem pozycjonowania i nawigacji. Pierwszy satelita zostały umieszczone na orbicie w roku 1982. Po kłopotach z dokładnością pozycjonowania a później trudnościami gospodarczymi system był kilkakrotnie modernizowany. Aktualnie system dochodzi do pełnego pokrycia powierzchni ziemi zasięgiem odpowiedniej liczby satelitów. System GLONAS składa się również z trzech segmentów: kosmicznego, naziemnego i użytkownika (porównanie w tab. 2).

Segment kosmiczny systemu GLONASS składa się z 21 satelitów, nadających na różnych częstotliwościach, umieszczonych na 3 orbitach – po siedem na każdej.

Tablica 2. Porównanie segmentu kosmicznego GPS NAVSTAR i GLONASS

Parametr	GPS NAVSTAR	GLONASS	Beidou-2	GALILEO
liczba satelitów	24	21	27	30
liczba orbit	6	3		3
wysokość	20 200 km	19 100 km	21 450 km	23 616 km
kąt inklinacji	55°	65°	55°	56°
standardowa dokładność	ok. 10 m	ok. 20 m	ok. 5 m	ok. 3 m
liczba częstotliwości	1*3	24*3		1*10
układ odniesienia	WGS 84	SGS 85		WGS 84
czas okrążenia Ziemi	11:58	11:15	12,8	
metoda kodowania	CDMA	FDMA	aktywny	CDMA
transmisja danych	50 bitów/s	50 bitów/s		

Źródło: opracowanie własne

Segment naziemny GLONASS to stacje monitorujące. Główna stacja znajduje się w Moskwie. System GLONASS działa na zasadzie pomiaru czasu i przeliczaniu danych na współrzędne położenia. Tak jak w przypadku systemu GPS, występują różne poziomy dostępności.

System wykorzystuje technikę dostępu wielokrotnego z podziałem częstotliwości FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*) – każdy z satelitów nadaje z określoną, inną

częstotliwością, natomiast nadawany kod jest taki sam. Depeszy nawigacyjna systemu GLONASS składa się z:

- danych efemerydalnych,
- przesunięć czasowych pomiędzy czasem GLONASS a UTC,
- almanachu.

Efemerydy są odniesione do systemu geodezyjnego SGS 85 (oznaczanego również PE-90). Transmitowane są ich zakodowane koordynaty o położeniu w trzech wymiarach a także ich pierwsza i druga pochodna. Almanach zawiera dane o orbitach, skali czasu i o statusie satelity (sprawny/niesprawny).

3. SYSTEM NAWIGACJI SATELITARNEJ GALILEO

GALILEO będzie międzynarodowym, europejskim systemem w pełni cywilnym. Podobnie jak inne systemy nawigacji satelitarnej będzie składać się z trzech segmentów globalnych: kosmicznego, naziemnego i użytkownika.

Globalny segment kosmiczny docelowo ma składać się z 27 satelitów operacyjnych umieszczonych na trzech orbitach nachylonych pod kątem 56° względem płaszczyzny równika. Ma to zapewnić największą dostępność segmentu oraz optymalną dokładność pionową. Dodatkowe 3 satelity mają spełniać rolę satelitów zapasowych, które będą zastępować satelity operacyjne w przypadku usterki.

Globalny segment naziemny systemu GALILEO składać się będzie z dwóch części:

- segmentu kontroli misji systemu MCS (*Mission Control System*),
- segmentu kontroli satelitów GCS (*Ground Control System*)

GCS będzie odpowiadał za utrzymanie konstelacji i kontrolowanie stanu technicznego wszystkich satelitów oraz opracowywanie strategii ich napraw a także ciągłe zarządzanie systemem w celu jego prawidłowego działania. Natomiast do zadań MCS będzie należała konserwacja serwisów oferowanych przez system, monitorowanie jego funkcjonowania, analizowanie sygnałów emitowanych przez satelity a także rozprzestrzenianie danych systemu.

Segment GCS fizycznie tworzyć będzie 15 telemetrycznych stacji nadawczo-odbiorczych TT&C (*Telemetry, Telecommand & Tracking Station*), natomiast MCS składać się będzie z 20 stacji monitorujących GSS (*Ground Sensor Station*). Ich rozmieszczenie będzie wymagało monitorowania jednego satelity, przez co najmniej pięć takich stacji. Stacje te, będą dystrybuować odebrane z satelitów sygnały do dwóch głównych stacji kontrolnych GCC (*Galileo Control Center*).

Segment użytkownika systemu Galileo utworzą odbiorniki nie różniące się od odbiorników GPS / GLONASS.

Oprócz segmentów **globalnych** w systemie GALILEO przewidziane są segmenty **regionalne** – złożone z Zewnętrznych Regionalnych Systemów Oceny Wiarygodności ERIS (*External Region Integrity Systems*) tworzone i zarządzane przez kraje uczestniczące w budowie systemu. Dodatkowo przewidziane są również **lokalne** segmenty systemu GALILEO – stanowiący uzupełnienie systemu regionalnego o lokalne elementy kontrolne tworzone dla konkretnych aplikacji nawigacyjnych. Dzięki tak otwartej konfiguracji system Galileo będzie mógł w prosty sposób rozszerzać listę oferowanych usług.

Zasada działania systemu Galileo jest taka sama jak systemu GPS. Użytkownik odbiera sygnały z wielu satelitów, których położenie jest znane, porównuje te sygnały i na tej podstawie oblicza własne położenie. Każdy satelita stale wysyła sygnał zawierający dane

o swoim położeniu oraz o dokładnym czasie transmisji. System ma pracować na podobnych częstotliwościach jak GPS i GLONAS a jego moc wyjściowa będzie tak dobrana, aby nie zakłócał on działania naziemnych systemów nawigacji lotniczej.

System Galileo podobnie jak pozostałe systemy satelitarne można uzupełnić o dodatkowe systemy wspomagające umożliwiające obliczanie i przesyłanie różnicowych danych korekcyjnych co umożliwi zwiększenie dokładności do ok. 1m.

Usługi nawigacyjne systemu GALILEO

System GALILEO będzie oferował użytkownikom pięć rodzajów usług:

- serwis otwarty - serwis wolnego dostępu OAS (*Open Access Service*) - będzie najprostszym i bezpłatnie oferowanym serwisem; umożliwi odbiór sygnału do ogólnoswiatowego określenia pozycji, prędkości i czasu na poziomie podstawowym (tablica 3),

Tablica 3. Parametry jakościowe usługi otwartej

		serwis otwarty (wyznaczanie pozycji)		
		jedna częstotliwość sygnału		2 częstotliwości (E1 i E5a lub A5b)
rodzaj/typ odbiornika	sygnał nośny	E1	E5a / E5b	
	podawanie wiarygodności	Nie		
	poprawka jonosferyczna	wypracowana z modelu prostego (1 częstotliwość)		wypracowana z 2 częstotliwości
zasięg		globalny		
dokładność (95%)		poziomo: 15m pionowo :35m	poziom: 24m pionwo:50m	poziomo: 4m pionowo: 8m
wiarygodność	próg alarmu	nie dotyczy		
	opóźnienie alarmu			
	ryzyko wiarygodności			
dostępność		99,5%		

Źródło: opracowanie własne

- serwis komercyjny – serwis kontrolowanego dostępu CAS (*Controlled Access Services*) – umożliwi odbiór sygnałów na poziomie precyzyjnym, z gwarancją dokładności i osiągalności, z funkcją alarmową - informującą o niesprawności systemu i niedokładności pomiaru; serwis ten będzie zabezpieczony i płatny (tablica 4),

Tablica 4. Parametry jakościowe usługi komercyjnej

	usługa handlowa
zasięg	globalne
dostępność	99,8%
dokładność określania pozycji (95%) (odbiornik dwuczestotliwościowy)	< 1 m
usługa wiarygodności	tak

Źródło: opracowanie własne

- serwis publiczny o regulowanym dostępie (*Public Regulated service*) – będzie serwisem kontrolowanego dostępu (kodowany) dla państw Unii Europejskiej, który umożliwi odbiór sygnału na poziomie precyzyjnym z ciągłością usługi, na potrzeby wojska, policji, ratownictwa i innych służb publicznych bez opłat; serwis będzie certyfikowany zgodnie z wymogami obowiązującymi w zależności od rodzaju transportu: ICAO – transport lotniczy, IMO – transport morski, dokładność pozycji w płaszczyźnie poziomej ok. 6,5

m, w pionie ok. 12 m a dokładność określenia czasu od 10 do 100 ns, system ten będzie też odporny na zagłuszanie i przypadkowe zakłócenia,

- serwis bezpieczeństwa życia SoL (*Safety of Life service*) – serwis dużej dokładności mający na celu podniesienie poziomu bezpieczeństwa, serwis będzie bezpłatny i będzie miał gwarancję, korzystać z niego będą certyfikowani użytkownicy; przewidziano dwa poziomy dokładności:
 - krytyczny – znajdzie zastosowanie w lotnictwie, a w szczególności w operacjach związanych z lądowaniem; dokładność pozycji w płaszczyźnie poziomej wyniesie 4 m a w pionie 8m,
 - niekrytyczny – znajdzie zastosowanie w operacjach mniej zagrożonych,
- uczestniczenie w akcjach Poszukiwania i Ratownictwa SAR (*Search and Rescue Support service*) – serwis dostępny na poziomie precyzyjnym dla zadań systemów ratownictwa, serwis SAR oparty będzie na międzynarodowym satelitarnym systemie ratownictwa lądowego, powietrznego i morskiego COSPAS-SARSAT (*Cosmicheskaya Sistema Poiska Avariynich Sudov – Search and Rescue Satellite-Aided Tracking*) przez wykrywanie sygnałów alarmowych i wysyłanie sygnałów zwrotnych.

Usługa bezpieczeństwa życia. Serwis powinien zapewniać bezpieczeństwo, zwłaszcza przy pewnych zastosowaniach, takich jak żegluga morska i powietrzna oraz transport kolejowy, których zadania i funkcjonowanie wymagają ściśle określonych, rygorystycznych norm. Serwis ten powinien zapewniać globalnie wysoką jakość, zaspokajającą potrzeby użytkowników w zakresie bezpieczeństwa, zwłaszcza na obszarach pozbawionych tradycyjnych naziemnych systemów wspomagających. Zwartość serwisu powinna zapewnić wzrost skuteczności firm prowadzących działalność globalną, przykładowo przewoźników lotniczych. Głównym celem tego serwisu ma być zwiększenie możliwości otrzymywania informacji o złym funkcjonowaniu (wiarygodność). Serwis bezpieczeństwa życia powinien mieć charakter globalny, posiadający wartości przewidywane zawarte w tab. 5.

Tablica 5. Parametry jakościowe usługi bezpieczeństwa życia

typ odbiornika		serwis bezpieczeństwa życia		
		dwie częstotliwości		
nośnik		tak		
podawanie wiarygodności		tak		
poprawka jonosferyczna		pomiar dwu częstotliwości		
zasięg		globalny		
poziom dokładności serwisu		A	B	C
dokładność (95%)		poziom: 4m pion: 4m	poziom: 220m	poziom: 10m
wiarygodność	próg alarmu	poziom: 40m pion: 35m	poziom: 556m	poziom: 25m
	opóźnienie alarmu	6 s	10 s	10 s
	ryzyko wiarygodności	$2 \cdot 10^{-7} / 150$ s	$10^{-7} / \text{h}$	$10^{-5} / 3$ h
ciągłość		$8 \cdot 10^{-6} / 15$ s	$10^{-4} / \text{h TBD}$	$3 \cdot 10^{-4} / 3$ h
certyfikacja		tak		
osiągalność usługi wiarygodności		99,5%		
dokładność		99,5%		

Źródło: opracowanie własne

System GALILEO ma być powiązany z Międzynarodowym Przestrzennym Układem Odniesienia ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) oraz Uniwersalnym Czasem Skoordynowanym UTC (*Universal Time Coordinated*). System Galileo będzie emitował 10 sygnałów nawigacyjnych o technice dostępu CDMA (*Code Division Multiple Access*). Technika ta stosowana jest również w systemie GPS, polega na wykorzystywaniu tego

samego pasma częstotliwości przez wszystkie satelity. Podstawową różnicą dzielącą go od pozostałych systemów satelitarnych jest to, że budowany jest jako system o przeznaczeniu cywilnym, który ma być obsługiwany przez operatora prywatnego na zasadach komercyjnych. Część usług będzie odpłatna i dostępna po uzyskaniu licencji. Na precyzyjne usługi nawigacyjne będzie udzielana gwarancja, co pozwoli na pełną certyfikację usług.

System Galileo ze względu na wykorzystywanie znacznie większej ilości pasm częstotliwości fal radiowych oraz naziemnych (GBAS) i satelitarnych (SBAS) układów wspomagających będzie w stanie zaoferować znacznie większą gamę usług niż GPS, między innymi precyzyjne lądowanie. Odbiorniki systemu Galileo lub odbiorniki mogące korzystać między innymi z tego systemu, będące nawet w minimalnym stopniu dostosowane do funkcji i wymagań, powinny być w stanie osiągnąć określone wartości parametrów użytkowych nawet w warunkach celowych zakłóceń, nadzwyczajnego nakładania się sygnałów, nadzwyczajnej aktywności troposferycznej lub jonosferycznej i przy zjawisku wielodrożności.

Dodatkowym atutem tego systemu będzie funkcja kontroli wiarygodności, której system GPS NAVSTAR nie posiada. Jest ona szczególnie istotna właśnie w nawigacji lotniczej gdzie niezbędna jest ciągła informacja, że system działa prawidłowo.

4. SATELITARNY EUROPEJSKI RÓŻNICOWY SYSTEM WSPOMAGAJĄCY EGNOS

Uzupełnieniem systemów globalnej nawigacji satelitarnej GPS są **różnicowe system pozycjonowania DGPS** (*Differential GPS*) zwiększające dokładność pozycjonowania. Systemy wspomagające (*augmentation systems*) powstały w celu zwiększenia dokładności pozycjonowania przez kompensację anomalii propagacji sygnałów w atmosferze i ich chwilowych zakłóceń. Uzyskuje się to wyznaczając różnicę, pomiędzy rzeczywistą a pomierzoną wartością tej samej pozycji - poprawkę różnicową. Wielkość tej różnicy (wielkości błędu pomiaru), jest w określonej przestrzeni stała. Wielkość poprawki wyznaczają różnicowe stacje referencyjne komunikujące się z systemem pokładowym. Technika różnicowa pozwala usunąć większą część błędów występujących poza odbiornikami nawigacji satelitarnej GPS.

Praktycznie użytkowane systemy różnicowe pracują w czasie rzeczywistym - wprowadzając do odbiornika drogą radiową poprawki, dostarczane przez równoległe pracujący odbiornik bazowy o znanych współrzędnych anteny. Wyróżniamy rodzaje systemów wspomagających:

- wspomagające systemy satelitarne (różnicowe) bazujące na wyposażeniu satelitarnym SBAS (*Satellite / Space Based Augmenting Systems*) – system wykorzystujący dodatkowe satelity (zwykle geostacjonarne) i sieć stacji naziemnych,
- systemy naziemne GBAS (*Ground Based Augmenting Systems*) - poprawki przesyłane są do odbiornika przez nadajniki (naziemne stacje korekcyjne – pseudo-satelity) znajdujące się w niewielkiej odległości,
- systemy pokładowe ABAS (*Aircraft Based Augmenting Systems*) - system umieszczony na statku powietrznym, którego zadaniem jest integracja informacji otrzymanych z systemów nawigacji satelitarnej z informacjami z innych nawigacyjnych urządzeń pokładowych.

Satelitarne systemy wspomagające (różnicowe) **SBAS** (*Satellite Based Augmentation System*) obejmują swym działaniem znaczne obszary. Zasada działania SBAS polega na odbieraniu sygnałów GPS (w przyszłości GNSS), przez naziemne stacje referencyjne. Stacje referencyjne mają precyzyjnie ustalone swoje położenie, które umożliwia obliczenie błędu

pomiaru. Wyliczony błąd pomiaru wysyłany jest do głównej stacji referencyjnej, gdzie generowana jest poprawka różnicowa. Z głównej stacji referencyjnej, poprawka ta jest przesyłana przez stacje nadawcze do satelitów geostacjonarnych. Satelity te wysyłają sygnał do segmentu użytkownika, który uwzględnia tą poprawkę różnicową w kalkulacji swojej pozycji. W aplikacjach lotniczych przy transmisjach telemetrycznych dla precyzyjnego podejścia do lądowania stosujemy format RTCA "Special Cat-I". Charakteryzuje się on znacznym zabezpieczeniem danych przed uszkodzeniem poprzez transmisje bitów nadmiarowych. W przypadku europejskiego systemu EGNOS wykorzystano tu istniejące geostacjonarne satelity: INMARSAT i ARTEMIS, poprzez wykorzystanie odpowiednich transponderów. Zgodnie z wymogami ICAO systemy przeznaczone dla ruchu lotniczego powinny zapewniać poprawki zwiększające dokładność wyznaczenia pozycji a także wiarygodność systemów nawigacji satelitarnej oraz systemów wspomagających. Systemy SBAS składają się z:

- sieci naziemnych stacji referencyjnych, odbierających i monitorujących sygnały satelitów,
- stacji głównych zbierających i przetwarzających dane ze stacji referencyjnych oraz tworzących informacje przeznaczone dla użytkowników,
- satelitów geostacjonarnych przekazujących informacje od stacji głównych SBAS do odbiorników użytkowników.

Dzięki dokładności nawigacyjnej uzyskiwanej przez urządzenia korzystające z SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) na pokładach statków powietrznych możliwe jest:

- używanie jednego systemu nawigacyjnego w różnych segmentach lotu, aż do lądowania w CAT I, w przyszłości nawet do CAT II,
- w przyszłości może zastąpić wszystkie nawigacyjne urządzenia trasowe, takie jak VOR, NDB, DME, ponieważ określa pozycję statku powietrznego dokładniej jak one, a jest tańszy w eksploatacji,
- obniżenie separacji pomiędzy samolotami, a więc zwiększenie przepustowości przestrzeni powietrznej,
- zaprojektowanie instrumentalnych procedur lotu dla każdego lotniska objętego zasięgiem systemu,
- w przyszłości technologia satelitarna pozwoli na częściowe wyeliminowanie tras lotniczych.

Aktualnie funkcjonuje lub rozpoczyna funkcjonować kilka satelitarnych systemów wspomagania SBAS (*Satellite Based Augmentation System*). Są to przykładowo:

- amerykański różnicowy system wspomagania o dużym zasięgu WAAS (*Wide Area Augmentation System*) – na terenie Ameryki PN,
- europejski geostacjonarny serwis nawigacyjny EGNOS (*European Geostationary Overlay System*) – na terenie Europy,
- japoński wielofunkcyjny satelitarny system wspomagania MSAS (*Multi-mission Satellite Augmentation System*),
- indyjski nawigacyjny system wspomagający GPS i GEO GAGAN (*GPS Aide Geo Augmented Navigation*),
- chiński satelitarny wspomagający system nawigacyjny SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*).

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) jest europejskim geostacjonarnym serwisem nawigacyjnym, wykorzystującym technikę SBAS dla satelitów nawigacyjnych GPS NAVSTAR i GLONASS a w przyszłości GALILEO. Głównym

obszarem działania systemu EGNOS jest terytorium Europy, ale sięga dużo dalej. Segment kosmiczny systemu EGNOS składa się z trzech satelitów geostacjonarnych:

- INMARSAT 3 (PRN120) – 15,5° W
- INMARSAT 4 (PRN126) - 25° E
- ARTEMIS (PRN124) – 21,5° E

Satelity te wysyłają poprawki nawigacyjne, informacje o dokładności ich zegarów atomowych oraz informowanie o wszelkich awariach systemu satelitarnego. Rozmieszczenie satelitów gwarantuje potrójne pokrycie sygnałem kontynentu europejskiego. W latach 2011-13 system zostanie uzupełniony o dwa dodatkowe satelity ASTRA. Jest to szczególnie istotne w przypadku awarii któregoś z satelitów.

Segment naziemny systemu EGNOS składa się z czterech rodzajów stacji, umieszczonych na terenie całego świata, głównie w Europie:

- 34 stacje monitorowania odległości i integralności RIMS (*Range and Integrity Monitoring Stations*),
- 4 główne centra sterowania MCC (*Master Control Station*),
- 6 naziemnych stacji transmisyjnych NLES (*Navigation Land Earth Station*), po 2 dla każdego satelity,
- 2 stacje kontrolno - testowe.

Do transferu danych i informacji, została zaprojektowana dedykowana rozległa sieć telekomunikacyjna EWAN (*EGNOS Wide Area Network*).

Stacje **RIMS** (*Range and Integrity Monitoring Stations*) śledzą i monitorują konstelacje satelitów GNSS, oraz satelitów geostacjonarnych. Prowadzą pomiary metodą fazową i kodową, koordynują zegary satelitów. Stacje RIMS:

- dostarczają poprawki zegara,
- określają zgodności i rozbieżności sygnałów nawigacyjnych i wzorca czasu,
- wykrywają pojawiające się anomalie sygnału GPS.

Wśród stacji tych znajduje się stacja umieszczona w Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Główne centra sterowania **MCC** (*Master Control Station*) wypracowują poprawki różnicowe z monitorowania stanu systemu GNSS poprzez stacje RIMS. Stacja centralna MCC określa błąd zegara i efemeryd, modeluje błąd jonosferyczny w czasie rzeczywistym i estymuje jego wielkość w danym regionie. Centra MCC koordynują i sterują działaniem całego systemu, wypracowując działania reagujące na nieprawidłowości wykryte przez stacje RIMS. W stacji MCC wyróżniamy:

- centrum kontrolne CCF (*Central Control Facility*),
- centrum przetwarzania CPF (*Central Processing Facility*).

Centrum kontrolne **CCF** odpowiada za sterowanie segmentem naziemnym, w momentach niespodziewanych i kryzysowych, archiwizuje dane, analizuje błędy, w celu przeciwdziałania im w przyszłości. Centrum Kontrolne odpowiada też za szeroko pojętą ocenę działania całego systemu, oraz poszczególnych jego elementów.

Centrum przetwarzania **CPF** odpowiada za funkcjonowanie systemu w czasie rzeczywistym. Określa dane o efemerydach i almanachu, synchronizuje czas UTC z czasem EGNOS, weryfikuje integralność systemu, określa poprawki różnicowe, tworzy depesze nawigacyjne i przesyła je do satelitów geostacjonarnych, przez stacje transmisyjne NLES.

Stacji transmisyjne **NLES** (*Navigation Land Earth Station*) w systemie EGNOS jest sześć, po dwie przypisane są do jednego satelity. Jedna działa jako stacja podstawa, natomiast druga jako rezerwowa (gorąca rezerwa). Transmitują one do satelitów geostacjonarnych

wygenerowaną w MCC poprawkę różnicową. Dodatkową pełnioną przez nie funkcją jest synchronizacja czasu systemu EGNOS oraz kontrola spójności kodowej i fazowej.

EGNOS to system wspomagający obecnie funkcjonujące systemy GPS NAVSTAR i GLONASS.

Głównym użytkownikiem systemu EGNOS jest sektor usług transportowych. Może być wykorzystywany nie tylko przez transport lotniczy, ale także kolejowy, samochodowy i morski oraz wszędzie tam gdzie znajomość dokładnej pozycji może przyczynić się do poprawy jakości oferowanych usług i podniesienia bezpieczeństwa. Jednak głównym obszarem działania jest transport lotniczy. Na pokładzie samolotu za integrację wskazań oraz ich wizualną prezentację na wyświetlaczach odpowiedzialny jest system zarządzania lotem FMS (*Flight Management System*).

Dodatkową funkcjonalnością systemu EGNOS poza dokładnym wyznaczaniem pozycji jest możliwość zapewnienia w skali globalnej, stabilnej skali odniesienia czasu. Ta dodatkowa funkcjonalność rozwiąże problem zapewnienia wiarygodnego i maksymalnie dokładnego standardu czasu dla sieci telekomunikacyjnych i komputerowych.

System EGNOS cechują cztery parametry:

- dokładność,
- integralność - zakres poprawności informacji dostarczanych przez system nawigacji oraz dostarczanie użytkownikowi ostrzeżeń o wszystkich nieprawidłowościach funkcjonowania,
- ciągłość - prawdopodobieństwo tego, że wymagana dokładność i kompletność przekazywanych informacji będzie zapewniona dla całej operacji lotniczej, przerwy w działaniu satelitów zgłaszane będą co najmniej 48 godzin wcześniej nie powodując utraty ciągłości,
- dostępność - z jakim prawdopodobieństwem usługa spełniająca wszystkie standardy, będzie dostarczana w sposób ciągły - procent czasu, w którym usługa jest dostępna przez cały okres użytkowania systemu wliczając w to wszystkie przerwy w jego działaniu.

EGNOS udostępni swoim użytkownikom trzy rodzaje **usług**:

- usługa otwarta (*Open service*) – serwis powszechnie dostępny, udostępniany nieodpłatnie (podstawowe parametry w tab. 6), zapewnia użytkownikom dokładny pomiar czasu i pozycji,

Tablica 6. Parametry jakościowe usługi otwartej

	Usługa otwarta
Dokładność pozioma (95%)	3 m
Dokładność pionowa (95%)	4 m
Niezawodność serwisu	0,99
Obszar w zasięgu	EU-27 + Norwegia + Szwajcaria

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem [3]

- usługa bezpieczeństwa życia SoL (*Safety of Life service*) – również udostępniany nieodpłatnie i dostępny powszechnie pod warunkiem posiadania odpowiedniego odbiornika, zapewnia dokładny pomiar czasu i pozycji dając gwarancję ciągłości, dostępności i dokładności odbieranego przez użytkownika sygnału; dodatkowo posiada funkcję integralności pozwalającą na ostrzeżenie użytkowników w przypadku zakłócenia funkcjonowania systemu na obszarze objętym programem (parametry w tab. 7); skierowany jest on do zastosowań gdzie wszelkie nieprawidłowości w działaniu systemu mogą mieć wpływ na ludzkie życie; jego przeznaczenie to głównie nawigacja lotnicza;

Tablica 7. Parametry jakościowe usługi bezpieczeństwa życia

	SoL „Na trasie” (bez precyzyjnego podejścia)	SoL Podejście z prowadzeniem pionowym
Dokładność pozioma	220 m	16 m
Dokładność pionowa	nie dotyczy	20 m
Integralność	$1 \cdot 10^{-7}/h$	$2 \cdot 10^{-7}/150s$
Czas do alarmu	10 s	10 s
Wartość graniczna alarmu poziomego (HAL)	0.3 NM	40 m
Wartość graniczna alarmu pionowego	nie dotyczy	50 m
Ciągłość	$1.10^{-5}/h$	$8.10^{-6}/15 s$
Dostępność usługi	0.999	0.99
Obszar w zasięgu	ECAC	ECAC

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem [3]

- usługa komercyjna (*Commercial service*) – serwis udostępniany odpłatnie, cechuje się zwiększoną dokładnością zapewnianą przez dwa dodatkowe kodowane sygnały.

Usługa bezpieczeństwa życia SoL jest przeznaczona dla większości gałęzi transportu (lotniczy, morski, kolejowy), gdzie życie ludzkie mogłoby być zagrożone, jeżeli wydajność systemu nawigacji spadłaby poniżej określonych limitów bez poinformowania o tym w czasie umożliwiającym podjęcie odpowiednich kroków. Usługa SoL powinna być zgodna z wymaganiami podejście z prowadzeniem w płaszczyźnie pionowej APV-1 (*Approach with Vertical Guidance*), a także wspierać inne aplikacje z zakresu usługi SoL.

Usługa komercyjna pozwoli na rozwój zastosowań profesjonalnych dzięki zwiększonej dokładności, integralności i ciągłości. Ma polegać na dostarczaniu upoważnionym odbiorcom produktów systemu EGNOS dla ich działalności komercyjnej w czasie rzeczywistym. Usługa umożliwi klientom połączenie z serwerem danych systemu EGNOS. Wartość handlowa tych danych wynika z ich przetwarzania przez dostawców dla końcowych użytkowników w szerokim zakresie aplikacji wymagających większej wydajności, charakteryzującej się podwyższoną dokładnością czy integracją informacji (wydajność w tab. 8). Aktualnie testowany jest system dostępu do danych EGNOS w czasie rzeczywistym EDAS (*EGNOS Data Access System*). Jest to system, który będzie dostępny przez Internet. Za pomocą odpowiedniego interfejsu będzie odpowiedzialny za ochronę systemu EGNOS, udostępnianie danych na standardowych formatach, a także będzie umożliwiał łączność z nieograniczoną liczbą użytkowników.

Tab. 8. Parametry jakościowe usługi rozpowszechniania danych komercyjnych

produkt systemu EGNOS	usługa dostarczania danych komercyjnych	
		surowe dane
		baza danych transmisji wiadomości
		dane dotyczące poprawności funkcjonowania
opóźnienie	2 s	
dostępność	99%	

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem [3]

System EGNOS został ukierunkowany głównie potrzeby nawigacji lotniczej. Dołożono jednak starań, aby był on również użyteczny dla szerszego grona odbiorców. W rezultacie usługa SoL (*Safety of Life*) stała się trzonem przy projektowaniu i uruchamianiu systemu. Usługa bezpieczeństwa życia SoL (*Safety of Life service*) udostępniana w systemie EGNOS jest istotna we współczesnej nawigacji lotniczej. Budowa struktury systemu EGNOS została w pełni ukończona. Począwszy od roku 2010 możliwe jest świadczenie usługi SoL zgodnej ze

standardami ICAO. Został także ustanowiony dostawca, który jest certyfikowany do dostarczania usług nawigacyjnych.

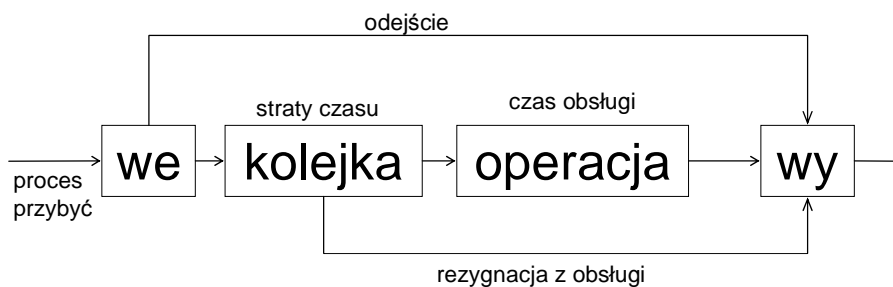
Plany modernizacji współcześnie działającego systemu pozycjonowania satelitarnego mają bezpośredni wpływ na udostępniane przez EGNOS usługi. Z uwagi na te plany Komisja Europejska wskazała na konieczność konsolidacji programowej w odniesieniu do serwisu (usługi) bezpieczeństwa życia SoL (*Safety of Life service*). Plan pracy dążący do uzyskania tego celu został ustalony wspólnie przez Komisję Europejską oraz Europejską Agencję Kosmiczną ESA (*European Space Agency*) na początku 2010 r.

1 kwietnia 2009 roku kontrolę nad systemem EGNOS przejął komercyjny Europejski Dostawca Usług Satelitarnych ESSP (*Europe Satellite Services Provider*). ESSP uruchomił 1.10.2009 r. usługę EGNOS Open Service. Wersja 2.2-ext programu EGNOS zakłada pełną zgodność Wymaganych Charakterystyk Nawigacyjnych RNP (*Required Navigation Performances*) z standardami i zalecanymi praktykami (metodami) postępowania SARPs (*Standards And Recommended Practices*) ICAO. Wyjątek stanowi wymóg ciągłości, dla której wartość prawdopodobieństwa przerwania została zwiększona do $5 \cdot 10^{-4}$ dla operacji APV-1 (w porównaniu do $1-8 \cdot 10^{-6}$ w SARPs ICAO). To ograniczenie w aktualnych osiągnięciach EGNOS nie ma jednak wpływu na korzystanie z usługi, musi jednak być brane pod uwagę przez dostawców usług nawigacji lotniczej w szczególnych przypadkach.

Natomiast docelowa wartość dokładności została zwiększona do poniżej 3 m w poziomie i 4 m w pionie (w SARPs przewidywano odpowiednio 16 i 20 m dla operacji APV-1). W raporcie Europejskiego Dostawcy Usług Satelitarnych [2] ESSP zaprezentowano osiągi systemu od początku kwietnia 2009 do końca marca 2010 roku. Dostępność sygnału w przestrzeni SIS (*Signal In Space*) przez wspomniany rok wyniosła 100%, poza lipcem 2009 r., kiedy wyniosła 99,99%. Wskaźnik ten oznacza pozostawanie przynajmniej jednego satelity w pracy operacyjnej. Dla usługi Open Service dokładność pozioma i pionowa monitorowana była przez 19 stacji RIMS. Każdego dnia przez 95% czasu dokładność systemu była odpowiednio poniżej 3 i 4 m, jedyne odchylenia wystąpiły w Kirkenes oraz Tromsø (Norwegia).

5. SYSTEMY MASOWEJ OBSŁUGI W MODELOWANIU OPERACJI RUCHU LOTNISKOWEGO

Modelowanie operacyjne operacji lotniskowych możliwe jest dzięki wykorzystaniu teorii masowej obsługi. Podstawowy schemat modelu masowej obsługi przedstawiono na rys. 1. Obiekty przybywają do systemu obsługującego (poczekalnia + obsługa) pojedynczo lub w grupach. Chwile przybycia kolejnych obiektów lub grup obiektów do systemu obsługującego mogą być zdeterminowane lub zmienne losowo. Obiekty „wchodzą do poczekalni” lub odchodzą (brak miejsca w poczekalni lub zbyt długa kolejka).



Rys. 1. Schemat modelu obsługi masowej.

Źródło: opracowanie własne.

Proces przybyć jest z reguły procesem losowym (określonym wzorem lub zbiorem realizacji). W szczególnych przypadkach proces przybyć (zgłoszeń) jest zmienną losową (daną wzorem lub zidentyfikowaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa) lub w szczególnych przypadkach może być zdeterminowany.

Proces obsługi jest z reguły też procesem losowym. Jeżeli obsługa posiada kilka równoległych kanałów obsługi (przykładowo kilka równoległych dróg kołowania) to przed każdym kanałem obsługi tworzy się kolejka lub obiekty we wspólnej kolejce oczekują na zwolnienie któregoś ze stanowisk obsługi (kanałów). System może posiadać kanały obsługi nierównoległe, przykładowo mogą być to równoległe drogi startowe o różnej długości – dedykowane do obsługi lądowań samolotów o różnych parametrach.

W praktyce częstym przypadkiem są systemy kolejkowe w sieciach. Mogą wtedy występować rozgałęzienia kanałów obsługi na elementarne stanowiska obsługi. Po zakończeniu obsługi w kilku kanałach może nastąpić połączenie pomiędzy kanałami obsługi. Ogólne zagadnienie transportowe prowadzi często do sieciowych systemów masowej obsługi. Wszystkie systemy obsługi samolotów w operacjach lotniskowych i pasażerów w operacjach obsługi na terenie dworca pasażerskiego prowadzą do mniej lub bardziej rozbudowanych sieciowych systemów masowej obsługi.

Czas wykonania operacji obsługi jest zwykle zmienną losową. Zwykle zakłada się że rozkłady czasów obsługi obiektów na różnych stanowiskach obsługi są losowo niezależne, co często można obserwować w praktyce ruchu lotniskowego. Czasami to założenie nie jest spełnione, wymaga to specjalnego uwzględnienia w modelu. Przykładowo start samolotów wyraźnie wolniejszych (*slow*) blokuje kanał startu na dłużej niż wynikałoby to z samego czasu zajęcia drogi startowej.

Ogólnie system masowej obsługi nazywamy stabilnym, gdy niezależnie od jego stanu początkowego z czasem ustala się jakiś graniczny rozkład prawdopodobieństw możliwych stanów systemu. Z reguły takim parametrem jest czas oczekiwania na obsługę (w kolejce) lub liczba obiektów oczekujących na obsługę. System masowej obsługi jest niestabilny, gdy z dodatnim prawdopodobieństwem długość kolejki rośnie do nieskończoności. Niestabilne są również systemy masowej obsługi, w których prawdopodobieństwa stanów zmieniają się periodycznie w czasie.

Dla zadania analizy lotniczych operacji lotniskowych istotnym celem analizy, z wykorzystaniem modeli masowej obsługi, jest ustalenie pewnego kompromisu pomiędzy jakością obsługi a liczbą obsłużonych obiektów.

Pojedyncze systemy masowej obsługi najczęściej opisuje się klasyfikacją Kendalla. Kendall zaproponował pewną symbolikę opisu proponując zapis

$$X / Y / s \quad (1)$$

gdzie: X – oznacza proces przybyć lub rozkład odstępów pomiędzy zgłoszeniami,
 Y – oznacza rozkład czasów obsługi lub proces obsługi,
 S – oznacza liczbę równoległych kanałów obsługi.

Czasami wykorzystuje się rozszerzoną klasyfikację Kendalla

$$X / Y / s / n \quad (2)$$

gdzie: n – oznacza dodatkowo ograniczenie długości kolejki.

Standardowo pod symbolami X i Y przyjmuje się oznaczenia:

- M – proces Poissona - rozkład wykładniczy odstępów pomiędzy zdarzeniami),
- E_k – proces Palma - rozkład Erlanga o k stopniach swobody odstępów pomiędzy zdarzeniami,
- D – stałe odstępów,

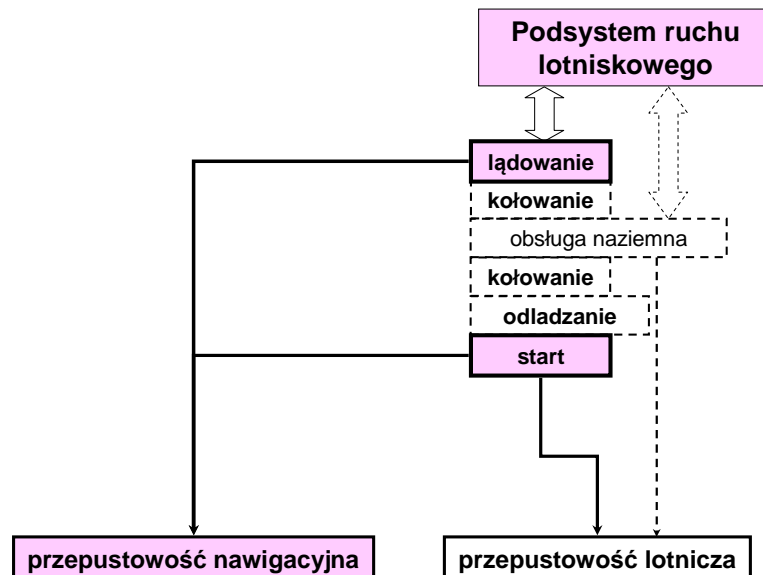
- G – brak założeń o rozkładzie (rozkład nieznan),
 GI – rekurencyjny proces zgłoszeń.

Podstawowym rozkładem losowym w teorii masowej obsługi jest proces Poissona - rozkład wykładniczy odstępów pomiędzy zdarzeniami. W praktyce inżynierskiej można przyjąć, że rozkład wykładniczy występuje gdy spełnione są następujące warunki:

- dwa kolejne zdarzenia są niezależne,
- prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia losowego w małym przedziale $\Delta t \geq 0$ jest równe $\lambda \Delta t$ ($\lambda > 0$, gdzie λ jest stałe),
- prawdopodobieństwo wystąpienia dwóch lub więcej zdarzeń w tym samym czasie Δt jest o rząd wielkości mniejsze niż $\lambda \Delta t$.

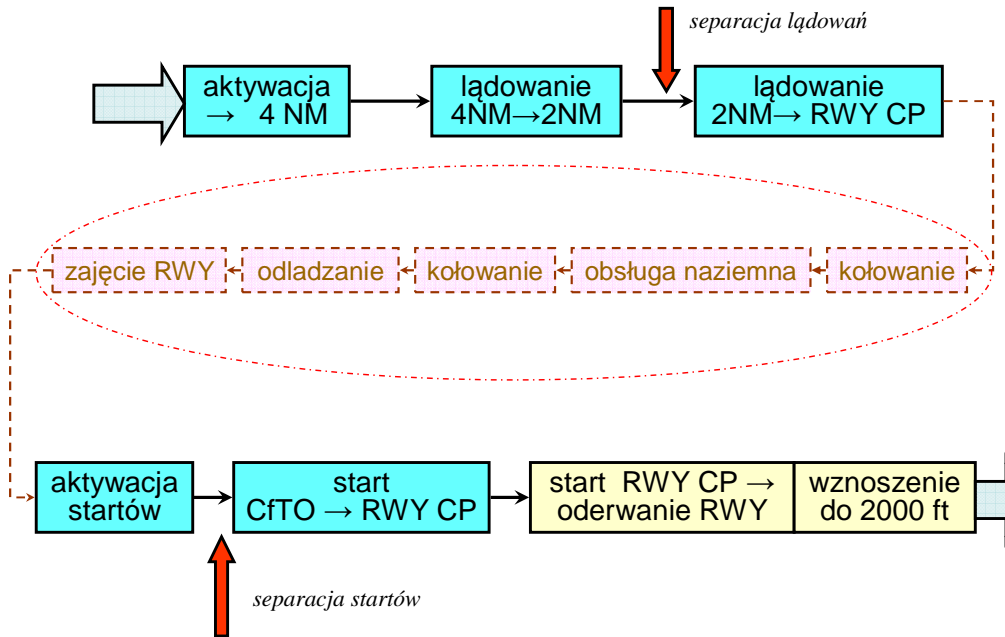
Dla procesu Poissona (rozkładu wykładniczego) prawdopodobieństwo wystąpienia odstępu τ między dwoma kolejnymi zdarzeniami wynosi

$$P(t < \tau \leq t + \Delta t) = \lambda e^{-\lambda t} \Delta t \quad (3)$$

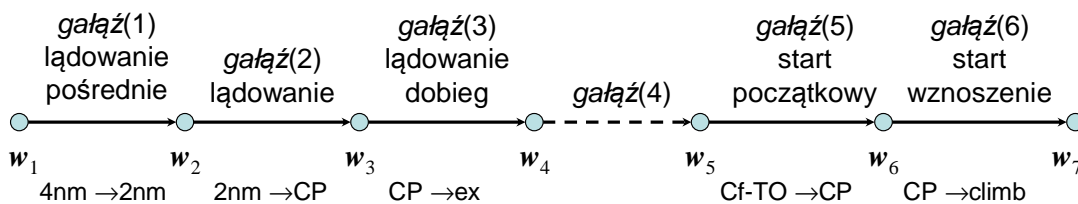


Rys. 2. Przepustowość nawigacyjna portu lotniczego na tle przepustowości lotniczej (*airside*)

Dla postawionego w tej pracy zadania badawczego określenia zmian przepustowości lotniczej portu lotniczego po wprowadzeniu precyzyjnej nawigacji obszarowej P-RNAV zdecydowano się na wprowadzenie dodatkowego zawężającego pojęcia przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego (rys. 2.). W przepustowości nawigacyjnej nie uwzględniamy operacji naziemnych samolotów. Szczególnie dotyczy to, bardzo istotnych w polskich portach lotniczych, pominięcia sytuacji konfliktowych na drogach kołowania i braku możliwości szeregowania samolotów startujących. Dalsze analizy przeprowadzono dla portu lotniczego o krzyżujących się drogach startowych i operacjach lądowania i startu realizowanych z obu dróg startowych naprzemiennie. Zasadniczy model operacyjny takiego portu lotniczego pokazano na rysunku 3, analizowano operacje zaznaczone kolorem niebieskim. Dodatkowo dla operacji startu uwzględniono dodatkową separację wynikającą z konieczności uwzględnienia małej prędkości wznoszenia samolotów dodatkowych kategorii: **M-slow** - Middle-slow (średni wolny) i **L-slow** - Light-slow (lekki wolny). Uwzględniono to na grafie czynnościowym (rys. 4).

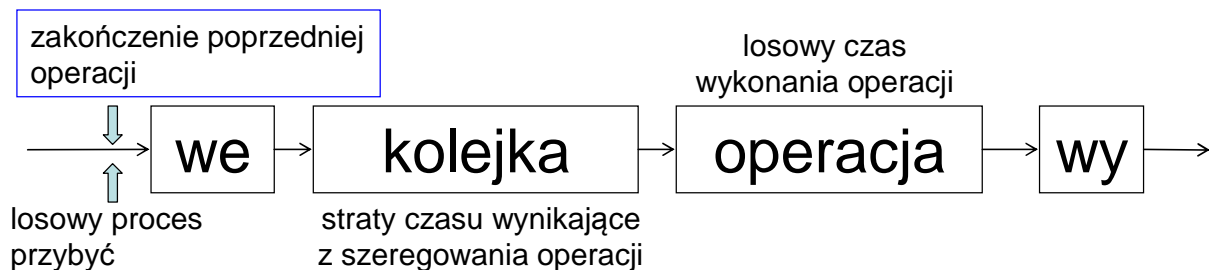


Rys. 3. Model operacyjny do wyznaczania przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego
 Źródło: [7].

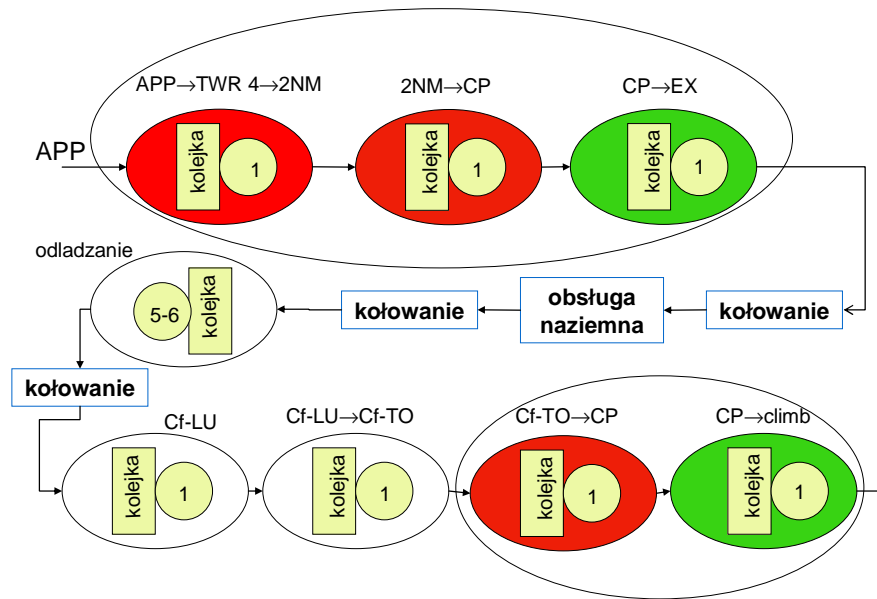


Rys. 4. Graf czynnościowy ruchu lotniskowego dla zadania analizy przepustowości nawigacyjnej

Każdą modelowaną operację elementarną potraktowano jako stanowisko masowej obsługi. W analizowanym przypadku zgłoszenia generowane są w chwili przekazania kontroli nad lądującym samolotem ze służb zbliżeni APP do służb kontroli lotniska TWR. Procesy zgłoszeń i obsługi mają charakter losowy (rys. 5). Sieć masowej obsługi definiujemy na grafie, którego wierzchołkami są stanowiska masowej obsługi [7]. Modelową sieć stanowisk masowej obsługi pokazano na rysunku 6 gdzie operacje mające istotny wpływ na przepustowość nawigacyjną zaznaczono kolorem czerwonym a pomocnicze operacje ograniczające kolorem zielonym.



Rys. 5. Elementarna operacja jako modelowana jako stanowisko masowej obsługi
 Źródło: [7].



Rys. 6. Sieć prostych systemów masowej obsługi dla zadania analizy przepustowości nawigacyjnej
 Źródło: [7].

6. REJESTRACJA PARAMETRÓW OPERACJI LĄDOWANIA I STARTU

Wykonano dwie serie pomiarowe czasów wykonania elementarnych operacji lądowania i startu. Pierwsze pomiary przeprowadzono w dniach 16.06-11.07.2008 roku, przed wprowadzeniem precyzyjnej nawigacji obszarowej. Otrzymano dokładne czasy wykonania operacji elementarnych dla 2 983 operacji startu i lądowania. Na tym samym lotnisku wykonano ponowne pomiary w dniach 10-31.05.2010 roku. Zarejestrowano dokładne czasy wykonania 3 871 operacji startu i lądowania.

Modelowanie operacji ruchu lotniskowego dla zadania wyznaczania przepustowości lotniczej wymaga podziału samolotów na kategorie wagowe (tab. 9).

Tablica 9. Przyjęty podział na kategorie samolotów w operacjach lądowania i startu

Kategoria samolotu	Maksymalna masa do startu MTOW	Czas nabierania wysokości 2 000 ft
L-slow Light-slow (lekki wolny)	$MTOW \leq 7000 \text{ kg}$	ok. 2 minut
L-normal Light-normal (lekki normalny)	$MTOW \leq 7000 \text{ kg}$	1 minuta lub mniej
M-slow Middle-slow (średni wolny)	$7000 \text{ kg} \leq MTOW \leq 136\,000 \text{ kg}$	ok. 2 minut
M-normal Middle-normal (średni normalny)	$7000 \text{ kg} \leq MTOW \leq 136\,000 \text{ kg}$	1 minuta lub mniej
H Heavy (ciężki)	$136\,000 \text{ kg} \leq MTOW$	1 minuta lub mniej

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem [7]

Przykładowe typy samolotów w podziale na przyjęte kategorie przedstawiono w tabeli 10. W modelu operacyjnym podział na kategorie dodatkowe ma wpływ wyłącznie na dodatkowe separacje samolotów startujących. Dla lądowania przyjmujemy założenie, że zgoda na lądowanie wydawana jest pod warunkiem zwolnienia drogi startowej na danym kierunku (lądowanie) lub minięcia 'krzyżówki' na kierunku przecinającym (start).

Tab. 10. Przykładowe typy samolotów w podziale na kategorie dla operacji lotniskowych

Kategoria	Przykładowe typy samolotów	
L-slow	An28 (M-28) Dash DHC6	Let L410
L-normal	Beechcraft BE30 BE58 BE9L Cessna C501 C510 C56X, ... Diamond DA42	Jetstream JS32 Learjet LJ40 LJ45 LJ60 Piaggio P180
M-slow	An 26 ATR 72	Saab 340 (SF34) BAe146-200 Avro RJ85, RJ100(RJ1H)
M-normal	Airbus 320 (318, 319, 321) ATR 42 (AT43 AT45) Boeing 737 (300, 400, 500, 600, 700, 800) CRJ 200, 900 (CRJ2 CRJ9) Embraer EMB145, EMB170, EMB175, EMB190	Falcon F900 Foker F70, F100 MD81 MD82 MD83 MD87 Tupolev Tu154 Jakowlew Jak40 (YK40) Dash 8Q (DH8)
Heavy	Airbus 300 Airbus 330 Boeing 757 Boeing 767	MD11

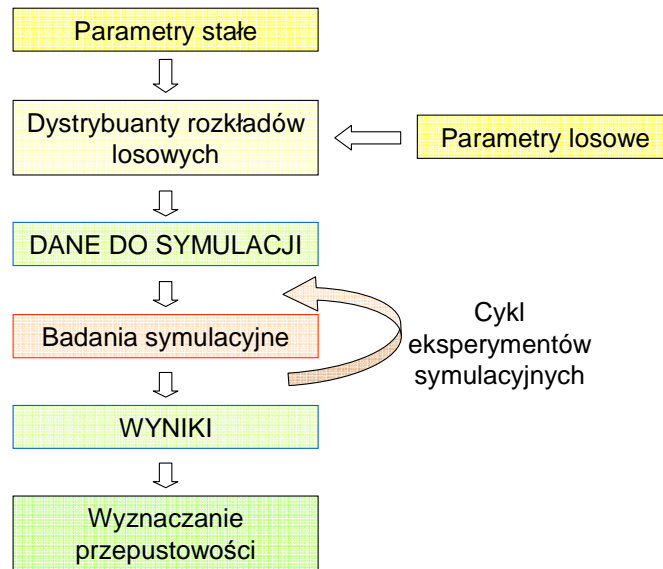
Źródło: opracowanie własne.

Dla zadania wyznaczenia przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego i przyjętego modelu operacyjnego wykorzystano tylko część rejestrowanych danych. Z zarejestrowanych czasów operacji lądowania do dalszej analizy wykorzystano:

- czas minięcia 4 nm od progu drogi startowej – 4NM,
- czas minięcia 2 nm od progu drogi startowej – 2NM,
- czas minięcia krzyżówki dwóch dróg startowych - Pass RWYs crossing point (RWY CP),
- czas zwolnienia drogi startowej i zjazdu na drogę kołowania - EXIT time (RWY-ex).
- Z zarejestrowanych czasów operacji startu do dalszej analizy wykorzystano:
- czas otrzymania zgody na start – CLEARTO (Cf-TO),
- czas minięcia skrzyżowania dróg startowych - Pass RWYs crossing point (RWY CP),
- czas oderwania się kół podwozia samolotu od drogi startowej – airborne (RWY-air).

7. BADANIA SYMULACYJNE NAPRZEMIENNYCH OPERACJI LĄDOWANIA I STARTU

Metodyka przeprowadzonych modelowych badań symulacyjnych składa się z etapów przedstawionych na rys. 7. Po wprowadzeniu parametrów stałych następuje przygotowanie danych losowych do programu symulacyjnego. Dane te wprowadzane są w postaci dystrybuant rozkładów losowych czasów zgłoszeń i czasów wykonania czynności, uwzględniając podział na kategorie samolotów.



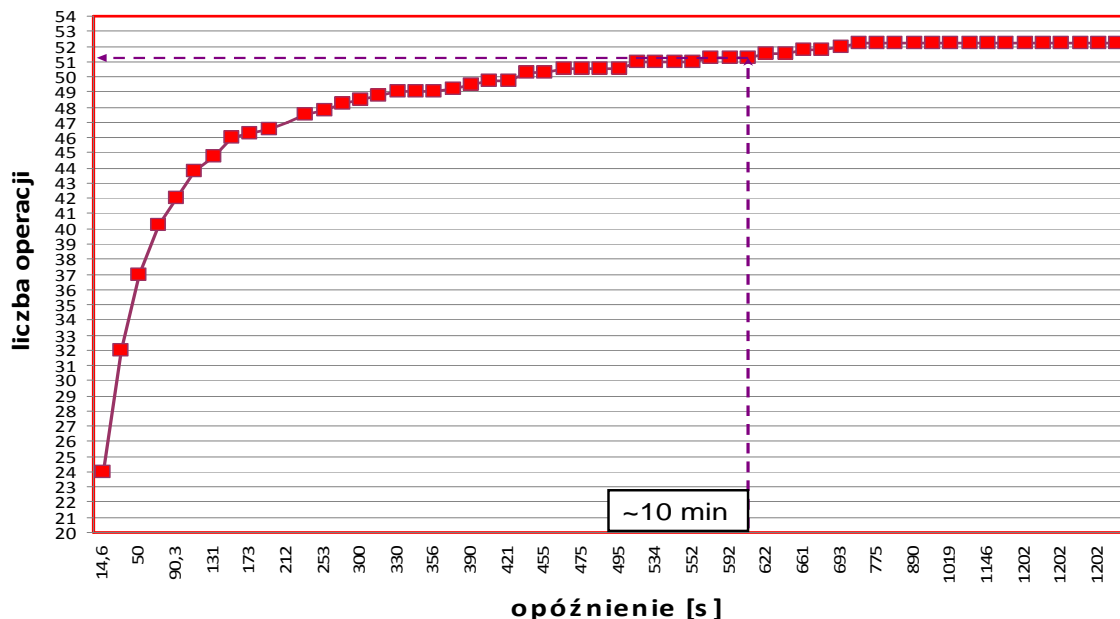
Rys. 7. Ogólny schemat eksperymentów symulacyjnych

W modelu symulacyjnym wprowadzamy szereg parametrów stałych określających istniejące w porcie lotniczym warunki. Model zrealizowano symulacyjnie jako sieć masowej obsługi (rys. 6) zapisaną w najprostszej wersji

$$A / B^{apr} / IA^{apr} \Rightarrow B^{ld-e} / IA^{ld-e} \Rightarrow B^{to} / IA^{to} \Rightarrow B^{off} / IA^{off} \quad (4)$$

Przeprowadzone badania i szczegółowa analiza modelu czynnościowego operacji obsługi ruchu lotniczego w rejonie portu lotniczego wykazały, że model jest dokładny. Wymaga jednak precyzyjnego ustalenia metodologii pomiarów czasów operacji elementarnych.

Na przedstawionym modelu przeprowadzono wiele eksperymentów dla danych rzeczywistych. Przykładowy wynik takiego eksperymentu pokazano na rys. 8. Głównym ich celem było ustalenie wpływu zmian nawigacji obszarowej B-RNAV na P-RNAV na maksymalną liczbę wykonanych operacji startu i lądowania - przepustowość nawigacyjną portu lotniczego.



Rys. 8. Przykładowa zależność liczby wykonanych operacji lotniczych od średniego opóźnienia operacji

8. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE I WYNIKI

Pozytywne wyniki weryfikacji modelu pozwoliły na przeprowadzenie wielu eksperymentów symulacyjnych. Wykorzystano dane pochodzące z rzeczywistych pomiarów przeprowadzonych na lotnisku Warszawa Okęcie. Wyniki eksperymentów były danymi wejściowymi do określenia przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego, przed i po wprowadzeniu precyzyjnej nawigacji obszarowej P-RNAV.

Do wyznaczenia przepustowości nawigacyjnej portu lotniczego na grafie czynnościowym zdefiniowano sieć czynnościową o losowych czasach $\tau_m(kt, \gamma^k)$ wykonania operacji samolotu kt-tej kategorii

$$S^s(\Gamma) = \langle G^s, \phi, \{\tau_m(kt, \gamma^s)\} \rangle \quad (5)$$

gdzie: $\Gamma = \{\gamma^k\}$ - zbiór losowych warunków wykonania operacji.

Jako kryterium oceny operacji lotniskowej przyjęto sumaryczny czas opóźnienia realizacji operacji

$$\Delta t_m(S(\Gamma)) = \sum_k \Delta \tau_m(\gamma^k) \quad (6)$$

Jako przepustowość nawigacyjną przyjęto maksymalną liczbę operacji lotniczych X przy średnim czasie opóźnienia realizacji operacji nie większym od przyjętego

max X

$$\text{przy ograniczeniu: } \Delta T_{v_A(t)}(S(\Gamma)) = \frac{1}{Np} \sum_{m=1}^{Np} \Delta t_m(S(\Gamma)) \leq \Delta T_{akceptowane} \quad (7)$$

gdzie: Np – liczność analizowanej próbki losowej (w praktyce kilkadziesiąt tysięcy),
 $v_A(t)$ – zidentyfikowany losowy rozkład kategorii samolotów.

Przyjęto definicję, że przepustowość nawigacyjna to wielkość ruchu lotniczego w rejonie portu lotniczego (liczba operacji startu i lądowania) w ciągu godziny przy średnim opóźnieniu operacji nie większym od przyjętego (wartość tego opóźnienia może być zdefiniowana lokalnie) w **idealnych warunkach naziemnych operacji lotniskowych**. Ruch lotniczy o wielkości zbliżonej do przepustowości nawigacyjnej w rzeczywistości występuje sporadycznie. Przeprowadzono więc badania symulacyjne.

Uruchomiono program symulujący kilkadziesiąt tysięcy operacji startu i lądowania o czasach wykonania operacji elementarnych losowanych z przygotowanych dystrybuant dyskretnych. W wyniku otrzymano zależności: liczby wykonanych operacji startu i lądowania od średniego opóźnienia operacji. Pozwoliło to wyznaczyć przepustowość nawigacyjną przed i po wprowadzeniu precyzyjnej nawigacji obszarowej. Stwierdzono wyraźny wzrost przepustowości nawigacyjnej analizowanego portu lotniczego: o około 5 – 9 % w zależności od realizowanych konfiguracji startu i lądowania.

PODSUMOWANIE

Model jest elastycznym narzędziem pozwalającym na określenie przepustowości (pojemności) portu lotniczego. W modelu uruchomiono symulację dla kilkadziesiąt tysięcy operacji startu i lądowania o czasach wykonania operacji elementarnych losowanych

z przygotowanych dystrybuant dyskretnych. W wyniku otrzymano zależności: liczby wykonanych operacji startu i lądowania od średniego opóźnienia operacji. Pozwoliło to wyznaczyć przepustowość nawigacyjną przed i po wprowadzeniu precyzyjnej nawigacji obszarowej. Stwierdzono wyraźny wzrost przepustowości nawigacyjnej analizowanego portu lotniczego: o około 5 – 9 % w zależności od realizowanych konfiguracji startu i lądowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bauerle N., Engelhardt-Funke O., Kolonko M.: On the Waiting Time of Arriving Aircrafts and the Capacity of Airports with One or Two Runways, *European Journal of Operational Research*, vol. 177, is. 2, pp. 1180-1196, Elsevier 2007.
- [2] ESSP: EGNOS Service Provision Yearly Report, Bruksela 2010.
- [3] EUROCONTROL: Performance Review Report An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2009, Bruksela 2010.
- [4] ICAO: Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Pomoce Radionawigacyjne, ICAO X.
- [5] Malarski M.: Inżynieria ruchu lotniczego, OW PW, Warszawa 2006.
- [6] Malarski M.: Inżynieria ruchu w lotniczym systemie transportowym, ZN PŚI Transport nr 47 (1586), str. 367-378, Gliwice 2003.
- [7] Malarski M., Modelowanie i analiza przepustowości lotniczej portu lotniczego, PN PW s. Transport z.71, str. 151-171, Warszawa 2009.
- [8] MI: [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury (MI) z dnia 11.03.2004 r. w sprawie szczegółowych technicznych przepisów ruchu lotniczego, Dz. U. 2004 nr 44, poz. 414 (dawne PL-2 – Przepisy Ruchu Lotniczego, polska wersja Aneksu 2 – ICAO II).
- [9] MI: [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury (MI) z dnia 11.03.2004 r. w sprawie zasad działania służb ruchu lotniczego, Dz. U. z 2004 r. Nr 44 poz. 415 (dawne PL-11 – Zasady Ruchu Lotniczego, polska wersja Aneksu 11 – ICAO XI).
- [10] PAŻP: Instrukcja operacyjna WARSZAWA TWR, Warszawa 2010.

POSITION ACCURACY OF MODERN SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS AND AIRPORT CAPACITY

Abstract:

In December 2009 P-RNAV concept was implemented for TMA Warsaw F. Chopin airport, with a position accuracy in the designated airspace ± 1 nautical miles (± 1852 m). This doctoral thesis offers a quantitative analysis of the implementation of new navigation and positioning methods in the TMA of the airport and the influence of this implementation on capacity of the airside/airport and the safety of operations. The crucial parameter for assessment of navigational performance of the airport and TMA is the capacity of the airport measured as the number of takeoff and landing operations. The operational model of the airport was designed to assess the influence of navigation and positioning capabilities on the capacity of the airport.

Key words: air traffic, airport capacity, satellite navigation