

Problemy ruchu lotniczego w regionalnym porcie lotniczym

Jacek Skorupski, Marek Malarski

Port lotniczy stanowi punkt węzłowy transportu lotniczego. Występują w nim dwie grupy procesów obsługi – obsługa samolotów, wykonywana w części lotniczej portu lotniczego oraz obsługa pasażerów, wykonywana w części pasażerskiej portu lotniczego. Regionalny port lotniczy jest istotnym czynnikiem wyrównywania poziomu gospodarczego i kulturalnego regionów w UE.

Operacje obsługi ruchu samolotów w rejonie lotniska mają charakter wielofazowy i mogą być analizowane jako procesy losowe. Takie procesy wygodnie jest badać przy wykorzystaniu modeli wykorzystujących teorię masowej obsługi.

W artykule przedstawiono analizę operacji i procedur obsługi ruchu samolotów. Na tej podstawie przedstawiono przykład modelowania tych procedur przy wykorzystaniu sieciowych modeli masowej obsługi. Prezentowana w artykule metoda może być wykorzystana do racjonalizacji wykorzystania dostępnej infrastruktury lotniskowej, szczególnie w obliczu planowanej modernizacji jej elementów lub znacznych zmian charakteru potoku pasażerów.



dr hab. inż.
Jacek Skorupski
prof. Politechniki Warszawskiej,
Wydział Transportu



Prof. dr hab. inż.
Marek Malarski,
Politechnika Warszawska,
Wydział Transportu

Rozwój ruchu lotniczego

Szybki rozwój przemysłowo – urbanistyczny wymusza na społeczeństwach rozwój infrastruktury transportowej, szczególnie transportu lotniczego. To jedna z głównych przyczyn, dla których zaczęto dostrzegać konieczność równomiernego rozwoju lotnisk oraz infrastruktury z nimi powiązanej. Mimo, że wydajność paliwa lotniczego poprawiła się w okresie ostatnich czterdziestu lat o około 70%, to łączna ilość spalanej paliwa, ze względu na niezmiennie dynamiczny wzrost ruchu lotniczego, również się zwiększyła. W rezultacie coraz większy jest wpływ tej gałęzi transportu na środowisko.

Aktualne prognozy rozwoju światowego rynku transportu lotniczego są bardzo optymistyczne (prognoza Airbusa „Global Market Forecast 2011”, prognoza Boeinga

„Current Market Outlook 2011”, prognoza Bombardiera „Bombardier Commercial Aircraft Market Forecast 2011”). Wszystkie prognozy przewidują sukcesywny i równomierny wzrost przewozów lotniczych, co skutkuje stabilizacją wzrostu rynku przewoźników, producentów samolotów komunikacyjnych i operatorów portów lotniczych. Pozornie niekorzystne trendy takie jak stale rosnące ceny paliwa i coraz ostrzejsze uwarunkowania wynikające z ochrony środowiska w rzeczywistości działają na korzyść producentów samolotów – przewoźnicy będą musieli kupować coraz nowocześniejsze i oszczędniejsze samoloty.

Zgodnie z prognozami Boeinga i Airbusa w ciągu najbliższych 20 lat ruch lotniczy zwiększy się trzykrotnie, a przewoźnicy kupią ponad 33 tysiące nowych samolotów pasażerskich i towarowych. Jak wynika z corocznych analiz Międzynarodowego Zrzeszenia Portów Lotniczych ACI (Airport Council International) przewóz lotniczy jest stosunkowo mało wrażliwy na zawirowania kryzysowe na rynku finansowym (ACI zrzesza 580 operatorów zarządzających 1650 portami lotniczymi w 179 krajach i regionach, obsługującymi około 98% światowego komercyjnego ruchu lotniczego). W roku 2010 w portach lotniczych na świecie odprawiono 4,8 miliarda pasażerów i 85 milionów ton frachtu lotniczego cargo, a samoloty komunikacyjne wykonały 70 milionów operacji startów i lądowań (około 35 milionów rejsów lotniczych). Po wyrażonym wyhamowaniu transportu lotniczego w roku 2009, od roku 2010 następuje wyraźna światowa poprawa wielkości obsługiwanego ruchu lotniczego (wzrost liczby przewiezionych pasażerów i ładunków o 5-6% w stosunku do najlepszego wcześniej roku 2008). Jak wynika z oficjalnych statystyk Urzędu Lotnictwa Cywilnego ULC w polskich portach lotniczych w 2010 r. obsłużono 20,7 miliona pasażerów, 82 tysiące ton

ładunków i wykonano 286 tysięcy operacji startów i lądowań (w Warszawie obsłużono 8,7 miliona pasażerów a w pozostałych 10 portach regionalnych 12 milionów). Wykonano 260 tysięcy lotów w ruchu krajowym i międzynarodowym z polskich portów lotniczych oraz obsłużono nawigacyjnie 325 tysięcy przelotów tranzytowych w polskiej przestrzeni powietrznej. Analiza zmian polskiego rynku transportu lotniczego wskazuje na stymulującą rolę przewoźników niskokosztowych. W latach 2005-2010 ich udział w rynku przewozów regularnych zwiększył się z 31% do prawie 52 %, liczba odprawionych pasażerów osiągnęła 8,9 miliona (głównie Wizz Air i Ryanair – 7,7 miliona pasażerów w 2010 r.). Niestety towarzyszy temu wyraźna stagnacja polskich przewoźników obsługujących od kilku lat około 5 milionów pasażerów rocznie.

Jak wynika z aktualnych prognoz rozwoju ruchu lotniczego w Polsce (ULC „Prognoza popytu na lotniczy ruch pasażerski w polskich portach lotniczych do 2030 roku - aktualizacja 2011”) w latach 2010-2030 liczba pasażerów obsługiwanych w polskich portach lotniczych wzrośnie z 20,5 miliona w 2010 do prawie 58,8 miliona pasażerów w roku 2030, a liczba operacji w polskich portach lotniczych przekroczy w tym czasie 0,5 miliona.

Prognozy rynku transportu lotniczego zarówno Boeinga jak i Airbusa wskazują, że bardziej aktywni będą przewoźnicy niskokosztowi. Ich udział w przewozach na runku europejskim wzrośnie z około 14% w roku 2010 do około 18% w roku 2020. Wielu przewoźników zmieni w najbliższych latach swój model biznesowy. Należy oczekiwać fuzji i przejmowania firm przewoźniczych oraz rozszerzania współpracy między partnerami aliansów lotniczych. Można też oczekiwać spadku zainteresowania dużych przewoźników trasami krótkimi, które mają przejmować przewoźnicy niskokosztowi.

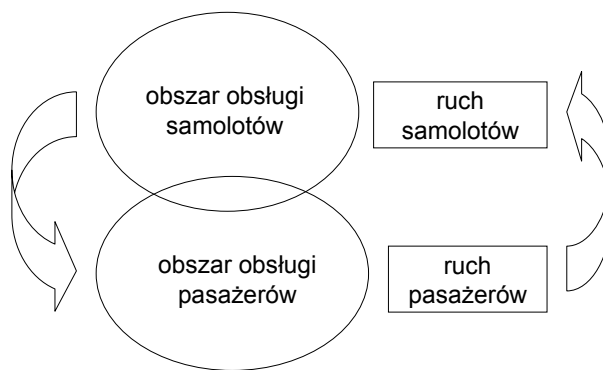
Operacje samolotów w rejonie portu lotniczego

Lotnisko jest to wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni w całości lub części przeznaczony do wykonywania startów, lądowań i naziemnego ruchu samolotów (statków powietrznych), wraz ze znajdującymi się w jego granicach obiektami i urządzeniami budowlanymi o charakterze trwałym, wpisane do rejestru lotnisk. Lądowanie (*landing*) to sprowadzenie samolotu z przestrzeni powietrznej na powierzchnię ziemi na przeznaczoną do tego drogę startową. Start (*take-off*) to przemieszczenie się samolotu z drogi startowej do lotu w przestrzeni powietrznej. Zespół urządzeń i obiektów wykorzystywanych do obsługi samolotu w obszarze pola ruchu naziemnego to infrastruktura lotniskowa.

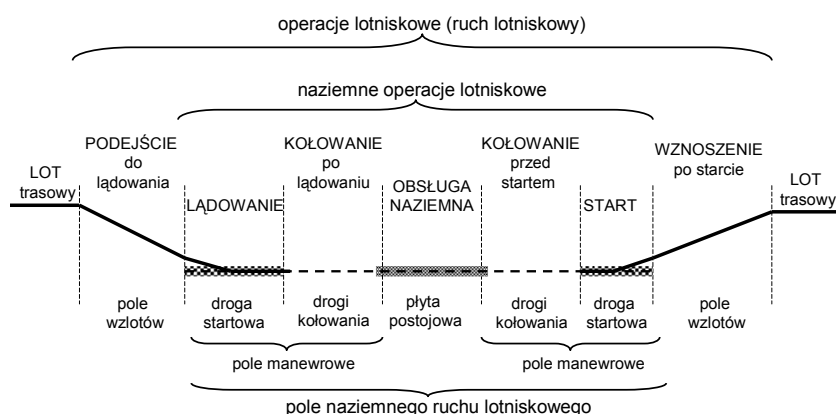
Port lotniczy to lotnisko użytku publicznego przeznaczone do wykonywania lotów handlowych. Port lotniczy składa się z dwóch obszarów: lotniczego (*airside*) – w którym głównie obsługiwane są samoloty i naziemnego (*landside*) – przeznaczonego głównie do obsługi pasażerów. Obsługuje on: strumień ruchu samolotów (lądujących i startujących) oraz strumień ruchu pasażerów (odlatujących, przylatujących transferowych i tranzytowych). Głównym celem działania portu lotniczego jest bezpieczne, szybkie i tanie obsłużenie obu tych strumieni (rys. 1). Port lotniczy jest więc obiektem złożonym o wyraźnym wyróżnionych elementach i relacjach pomiędzy nimi, jest więc systemem. Rejon portu lotniczego jest tą częścią przestrzeni powietrznej kontrolowanej w której koncentruje się większość operacji lotniczych. Podstawowym parametrem oceny nawigacyjnej portu lotniczego i jego rejonu jest jego przepustowość dla operacji lotniczych startu i lądowania (*airport airside capacity*). Analizując port lotniczy jako sieć połączeń pomiędzy podsystemami można wyznaczać jego przepustowość korzystając z zasady Forda Fulkersona, jako przepustowość minimalnego przekroju (przepustowość wąskiego gardła [6]). Jest to jednak metoda statyczna, nie uwzględniająca losowości realizacji procesów ruchu lotniczego w porcie lotniczym. Lepszy podejściem jest tu wyodrębnienie kilku podsystemów i ich niezależna losowa analiza.

Operacje startu i lądowania samolotów

Operacje samolotów wykonywane są w części lotniczej portu. Wyróżnia się tu pole naziemnego ruchu lotniczego (rys. 2) – część portu wykorzystywaną do startów, lądowań i naziemnego ruchu samolotów. Pole ruchu naziemnego składa się z pola manewrowego oraz płyt postojowych. Pole manewrowe jest częścią lotniska, wyłączając płyty, przeznaczoną do wykonywania operacji startów i lądowań oraz operacji kołowania samolotów. Start samolotu po uzyskaniu zezwolenia kontroli ruchu lotniskowego TWR poprzedzony jest



1. Zintegrowane obszary obsługi pasażerów i samolotów w porcie lotniczym [opracowanie własne]



2. Operacja lotniskowa samolotu [opracowanie własne]

wyprowadzaniem na płycie postojowej i kołowaniem. Możliwe są różne warianty wyprowadzenia ze stanowiska postojowego:

- wykołowanie do przodu z wykorzystaniem ciągu własnych silników (*taxiing*),
- wykołowanie do tyłu z wykorzystaniem odwróconego ciągu własnych silników (*power back*), wykonywane zawsze pod nadzorem Koordynatora Naziemnego Ruchu Lotniczego,
- wypychanie (*push back*) samolotu ze stanowiska postojowego z użyciem ciągnika i sztywnego połączenia ciągnik - samolot, pod nadzorem mechanika naziemnego,
- odholowanie (*towed out*) samolotu (statku powietrznego) ze stanowiska postojowego do hangaru lub na inne stanowisko postojowe

Ruch lotniskowy obejmuje wszystkie operacje samolotu związane z lądowaniem w porcie lotniczym i startem (rys. 2). Zasady ruchu lotniskowego regulują odpowiednie przepisy, aneksy i podręczniki Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO. Krajowe władze lotnictwa cywilnego wydają przepisy uściślające dokumenty ICAO. W małych regionalnych portach lotniczych samo lądowanie rozpoczyna się w chwili przekazania kontroli nad samolotem z kontroli obszaru ACC do kontroli lotniska TWR. Lądowanie jest szeregiem operacji przejścia samolotu z lotu do operacji naziemnych. W odległości około 2 mile morskie (NM) przed punktem przyziemienia THR (threshold) samolot przy prędko-

ści ok. 120 węzłów kts (1 kt = 1 NM / godzinę) rozpoczyna właściwą operację lądowania. Po przyziemieniu następuje dobieg po drodze startowej i redukcja prędkości do ok. 30 kts (węzłów). Przy odpowiedniej prędkości wykonywane jest kołowanie (*taxiing*) po drodze kołowania na płytę postojową. Droga kołowania zapewnia połączenie między określonymi częściami lotniska, najczęściej pomiędzy płytami postojowymi i miejscami dostępu do drogi startowej. Odcinki dróg kołowania wyznaczone są też na części płyty postojowej, zapewniając dostęp do stanowisk postojowych. Specjalnym rodzajem drogi kołowania jest droga szybkiego zjazdu z drogi startowej. Jest to droga poprowadzona pod "łagodnym" kątem do drogi startowej w celu umożliwienia opuszczenia jej przy prędkości większej niż normalna prędkość kołowania.

Na płycie postojowej wykonywana jest obsługa naziemna. Po ustawieniu samolotu następuje wyłączenie silników i przystawienie pomostu pasażerskiego do drzwi. Po zakończonej obsłudze naziemnej dowódca samolotu zgłasza do kontroli lotniska TWR gotowość do startu (rys. 3). Po otrzymaniu zgody (*clearance*) wykonywane jest kołowanie (*taxiing*) po ustalonej drodze kołowania. Następnie po uzgodnieniu z TWR dowódca samolotu otrzymuje zgodę na zajęcie drogi startowej CflU (*clear for line up*) i kolejno zgodę na start CftO (*clear for take off*). Dalej następuje start i wznoszenie (*climb*). Czas wypychania samolotu zależy częściowo od sprawności obsługi

naziemnej, a czas uruchamiania silników jest cechą indywidualną typów samolotów. Po osiągnięciu wysokości 2 000 ft (*feet* – stóp) kontrola nad samolotem zostaje przekazana do kontroli zbliżania APP lub w małych regionalnych portach lotniczych od razu do kontroli obszaru ACC.

Przebieg obejmujący lądowanie, obsługę naziemną i start samolotu określamy pojęciem *obsługi lotniskowej samolotu* (rys. 4). W praktyce wyróżnia się:

- obsługę pełną tzw. *obsługę krótką* – czas postoju pomiędzy lądowaniem i startem jest ograniczony do niezbędnego minimum przeprowadzenia obsługi naziemnej (rys. 2),
- *obsługę po przylocie* – czas postoju pomiędzy lądowaniem i startem jest znacznie dłuższy od wymaganego do obsługi naziemnej, wykonywana jest tylko obsługa naziemna po przylocie,
- *obsługę na odlot* – po dłuższym postoju wykonywana jest tylko obsługa naziemna przed odlotem.

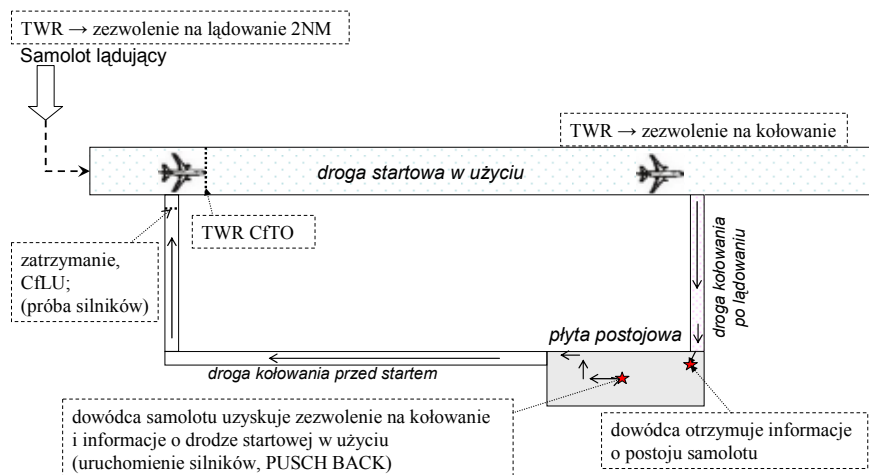
Zgodnie z przepisami samoloty lądujące mają zawsze pierwszeństwo przed samolotami oczekującymi na start.

Za bezpieczne organizowanie i zarządzanie wykonywaniem operacji startu i lądowania odpowiada służba kontroli lotniska TWR (*Tower*). Odpowiada ona za wszystkie operacje na polu wzlotów i w powietrzu aż do punktu przekazania kontroli do służby kontroli zbliżania APP / kontroli obszaru ACC. W maksymalnej konfiguracji na kontrolę lotniska TWR składają się cztery stanowiska operacyjne:

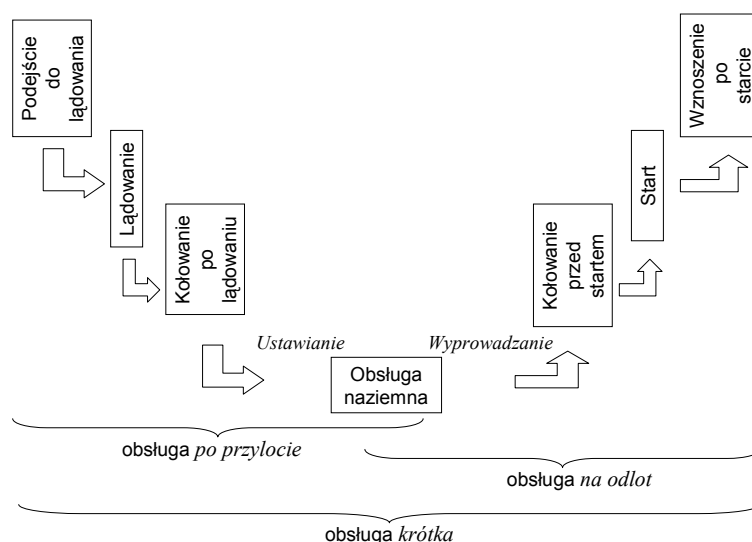
- kontroler TWR (*tower controller*) – zapewnia nakazane przepisami separację między samolotami na podejściach, przekazuje pilotom zgodę kontroli obszaru na odbycie lotu, oraz zezwala na starty i lądowania,
- kontroler GND (*ground controller*) – odpowiada za ruch naziemny samolotów w obrębie dróg kołowania i dróg startowych,
- asystent kontrolera TWR (*tower flight data*) – pośredniczący w wymianie informacji z innymi organami kontroli i w porozumieniu z kontrolerem TWR obsługuje ruch pojazdów naziemnych w porcie lotniczym (m.in. udziela zgody na przejazd przez drogi startowe i drogi kołowania),
- operator delivery (*delivery controller*) – dysponując dostępem do bazy danych planów lotu uzyskuje zgodę na lot od kontroli obszaru przekazując ją załodze samolotu.

Elementy funkcjonowania portu lotniczego

Operacje lotnicze lądowania i startu wykonywane są w obszarze *pola wzlotów* z wykorzystaniem lotniczych urządzeń naziemnych. Na *polu wzlotów* urządzone są drogi startowe (RWY) wraz ze związanymi z nimi powierzchniami zabezpieczenia końca drogi startowej (RESA), zabezpieczenia przerwane go startu



3. Pozycje samolotu w ruchu lotniskowym [opracowanie własne]



4. Schemat operacji samolotu w obsłudze lotniskowej [opracowanie własne]

(SWY) i zabezpieczenia wydłużonego startu (CWY) (rys. 5). Standardowo w ruchu lotniczym przyjmuje się oznaczenia:

- TORA – rozporządzalna długość drogi startowej, deklarowana jako odpowiednia do rozbiegu startującego samolotu,
- LDA – rozporządzalna długość drogi startowej, deklarowana jako odpowiednia do lądowania,
- ASDA – rozporządzalna długość przerwane go startu, rozporządzalna długość startu powiększona o długość przerwane go startu (SWY),
- TODA – rozporządzalna długość drogi startowej, deklarowana jako odpowiednia do rozbiegu startującego samolotu, powiększona o długość zabezpieczenia wydłużonego startu (CWY).

Wykonanie operacji lotniczej w warunkach normalnych uwarunkowane jest przez odpowiednią długość TORA dla operacji startu i długość LDA dla operacji lądowania na danym kierunku drogi startowej. W praktyce długość TORA i LDA dla lotów handlowych jest bardzo podobna

(różnica wynosi do 30 m). Często więc przyjmuje się $TORA = LDA$ (rys. 5).

Wymiary drogi startowej, odniesione do wymagań i wymiarów samolotów stanowią podstawę do określenia kodu referencyjnego kierunków dróg startowych portu lotniczego. Zgodnie z definicją [5] kod referencyjny lotniska/ portu lotniczego pozwala ustalić współzależność pomiędzy charakterystykami technicznymi portu lotniczego, w celu określenia jego wyposażenia odpowiadającego samolotom, jakie mają z niego korzystać. Kod referencyjny składa się z dwóch elementów związanych z charakterystykami osiągnięć i wymiarami samolotu: cyfry odpowiadającej długości wymaganej drogi startowej i litery odpowiadającej rozpiętości skrzydeł samolotu i całkowitemu rozstawowi zewnętrznych kół w podwoziu głównym. Litera i cyfra kodu dotycząca danego elementu wybrana dla celów projektowych odnosi się do charakterystyk krytycznych samolotu. Dla poszczególnych kodów referencyjnych określono w przepisach [5] minimalne dopuszczalne wartości szerokości dróg startowych (tab. 1).

Na warunki wykonywania operacji lotniczych wpływają też:

- kierunek wykonywania operacji lotniczych, mierzony od kierunku północnego przez obserwatora patrzącego od strony podejścia do drogi startowej,
- rodzaj nawierzchni drogi startowej (betonowa, bitumiczna lub bitumiczno – cementowa) i nośność nawierzchni określona metodą PCN-ACN [12].

Powszechnie używanym radionawigacyjnym systemem lądowania jest system lądowania według wskazań przyrządów ILS (*Instrument Landing System*). System ILS emituje elektromagnetyczną ścieżkę schodzenia. W procedurze lądowania według wskazań systemu ILS wykorzystuje się sygnały:

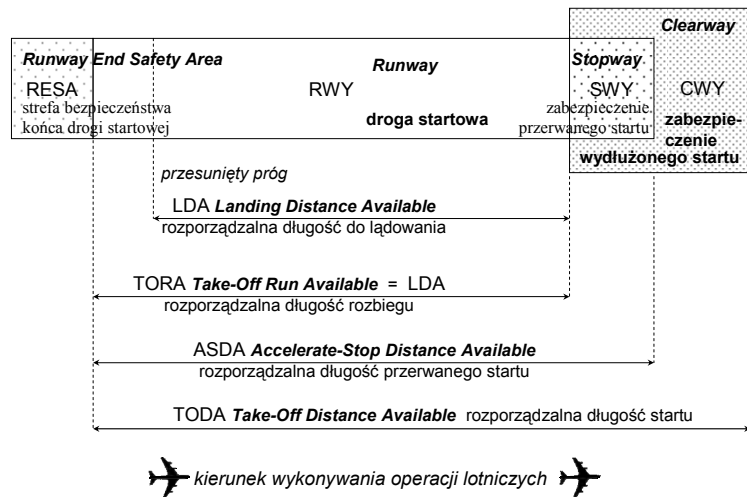
- radiolatarni kursowej (*localizer*) umieszczonej w osi drogi startowej,
- radiolatarni ścieżki schodzenia (*glide path*).
- radiolatarni znakujących,

Na podstawie charakterystyk odebranych sygnałów pokładowy system odbiorczy ILS daje pilotowi dokładny obraz ścieżki schodzenia. Obecnie standardowe naziemne systemy ILS uzupełniane są o radiodalmierz DME. Umożliwia to dokładne określenie odległości samolotu od progu drogi startowej. System ILS zapewnia prowadzenie samolotu lądującego z nakazanym kursem i kątem schodzenia od granicy strefy działania systemu (~10 NM od progu drogi startowej) do punktu, w którym linia kursu przenika ścieżkę schodzenia na określonej minimalnej wysokości (HD) nad płaszczyzną poziomą przechodzącą przez próg drogi startowej i przy określonej minimalnej widzialności (RVR). Wartości graniczne tych wielkości zależne są od kategorii systemu ILS.

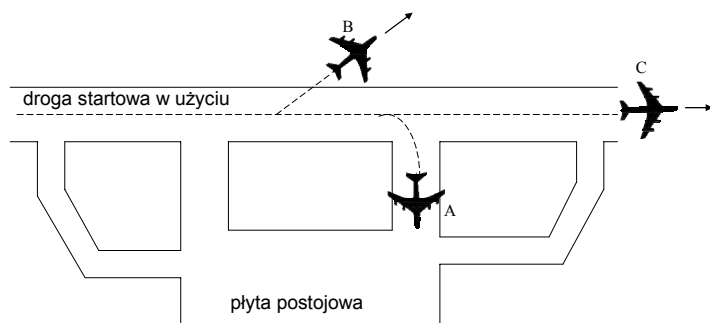
Naziemne lotnicze światło nawigacyjne to światło specjalnie przeznaczone do ułatwienia nawigacji. Przepisy [5] określają szczegółowe wymagania dotyczące układu, koloru i natężenia światła. Na i w pobliżu pola wzlotów instalowane są światła wykorzystywane przy wykonywaniu lotniczych operacji lądowania i startu:

- światła *podejścia do progu drogi startowej*,
- światła *ścieżki schodzenia*,
- światła *drogi startowej i dróg kołowania*.

Światłne systemy podejścia do progu drogi startowej dla odpowiednich kategorii wyposażenia (KAT I, II i III) składają się z odpowiednich układów światła na przedłużeniu osi drogi startowej i odpowiednich poprzeczek świetlnych w określonej odległości od jego progu. Zasada działania świetlnych systemów wskazywania ścieżki podejścia opiera się na emisji czerwonej i białej wiązki świetlnej, o odpowiedniej światłości i ustawieniu kątowym poziomym i pionowym. W jednostkach świetlnych, rozmieszczonych w formie poprzeczek skrzydłowych, symetrycznie w stosunku do osi drogi startowej, stosuje się szczelinowe lub soczewkowe układy pionowego rozdzielania barwy wiązek świetlnych. Powszechnie



5. Deklarowane długości drogi startowej [opracowanie własne]



6. Standardowe pozycje samolotu zwalniającego drogę startową [opracowanie własne]

stosowane są dwa systemy światła: VASIS i PAPI. Standardowy system VASIS składa się z 12 jednostek świetlnych usytuowanych symetrycznie po obu stronach drogi startowej w formie dwóch par poprzeczek skrzydłowych umiejscowionych przed i za punktem przyziemienia. Jednostki światła są tak ustawione, że pilot widzi odpowiedni układ światła (białych i czerwonych) ustalający położenie samolotu względem ścieżki schodzenia. System VASIS stanowi podstawę dla innych wariantów wskaźników ścieżki schodzenia: AVASIS i T-VASIS (2 BAR i 3 BAR) [5]. Rozwinięciem systemu VASIS jest wizualny wskaźnik kąta ścieżki precyzyjnego schodzenia PAPI. Wskaźnik systemu PAPI tworzą dwie poprzeczki skrzydłowe, złożone z 4 sygnałów świetlnych, rozmieszczone symetrycznie w stosunku do osi drogi startowej. System APAPI działa na podobnej zasadzie, jednak obejmuje tylko dwie jednostki świetlne poprzeczki skrzydłowej. System PAPI (oraz APAPI) posiada liczne zalety, z których najważniejsze to:

- duża dokładność wskazań,
- każdy sygnał świetlny posiada dwa stany: biały lub czerwony – dzięki temu wyeliminowane są stany niezdeterminowane,
- prostsza i tańsza konstrukcja w porównaniu z innymi systemami.

Z uwagi na to, system PAPI jest zalecany przez Organizację Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO i zastępuje system VASIS.

Tab.1. dopuszczalne szerokości dróg startowych [5]

Cyfra kodu	Litera kodu					
	A	B	C	D	E	F
1	18 m	18 m	23 m	-	-	-
2	23 m	23 m	30 m	-	-	-
3	30 m	30 m	30 m	45 m	-	-
4	-	-	45 m	45 m	45 m	60 m

Uwaga: Szerokość drogi startowej z podejściem precyzyjnym nie powinna być mniejsza niż 30 m.

Procedury startów i lądowań

Podstawowe zasady ruchu lotniskowego ustalają, że samolot podchodzący do lądowania otrzymuje zezwolenie na kontynuowanie podejścia końcowego i lądowanie, gdy poprzedzający go samolot odlatujący minie koniec drogi startowej w użyciu (punkt C rys. 4) lub rozpocznie zakręt (punkt B) oraz gdy uprzednio lądujący samolot zwolni drogę startową w użyciu (punkt A) [5]. Samolot odlatujący otrzymuje zezwolenie na rozpoczęcie startu, gdy poprzedzający go samolot odlatujący minie koniec drogi startowej (punkt C rys. 4) lub rozpocznie zakręt (punkt B) a samolot uprzednio lądujący zwolni drogę startową w użyciu (punkt A rys. 6).

Oprócz separacji odległościowych w kontroli ruchu lotniskowego stosowane są również odpowiednie minima separacji czasowej.

wych, w zależności od kolejności i kategorii turbulencji w śladzie aerodynamicznym samolotów wykonujących operacje lądowania i startu [3]. „Turbulencja w śladzie aerodynamicznym” oznacza oddziaływanie zaburzonych mas powietrza powstających za samolotami. Wartość przyjmowanej separacji w warunkach turbulencji w śladzie aerodynamicznym zależy od wielkości, a w zasadzie od masy samolotu.

Ogólne ograniczenia operacyjne wynikające z turbulencji w śladzie aerodynamicznym wyróżniają kategorie wagowe typów samolotów o danej maksymalnej masie startowej MTOW.

Dla każdego kierunku, każdej drogi startowej portu lotniczego ustanowione są standardowe procedury lądowania STAR (Standard Instrument Arrival) i startu SID (Standard Instrument Departure), których celem jest zapewnić

nie bezpiecznego i efektywnego ruchu lotniskowego. Szczegóły opracowanych procedur wynikają z ukształtowania terenu wokół lotniska i jego otoczenia, rodzaju operacji, typu, umiejscowienia i kategorii dostępnych naziemnych urządzeń nawigacyjnych oraz istniejących ograniczeń w przestrzeni powietrznej.

Standardowa procedura podejścia do lądowania składa się z segmentów: *dołotu, podejścia początkowego, podejścia pośredniego, podejścia końcowego* i *odlotu po nieudanym podejściu*. W każdym segmencie operacji podejścia do lądowania stosuje się odpowiednie przewyższenia nad przeszkodami [5]. Po podejściu końcowym następuje operacja lądowania. Procedura odlotu po nieudanym podejściu zapewnia ochronę przed przeszkodami od punktu, w którym rozpoczyna się odlot do punktu lub wysokości, gdzie odlot ten się kończy.

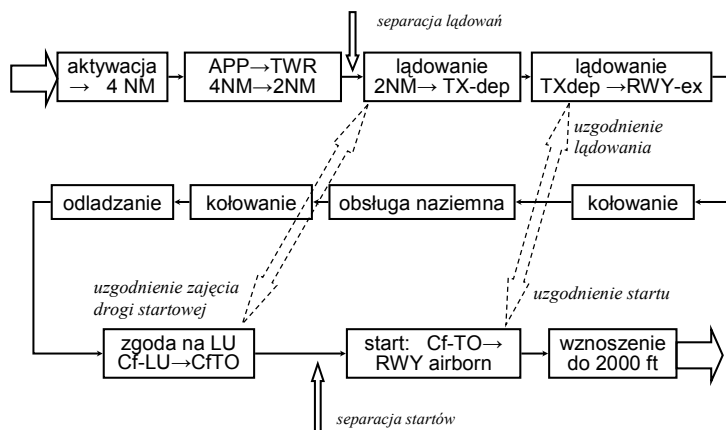
Standardowa procedura wznoszenia po starcie (*climb*) określa: trasy odlotu, segment rozpędzania i zwiększony minimalny gradient wznoszenia, jeżeli jest to pożądane do osiągnięcia minimalnego przewyższenia nad przeszkodami. Standardowe procedury odlotów i przylotów planowane są z uwzględnieniem również lokalnych przepisów dotyczących ochrony środowiska, w tym ochrony przed hałasem.

Elementarne operacje samolotów w rejonie portu lotniczego

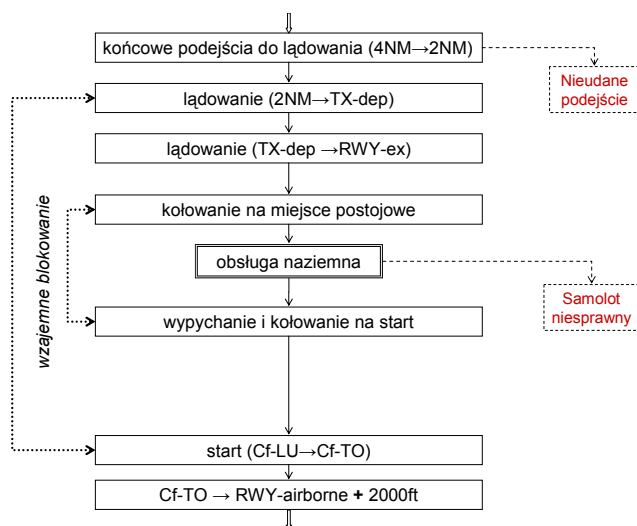
Ruch lotniczy jest planowany. Wszystkie samoloty mają planowane czasy startu. Planowana sytuacja ruchowa jest operacyjnie koordynowana przez centrum zarządzania przepływem ruchu lotniczego CFMU (w Europie: Bruksela lub Paryż). Dokładna realizacja ruchu jest zarządzana przez służby zarządzania ruchem ATM. Odbiega ona (z reguły nieznacznie) od koordynowanego planu. W portach lotniczych o małym ruchu (w tym w portach regionalnych) ruch lotniskowy zarządzany jest lokalnie przez kontrolerów ruchu lotniskowego TWR.

Właściwym podejściem przy analizie operacji lotniskowych jest rozbicie na operacje elementarne i analiza modelu systemowego – modelu sieci czynnościowych poszczególnych operacji. Dla lotniskowego ruchu lotniczego wyodrębniamy więc operacje elementarne. Analiza modelowa złożenia zidentyfikowanych operacji elementarnych jest dobrym i skutecznym narzędziem analizy i oceny ruchu w wybranych częściach przestrzeni lotniskowej [8].

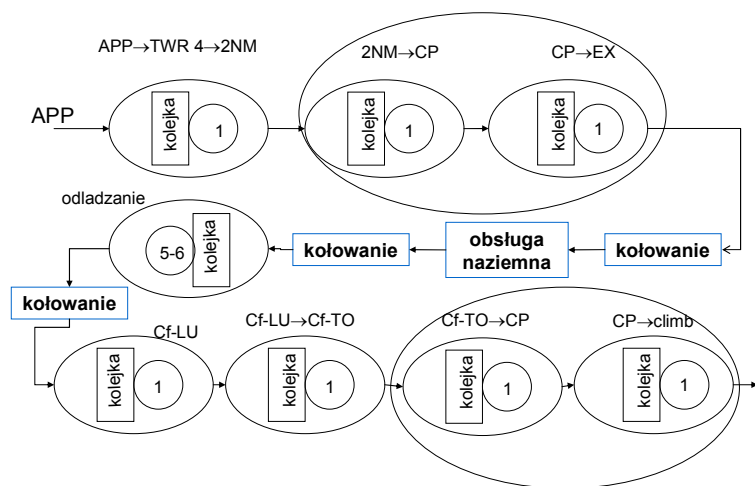
Postępowanie polegające na rozbiciu analizowanego procesu na operacje elementarne, analiza operacji elementarnych i ich ponowne złożenie w model dokładny jest znanym podejściem w tym zakresie. Jednak dopiero dobra identyfikacja operacji elementarnych pozwala efektywnie zastosować to podejście do oceny obsługi ruchu lotniskowego. Podstawowe następstwo zdarzeń kolejnych operacji w ruchu lotniskowym samolotów dla regionalnego portu lotniczego o pojedynczej drodze



7. Następstwo operacji lotniczych w rejonie portu lotniczego o pojedynczej drodze startowej [opracowanie własne – opis w tekście]

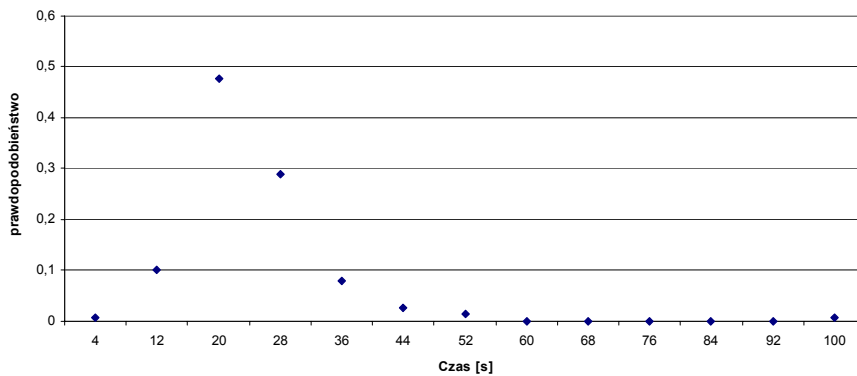


8. Następstwo zdarzeń operacji lotniskowych w regionalnym porcie lotniczym w okresie letnim [opracowanie własne]

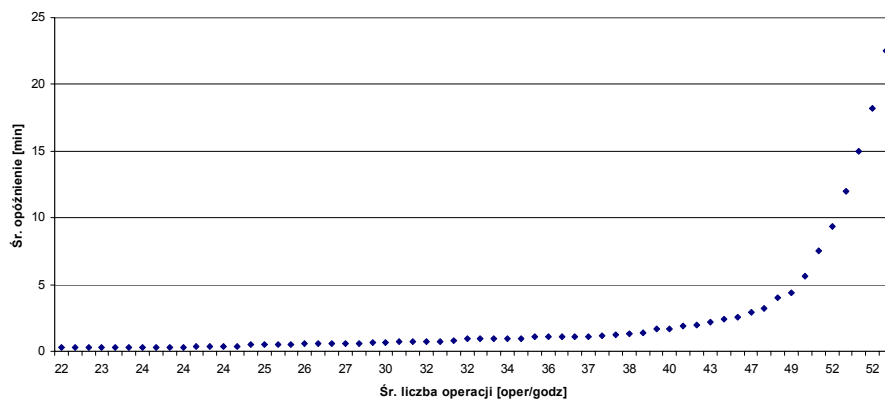


9. Sieciowy model masowej obsługi operacji elementarnych w rejonie portu lotniczego

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa (dyskretna)



10. Przykładowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu wykonania lądowania końcowego (dobiegu) na lotnisku o pojedynczej drodze startowej w Polsce



11. Przykładowy wynik badań symulacyjnych operacji CDA na kierunku 33 lotniska Okęcie

startowej przedstawiono na rysunku 7. Jest to podstawa do analizy czynnościowej ruchu lotniskowego. Konieczna jest też dobra identyfikacja procesów losowych operacji elementarnych.

W najbardziej rozbudowanej formie analizy czynnościowej wyróżniamy do 9 podstawowych operacji lotniskowego ruchu lotniczego (rys. 7).

Operacja **końcowego podejścia** do lądowania *apr* obejmuje fazę lądowania od czwartej mili morskiej (4 NM = ok. 7 400 m) do drugiej mili morskiej przed progiem drogi startowej w użyciu (2 NM = ok. 3 700 m).

Operacja **lądowania** (lądowania **początkowego**) *ld* obejmuje fazę lądowania od drugiej mili morskiej przed progiem (2 NM = ok. 3 700 m) do zjazdu z drogi startowej.

W bardziej rozbudowanych portach regionalnych lądowanie kończy oddzielna operacja **lądowania końcowego** *ld-e*. Za czas rozpoczęcia lądowania końcowego przyjmujemy czas minięcia drogi kołowania (*taxiway*) wykorzystywanej aktualnie do operacji startu *TX-dep*. Czas zakończenia operacji lądowania końcowego to czas zjazdu z drogi startowej *RWY-ex*.

Operacja **kołowania po lądowaniu** *txl* rozpoczyna się z chwilą opuszczenia drogi startowej a kończy z chwilą zatrzymania na płycie postojowej portu lotniczego. Kolejno następuje operacje **obsługi naziemnej** *ogs*.

Operacja **kołowania na start** zaczyna się po zgłoszeniu przez kapitana samolotu goto-

wości do startu i uzyskaniu zgody na kołowanie od kontrolera GND/TWR.

Operacja **startu początkowego** to w małym porcie regionalnym to zajęcie drogi startowej bez zgody na start *Cf-LU* (*Clear for line Up and wait*) Czas startu początkowego jest więc różnicą pomiędzy czasem zatrzymania na linii oczekiwania na zgodę na start *Cf-TO* a czasem otrzymania zgody na zajęcie drogi startowej *Cf-LU*. W takiej sytuacji operacja **startu końcowego** *off* to start do osiągnięcia wysokości 2 000 ft. Czas ten jest więc różnicą pomiędzy oszacowanym czasem osiągnięcia wysokości 2 000 ft dla danego typu samolotu a czasem otrzymania zgody na start *Cf-TO* (rys. 8).

Model sieciowy obsługi ruchu lotniczego jest więc prostym złożeniem operacji elementarnych (rys. 9)

Podsumowanie

Operacje lotnicze w ruchu lotniskowym w Polsce analizowane są od wielu lat. Ostatnio w latach 2008, 2010 i 2011 przeprowadzono kompleksowe, miesięczne rejestracje czasów wykonania operacji elementarnych ruchu lotniskowego w TWR Warszawa Okęcie. Zebrane dane pomiarowe analizowano pakietem STATGRAFIX różnych wersji otrzymując dyskretny histogramy, funkcje gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty elementarnych procesów losowych wykonania

operacji pokazanych na rysunku 9. Dyskretny dystrybuanty elementarnych procesów losowych czasu wykonania operacji elementarnych ruchu lotniskowego w różnych konfiguracjach nawigacyjnych pozwalają generować wartości losowe czasów wykonania dowolnych operacji. Utworzona baza pomiarowa pozwala na symulacyjne badania charakterystyk operacyjnych dowolnej konfiguracji portu lotniczego. Typową funkcję gęstości prawdopodobieństwa czasu wykonania operacji lądowania końcowego *ld-e* pokazano na rysunku 10. Przykładowy wynik badań symulacyjnych operacji płynnego podejścia do lądowania CDA pokazano na rysunku 11. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Anagnostakis I., Böhm D., Clarke J., Völckers U.: Runway Operations Planning and Control Sequencing and Scheduling, Dept. of Aeronautics & Astronautics, MIT, Cambridge 2003.
- [2] Ashford N., Wright P.: Airport Engineering, J. Wiley & Sons 1984.
- [3] Atkin J., Burke E., Greenwood J., Reeson D.: Departure Runway Scheduling at London Heathrow Airport Extended Abstract. School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham 2004.
- [4] [26] Callantine T. J., Lee P. U., Mercer J., Prevot T., Palmet E.: Air and Ground Simulation of Terminal-area FMS Arrivals with Airborne Spacing and Merging, USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar 2005.
- [5] ICAO: Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Aerodromes, ICAO XIV.
- [6] Horonjeff R., Mc Kelevey: Planning and Design of Airport. Mc Graw-Hill Book Company, New York NY 10020.
- [7] Malarski M.: Inżynieria ruchu lotniczego, OW PW, Warszawa 2006.
- [8] Malarski M., Modelowanie i analiza przepustowości lotniczej portu lotniczego, PN PW s. Transport z.71, str. 151-171, Warszawa 2009.
- [9] Malarski M. i zespół: Analiza przepustowości Portu Lotniczego im. Fryderyka Chopina w Warszawie - model airside dla TMA Warszawa, modele landside dla terminali, ULC, Warszawa 2008.
- [10] Malarski M. i zespół: Metoda oceny procesu obsługi ruchu lotniczego w rejonie lotniska, dokumentacja projektu badawczego MN 4T12C 033 26, Warszawa 2006.
- [11] Malarski M., Skorupski J.: Metoda modelowania pracy portu lotniczego wykorzystująca kongestję ruchu, Przepustowość polskich lotnisk komunikacyjnych w aspekcie realizacji programu HUB dla lotniska Warszawa Okęcie im. Fryderyka Chopina, str. 81-86. Warszawa 2002.
- [12] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych, WKiŁ, Warszawa 1999.