

PRZYKŁADOWY ALGORYTM AUTOMATYCZNEGO WYZNACZANIA TRASY PRZELOTU W PRZESTRZENI LOTÓW SWOBODNYCH

Obserwowany w ostatnich latach rozwój transportu lotniczego (załogowego oraz planowanego bezzałogowego [12]) powoduje, że liczba lotów obsługiwanych przez obecnie stosowany system planowania i kontroli przelotów IFR (Instrument Flight Rules - loty według wskazań przyrządów nawigacyjnych) zbliża się do swojej maksymalnej pojemności. Ośrodki naukowe, przewoźnicy, agencje odpowiedzialne za kontrolę ruchu lotniczego i podział przestrzeni lotniczej podejmują prace, w tym badania naukowe, zmierzające do zmiany sposobu organizacji ruchu lotniczego, którego ostatecznym celem ma być wprowadzenie przestrzeni lotów swobodnych [13]. Wspomniana zmiana wiąże się z koniecznością opracowania systemów, narzędzi w tym modeli i algorytmów umożliwiających automatyczne planowanie trasy przelotu jedynie na podstawie deklarowanych przez pilotów punktów początkowych i końcowych trasy.

W artykule na tle obecnego sposobu organizacji przestrzeni powietrznej oraz obowiązujących procedur planowania i deklarowania lotu, przedstawiono propozycje wprowadzenia zmian w kierunku dostosowania obecnych rozwiązań do koncepcji funkcjonowania przestrzeni lotów swobodnych.

Przedstawiono propozycję modelowania przestrzeni powietrznej oraz wykorzystujące te modele algorytmy automatycznego wyznaczania trasy przelotu samolotu przy założeniu, że jest to przestrzeń lotów swobodnych.

Opisano również koncepcję zmian zarządzania przestrzenią powietrzną oraz zaproponowano metodę jej realizacji. Przy czym, na wstępie należy podkreślić, że praca nie przedstawia gotowego, szczegółowego rozwiązania. Skupia się na wskazaniu kierunku zmian, proponując kierunki poszukiwań i dalszych prac badawczych.

WSTĘP

Procesy globalizacji, przenikające przez wszystkie strefy działalności człowieka, stały się jednym z czynników warunkujących niespotykaną dotąd intensywność rozwoju techniki i technologii. W tych warunkach, przy niezmiennie rosnącej liczbie przewożonych towarów i osób oraz przesyłanej informacji, pojawia się presja na nieustanne skracanie i doskonalenie tych procesów. Powyższe globalne trendy w połączeniu z przyspieszeniem wzrostu cywilizacyjnego przełożyły się na gwałtowny rozwój usług lotniczych związanych z przewozem towarów i osób. Jego początek datuje się na lata osiemdziesiąte ubiegłego wieku. W tej sytuacji naturalną była reakcja ze strony sektora lotniczego, której celem było dostosowanie się do zachodzących zmian. Istnieje bowiem ścisła zależność między tempem rozwoju transportu lotniczego i światowym wzrostem gospodarczym. Liderzy przemysłu i usług tego obszaru nie pozostali obojętni na narastający popyt. Nie bez powodu intensyfikację lotniczych przewozów pasażerskich w latach 1980 - 2011 szacuje się na 5% w skali roku względem lat ubiegłych, pomimo pojawiających się kryzysów militarnych oraz finansowych [7].

Gwałtowny rozwój lotnictwa cywilnego spowodował powstanie odrębnej dziedziny - **inżynierii ruchu lotniczego**. Do obszarów jej zainteresowań należą głównie: poprawienie efektywności lotniczych usług transportowych, zapewnienie bezwzględного bezpieczeństwa oraz sprawnego i ekonomicznego przemieszczania osób i towarów. Inżynieria ruchu lotniczego zajmuje się mechanizmami współdziałania ludzi (pilotów i kontrolerów ruchu), urządzeń i infrastruktury lotniczej (do której należą lotniska, sieć dróg lotniczych) oraz regulacji prawnych.

Jednym ze skutków obowiązujących w chwili obecnej regulacji jest sposób organizacji przestrzeni powietrznej. Na terenie wszystkich państw, stosujących powszechnie przyjęte regulacje, przestrzeń powietrzna została jednolicie zorganizowana. Jednocześnie, biorąc pod uwagę liczbę państw, które zdecydowały się na stosowanie w/w regulacji, można stwierdzić, że wykształcony został niemal ogólnosiątkowy system organizacji przestrzeni powietrznej.

Ze względu na wciąż rosnącą liczbę operacji lotniczych, plany związane z operacjami samolotów bezzałogowych i koniecznością zapewnienia im bezpieczeństwa [2], pojemność obecnie istniejącego i działającego systemu osiąga granicę swojej pojemności. Dlatego od kilkunastu lat trwają prace badawcze (teoretyczne oraz praktyczne) mające na celu zmianę istniejącego stanu rzeczy (np. projekty europejskie EPATS [11], SESAR [12], ERA [14]). Należy zauważyć, że nawet w przypadku znalezienia teoretycznego rozwiązania, jego szybkie praktyczne wprowadzenie w życie jest ograniczane i hamowane przez szereg czynników ekonomicznych i operacyjnych. Zbyt gwałtowne zmiany w tej dziedzinie mogą wpływać na bezpieczeństwo lotów. Dlatego wszystkie działania muszą być wprowadzane na drodze ewolucji, małymi krokami i być poprzedzone bardzo wnikliwymi analizami teoretycznymi i testami praktycznymi [4].

W pracy na tle ogólnego zarysu koncepcji przestrzeni lotów swobodnych [13] przedstawiono propozycję algorytmu, który może być zaimplementowany w centralnym systemie planowania lotów, do automatycznego planowania trasy przelotu samolotu. Przedstawiony algorytm będzie uwzględniał szereg czynników w tym między innymi: warunki atmosferycznych, dostępności przestrzeni oraz planowane natężenia ruchu na podstawie jedynie zadeklarowanych przez pilota punktów i czasów rozpoczęcia i zakończenia lotów.

Przy czym, na wstępie należy podkreślić, że praca nie przedstawia gotowego, szczegółowego rozwiązania. Skupia się na wskazaniu trendów, kierunków poszukiwań i dalszych prac badawczych, których

efektem w przyszłości może być wdrożenie i uruchomienie w pełni działającego systemu.

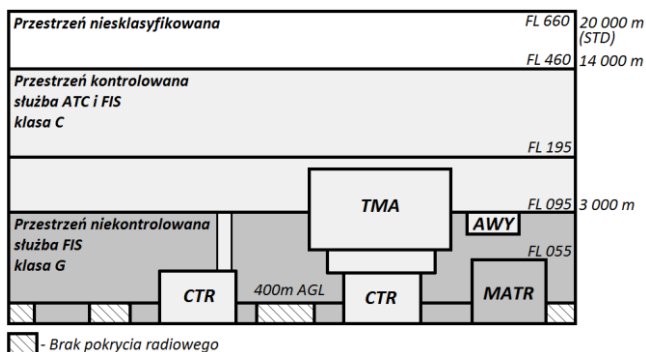
1. STAN OBECNY

Jednym z efektów działań ICAO (*International Civil Aviation Organization*) były zmiany w organizacji cywilnej przestrzeni powietrznej. Wydzielone zostały trójwymiarowe strefy, wewnątrz których nadzór pełnią odpowiednio wyspecjalizowane służby. W połowie lat osiemdziesiątych nagły rozwój transportu lotniczego wymusił podjęcie działań mających na celu usprawnienie systemu zarządzania ruchem lotniczym. Europejska organizacja Eurocontrol zrealizowała i wdrożyła koncepcję FUA (elastycznego użytkowania przestrzeni powietrznej), mającą obejmować obszar europejskiej przestrzeni powietrznej. W konsekwencji został opracowany program EATCHIP (*European Air Traffic Control Harmonisation and Integration Programme*), który miał realizować idee harmonizacji i integracji europejskich systemów kontroli ruchu lotniczego. Są to przede wszystkim: zwiększenie bezpieczeństwa, efektywniejsze wykorzystanie przestrzeni powietrznej, poprawa jakości oraz ekonomii realizowanych usług. Nowa koncepcja oparta została o podstawowe zasady:

- przestrzeń powietrzna powinna być traktowana jako wspólne dobro,
- przestrzeń powietrzna nigdy nie może służyć jednemu użytkownikowi,
- jakakolwiek segregacja przestrzeni może być jedynie tymczasowa.

Współcześnie, przestrzeń powietrzna państw ICAO jest podzielona na strefy oraz poziomy, które mogą charakteryzować się różną dostępnością oraz stopniem obsługi pilotów (Rys. 1).

Jest to uzależnione od sposobu wykorzystania określonego obszaru, np. strefy wykorzystywane podczas manewrów wojskowych (MRT, MATZ, MATR) są wyłączone lub dostęp do nich jest znacznie ograniczony. Przestrzeń kontrolowana klasy C (3000 m do 14000 m) jest obszarem, wewnątrz którego odbywa się regularny ruch lotniczy o największym natężeniu. Należą do niej również obszary przylotniskowe CTR i TMA (strefy o kształcie "odwróconego tortu zaczynające się od poziomu lotniska). Jej użytkownikom zapewniana jest bezpieczna wzajemna separacja, ciągły kontakt radiowy ze służbą kontroli ruchu lotniczego (służbą odpowiedzialną za bezpieczeństwo w tym obszarze) oraz dostęp do służby ALS (służba alarmowa) i FIS (służba informacji powietrznej). Poniżej znajduje się przestrzeń lotów swobodnych klasy G, w której odpowiedzialnością za bezpieczeństwo są obarczeni dowódcy statków powietrznych.



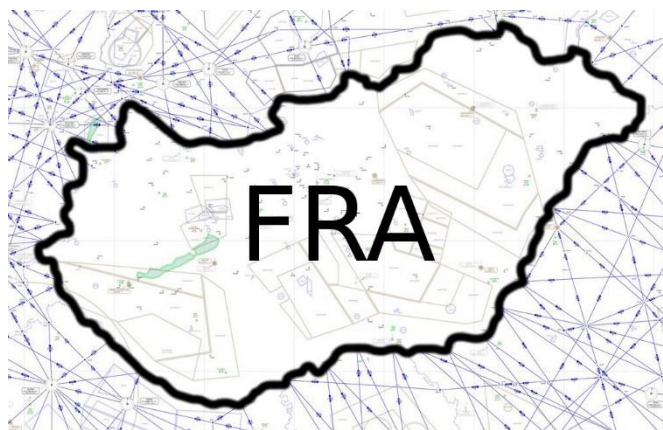
Rys. 1. Schemat organizacji polskiej przestrzeni powietrznej od 18.03.2014 [4].

Wybrane stałe elementy przestrzeni powietrznej:

- CTR/TMA strefa kontrolowana, obszar przylotniskowy,
 AWY sieć dróg lotniczych,
 CDR1 drogi warunkowe kat. 1,

- D strefy niebezpieczne,
 R strefy o ograniczonym ruchu lotniczym,
 P strefy zakazane,
 MATZ strefy lotniskowego ruchu lotniska wojskowego.
 Wybrane elastyczne elementy przestrzeni powietrznej:
 CDR2 drogi warunkowe kat. 2,
 CDR3 drogi warunkowe kat. 3,
 TSA strefy czasowo wydzielone,
 TFR korytarze dolotowe do TSA.

Innym elementem przestrzeni powietrznej są drogi lotnicze. Mają formę przestrzenną w kształcie korytarzy. Charakteryzują je punkty początkowe i końcowe o określonych współrzędnych geograficznych, a także górna i dolna granica wysokości oraz szerokość. Drogi lotnicze mogą się zbiegać w charakterystycznych węzłach. Statki powietrzne są zobowiązane przemieszczać się wzdłuż centralnej linii korytarza. Obecnie istnieje rozbudowana sieć dróg lotniczych, której głównym zadaniem jest uporządkowanie przepływu statków powietrznych (Rys. 2).



Rys. 2. Sieć dróg lotniczych otaczająca przestrzeń lotów swobodnych na terenie Węgier [8].

Istniejąca organizacja przestrzeni powietrznej determinuje odpowiednie procedury planowania i realizowania lotów. Przygotowywany, przez użytkownika przestrzeni powietrznej, plan lotu zawiera szereg precyzyjnych informacji o czasie oraz miejscu startu i lądowania, a także wybranej trasie przelotu, która musi bezwzględnie pokrywać się z odpowiednimi drogami lotniczymi. Należy wskazać drogę opuszczania obszaru przylotniskowego, węzeł, w którego obszarze dojdzie do zmiany kursu oraz oznaczenie nowo wybranej drogi lotniczej. W efekcie pilot deklaruje zbiór węzłów i odcinków dróg łączących lotniska początkowe i końcowe. Pilot planując przelot jest zobowiązany do przeanalizowania potencjalnej trasy z uwzględnieniem dostępności stref powietrznych [9].

Mając na uwadze ograniczoną skuteczność oraz poziom skomplikowania współczesnego systemu organizacji przestrzeni powietrznej, a także uwzględniając niedostateczną ergonomię procedur składania depeszy o planowanych operacjach lotniczych poszukiwane są nowe koncepcje zarządzania przestrzenią powietrzną - w tym koncepcja lotów swobodnych.

2. KONCEPCJA LOTÓW SWOBODNYCH

Rosnące wykorzystanie przestrzeni powietrznej może powodować zaburzenia wydolności w trzech obszarach ruchu lotniczego. Pierwszym obszarem, który ogranicza wzrost natężenia ruchu lotniczego są możliwości portów lotniczych. Współcześnie największe porty osiągają granice możliwości obsługując nawet kilkadziesiąt milionów pasażerów rocznie. Kolejnym, jest obsługa użytkowników

przestrzeni powietrznej przez kontrolerów ruchu lotniczego. Kontrolerzy koordynujący ruch statków powietrznych w strefach lotniskowych i przylotniskowych są narażeni na stres i zmęczenie. Nadmiar sytuacji absorbujących ich uwagę przyczynia się do obniżenia koncentracji i powoduje podniesienie ryzyka pojawienia się zaniedbań i błędów. Trzeci obszar to przepustowość sieci dróg lotniczych. Zagęszczenie statków powietrznych jest ograniczone z powodu zapewnianego bezpieczeństwa między nimi separacji pionowej i poziomej. Dynamiczny rozwój systemów nawigacyjnych otwiera możliwości zmniejszenia odległości między samolotami, ale jest to jedynie rozwiązanie tymczasowe.

W latach dziewięćdziesiątych pojawiła się koncepcja wprowadzenia przestrzeni lotów swobodnych (Free Routing Area) w miejsce sieci dróg lotniczych, zmieniająca sposób organizacji ruchu lotniczego. W ogólnym przypadku zakłada ona brak zdefiniowanych dróg lotniczych i punktów nawigacyjnych zostawiając użytkownikowi całkowitą swobodę w wyborze trasy przelotu [13]. Utrzymany zostaje jeszcze klasyczny sposób jej budowy z odcinków łączących kolejne punkty zwrotne zdefiniowane przez ich współrzędne geograficzne i wysokość nad geoidą.

Zmiana formy organizacji ruchu powietrznego może przynieść szereg pozytywnych skutków, które pozwoliłyby na dalszy dynamiczny rozwój transportu lotniczego. Przede wszystkim zastąpienie dróg lotniczych dowolnie planowanymi trasami wpłynęłoby korzystnie na ekonomię lotów. Możliwość realizowania przelotów wzdłuż możliwie najkrótszych trajektorii pozwoliłaby na redukcję kosztów i skrócenie czasów przelotów. Mniej skomplikowana trasa oznacza wzrost bezpieczeństwa przez zmniejszenie obciążenia pilotów, redukcję ich zmęczenia oraz osłabienia koncentracji w długotrwałych lotach.

Kolejnym ważnym aspektem jest ułatwienie zapewnienia bezpiecznej wzajemnej separacji statków powietrznych. Obecnie jednostki, które poruszają się wzdłuż wyznaczonych dróg powodują zagęszczenie ruchu w ich otoczeniu, jednocześnie pozostawiając niewykorzystane obszary przestrzeni powietrznej. Koncepcja lotów swobodnych umożliwiłaby pełniejsze jej zagospodarowanie. Wytaczanie tras przelotów bezpośrednio odpowiadających potrzebom użytkowników ruchu powietrznego spowoduje równomierne rozłożenie się ruchu lotniczego [13] (Rys. 2).

Zmiana sposobu organizacji ruchu lotniczego niesie ze sobą konieczność zmiany sposobu planowania i zgłaszania lotu. Jednym z proponowanych rozwiązań jest, aby w planie lotu przesyłanym do ośrodka planowania i zarządzania ruchem lotniczym deklarować jedynie punkt wlotowy i wylotowy przestrzeni lotów swobodnych (w najbardziej ogólnym przypadku mogą być rozumiane jako miejsca startu i lądowania). Na tej podstawie oraz biorąc pod uwagę szereg innych dostępnych danych dotyczących między innymi:

- prognozowanych warunków pogodowych na trasie przelotu,
- dostępności przestrzeni powietrznej w tym rejonie,
- planowanego natężenia ruchu,
- pojemności przestrzeni,
- charakterystyk eksploatacyjnych statku powietrznego,
- przyjętego kryterium optymalizacji,
- i innych,

system planowania lotu automatycznie wyznaczy trasę lotu.

Pomimo entuzjastycznej reakcji części sektora lotniczego, wciąż spornym jest wybór procedur i algorytmów, według których nowy system mógłby funkcjonować. Jedynymi problemami, które należy rozwiązać przed praktyczną implementacją w/w koncepcji jest wybór sposobu matematycznego opisu przestrzeni oraz metody, algorytmu wyznaczania trasy.

3. AUTOMATYCZNE WYZNACZANIE TRASY PRZELOTU

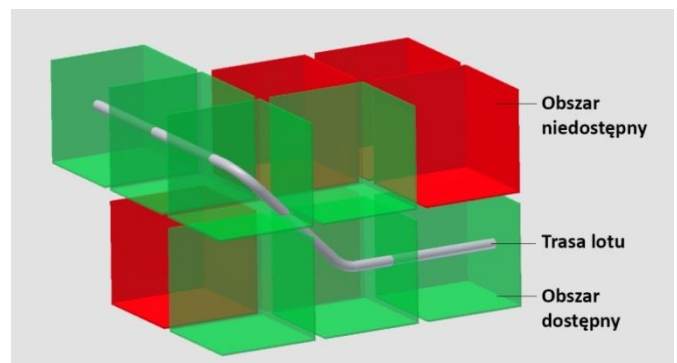
Proces automatycznego wyznaczania trasy przelotu samolotu w przestrzeni (FRA) będzie realizowany w oparciu o algorytm obliczeniowy wykorzystujący kryterium optymalizacji, którego budowa będzie przedmiotem oddzielnych badań. Właściwe działanie algorytmu będzie możliwe pod warunkiem posiadania odpowiedniego zbioru danych wejściowych i modeli obliczeniowych. Do chwili obecnej zidentyfikowano następujący minimalny zbiór modeli obliczeniowych:

- model przestrzeni powietrznej,
- model/opis trasy przelotu,
- właściwy model statku powietrznego.

Ponadto niezbędny będzie dostęp do informacji meteorologicznych oraz operacyjnych służb zarządzania, planowania i kontroli ruchu lotniczego.

3.1. Model przestrzeni powietrznej

Jedną z możliwych do zastosowania propozycji modelu przestrzeni może być koncepcja jej kwantyzacji. Zgodnie z nią przestrzeń opisana jest za pomocą przylegających do siebie, ściśle ją wypełniających brył nazywanych segmentami jednostkowymi (kwantami). W najprostszym przypadku są to sześciany, gdyż czworosiściany formenne, aby ściśle wypełnić objętość, muszą mieć różną orientację przestrzenną, komplikując tym samym obliczenia. Każdy segment w ogólnym przypadku jest zdefiniowany przez swoje położenie i orientację w przestrzeni (współrzędne geograficzne, wysokość jego środka nad geoidą, kąty orientacji przestrzennej: Rys. 3) oraz przypisany mu zbiór parametrów określający jego dostępność i przydatność dla użytkowników przestrzeni.



Rys. 3. Przykład modelowania fragmentu przestrzeni powietrznej za pomocą sześcianów oraz przebiegu w niej wyznaczonej trasy przelotu.

Mogą w nim być zawarte informacje o:

- warunkach pogodowych, w tym kierunku i prędkości wiatru,
- dostępności przestrzeni,
- obciążeniu przestrzeni w planowanym przedziale czasu,
- dopuszczalnych różnicach między planowanym a rzeczywistym czasem przylotu do punktu,
- planowanym czasie przelotu w tym obszarze,
- innych parametrach, wg potrzeb wybranej metody wyznaczania trasy i stosowanych kryteriów optymalizacji.

W takim przypadku każdy z wyznaczonych fragmentów przestrzeni może być opisany za pomocą struktury danych X jak w równaniu (1):

$$X = \{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, \dots, n_i\} \quad (1)$$

gdzie:

n_i - oznaczają struktury danych zawierające parametry opisujące fragment przestrzeni.

Należy podkreślić, że struktura X będzie determinowana przez czynniki, których analiza, zgodnie z przyjętym założeniem dotyczącym działania systemu, nie będzie spoczywać na dowódcach czy operatorach statków powietrznych. Zbiór tak utworzonych struktur będzie modelem przestrzeni powietrznej, wykorzystywanym przez system do automatycznego wyznaczenia trasy przelotu.

Kolejnym zagadnieniem związanym z przygotowaniem zdefiniowanego wyżej modelu przestrzeni jest wybór kształtu, rozmiaru i orientacji przestrzennej segmentu jednostkowego. Wspomniano, że mogą to być na przykład sześciiany (w przypadku modelu płaskiego kwadraty). Jednak jak zorientowane, w jaki sposób wyznaczyć długość ich boków i czy w całej przestrzeni rozmiar i kształt segmentu jednostkowego ma pozostać niezmienny? Niniejsza praca nie udzieli szczegółowej i wyczerpującej odpowiedzi na te i inne pytania. Będą one przedmiotem dalszych badań.

Obecnie można jedynie stwierdzić, że rozmiar, kształt i orientacja segmentu jednostkowego muszą umożliwić „zadawalająco dokładne” modelowanie przestrzeni oraz planowanie trasy, której realizacja będzie fizycznie możliwa przez statek powietrzny.

Budowa modelu dyskretnego

Zasady omówione w poprzednim rozdziale zastosujemy do budowy modelu przestrzeni przedstawionej na rysunku 4. Dla uproszczenia założono, że ruch lotniczy odbywa się na stałej wysokości. W efekcie będzie analizowana płaszczyzna. Do budowy jej modelu zastosowano kwadratowe segmenty jednostkowe, ułożone równolegle do równoleżników z pominięciem ich deformacji wynikającej z kształtu Ziemi.

Budowę modelu należy zacząć od pokrycia obszaru siatką kwadratów. Stosując tak zwaną „metodę z niedomiarem”, w skład modelu wejdą jedynie te elementy siatki, które całkowicie leżą wewnątrz lub na brzegu modelowanego obszaru. Wyjątek stanowią kwadraty zawierające założony punkty wlotowy i wylotowy, pomimo, iż nie są całkowicie zawarte w analizowanym obszarze.

Uwzględniając założenia przyjęte wyżej w niniejszym rozdziale, pewne fragmenty przestrzeni muszą być bezwzględnie wyłączone z procesu planowania w nich tras przelotu, ze względu na jej inne wykorzystanie lub panujące tam warunki atmosferyczne. Dlatego mogą wystąpić przypadki, że wyznaczony kwadrat jednostkowy częściowo pokrywa przestrzeń, w której można planować lot, a częściowo przestrzeń wyłączoną z planowania.

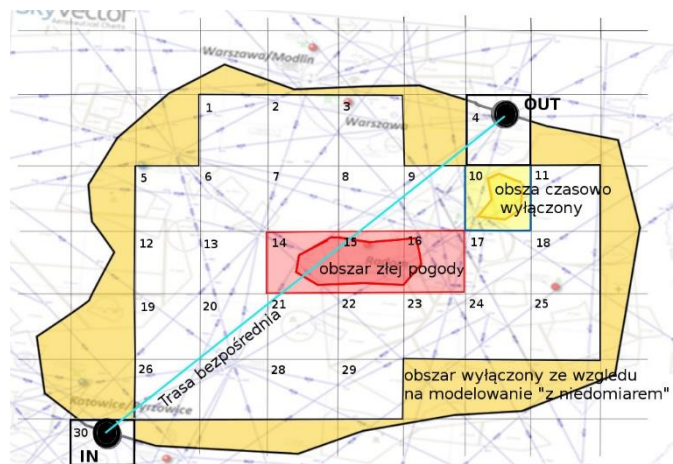
Model powinien również uwzględniać obszary czasowo wyłączone z regularnego ruchu lotniczego. Informacja o dostępności takiego obszaru dla planowanych przelotów będzie zawarta w strukturze X (równanie (1)).

W takich przypadkach ze względów bezpieczeństwa przyjęto, że jeżeli rozpatrywany kwadrat posiada część wspólną z przestrzenią wyłączoną z planowania, to jest on całkowicie niedostępny w procesie planowania trasy - modelowanie z niedomiarem.

Ze względu na przyjętą metodę modelowania pojawiają się różnice między kształtem rzeczywistej przestrzeni a jej modelem, jednak daje ona pewność, że opracowana trasa lotu będzie w całości znajdować się wewnątrz analizowanego obszaru oraz nie wystąpią konflikty z obszarami wyłączonymi z procesu planowania.

Obszary, które muszą być bezwzględnie wyłączone z ruchu są oznaczone na rysunku kolorem czerwonym, czasowo wyłączone kolorem żółtym, natomiast część powierzchni, która w wyniku zastosowanej metody nie weszła w skład modelu, zaznaczono kolorem pomarańczowym

Omawiany przypadek obrazuje również sytuację, gdy ze względu na kształt przestrzeni, rozmiar segmentu jednostkowego, znalezienie rozwiązania będzie wymagało więcej niż jednej iteracji przy zmianie rozmiaru (zmniejszenia) segmentu jednostkowego.



Rys. 4. Dwuwymiarowa reprezentacja graficzna przestrzeni lotów swobodnych zawierająca wydzielone segmenty.

Opis segmentów jednostkowych

Kolejnym etapem jest przygotowanie matematycznego opisu przestrzeni, w której będzie planowany lot. W tym celu posługując się konstrukcją zdefiniowaną w równaniu (1) tworzymy zbiór wektorów przypisanych do poszczególnych segmentów jednostkowych. Ich współrzędne będą miały następujące znaczenie i interpretację: n_1 - unikalny numer identyfikacyjny, np. kolejne liczby całkowite: 1, 2, 3 ... ;

- n_2 - wektor zawierający numery sąsiadujących segmentów. Pierwszy element oznacza przestrzeń w lewym górnym rogu, kolejne podawane są zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara. Numer zero oznacza, że nie ma innego segmentu w tym rejonie.
- n_3 - dwuelementowy wektor zawierający współrzędne geograficzne środka kwadratu
- n_4 - struktura zawierająca informacje o dostępności fragmentu przestrzeni w czasie. Np. wektor 12 elementów których wartości 1 lub 0 oznaczają odpowiedni dostępność lub niedostępność przestrzeni w okresie do 12 godzin od czasu rozpoczęcia lotu. Przy założeniu jednogodzinnego kroku dyskretyzacji. Wartości mogą wynikać z przewidywanych warunków pogodowych lub struktury przestrzeni powietrznej
- n_5 - wektor zawierający informacje o kierunku i prędkości wiatru.
- n_6 - wektor informujący o planowanym ruchu w tym rejonie. Podobnie jak w przypadku pozycji n_4 może to być wektor 12 liczb oznaczających planowane wykorzystanie przestrzeni względem zależności (2).

$$w = \frac{\text{planowana liczba lotów}}{\text{dopuszczalna liczba lotów}} \quad (2)$$

Umieszczając struktury danych X w wektorze P uzyskamy dyskretny model matematyczny przestrzeni powietrznej (3).

$$P = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

i - liczba segmentów przestrzeni.

Przykład

Przebieg przestrzeni przedstawiona na rysunku (Rys. 4) została zamodelowana za pomocą 28 kwadratów zawierających się w jej wnętrzu i dwóch zawierających punkt wlotowy IN i wylotowy OUT. W tym przypadku wektor P będzie się składał z 30 elementów będących strukturami danych X , Należy zwrócić uwagę że w przypadku

elementów nr 4 i 30 w strukturach ich element n_3 nie będzie odnosił się do środka segmentu tylko do zdefiniowanych punktów IN i OUT.

Załóżmy, że w kwadracie nr 10 (Rys. 4), którego środek posiada współrzędne geograficzne 21,000 st. długości geograficznej wschodniej i 51,500 stopnia szerokości geograficznej północnej, w czasie od 6 do 8 godziny od czasu wlotu w przestrzeń planowane są ćwiczenia wojskowe, wieje wiatr z kierunku zachodniego z prędkością 5,5 m/s zaplanowano już pewną liczbę lotów przy dopuszczalnej liczbie 16 na godzinę, wtedy struktura danych (1) przyjmie następujące wartości.

$$P(10) = \{$$

10;
 [0, 4, 0, 9, 11, 16, 17, 18];
 [21.000, 51.500];
 [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1];
 [270, 5.5];
 [2/16, 15/16, 8/16, 9/16, 0, 0, 0, 0/16, 1/16, 2/16, 7/16, 10/16];
 };

3.2. Opis trasy przelotu

Jednym z efektów działania systemu wykorzystującego do swojego działania algorytm prezentowany w niniejszej pracy, ma być gotowy plan lotu w formie umożliwiającej jego prawidłową realizację przez pilota lub system automatycznego sterowania statku powietrznego. W pracy zakłada się, że plan lotu będzie definiowany w przestrzeni 3D lub 2D. W przyszłości algorytm planowania zostanie rozszerzony o możliwość działania w przestrzeni 4-D (z uwzględnieniem czasów przelotów planowanych odcinków).

Wykorzystując powyższe założenie można przyjąć, że trasa będzie składać się z odcinków łączących punkty zwrotne, które w omawianym podejściu, będą zawsze pokrywały się ze środkami sześciątów - w przypadku płaskim kwadratów - modelujących przestrzeń powietrzną. Ponadto założono, że wyznaczana trasa musi przebiegać przez środki sąsiadujących kwadratów.

W takim przypadku trasa lotu może zostać opisana jako wektor T składająca się z j struktur X , jak w równaniu (4).

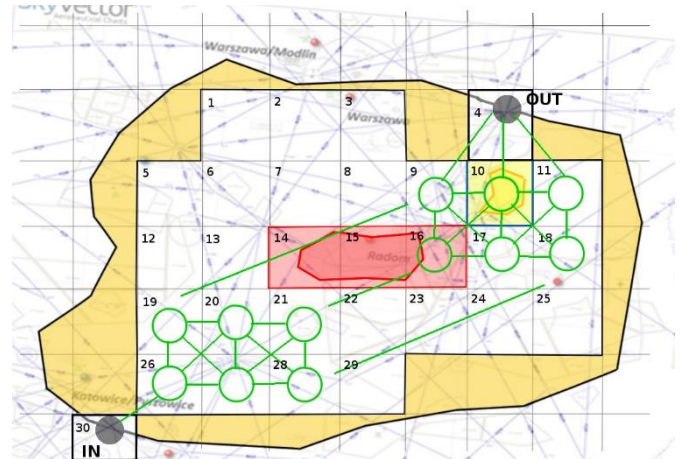
$$T = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

Elementami wektora T są wybrane elementy wektora P ułożone w kolejności odpowiadającej kolejnym punktom zwrotnym wyznaczonej trasy.

Metoda opisu trasy za pomocą punktów zwrotnych, mimo swojej prostoty, jest obecnie powszechnie i skutecznie stosowana. Rozwinięciem prezentowanej metody zmierzającym do optymalizacji wyznaczonej trasy pod względem jej długości może być rezygnacja z założenia, że trasa musi przechodzić przez środki sąsiadujących segmentów jednostkowych. W przyszłości mogą to być odcinki łuków i inne krzywe.

3.3. Wybór trasy

Zaproponowany w rozdziale 3.1 sposób modelowania przestrzeni powietrznej sprowadza zagadnienie wyboru (planowania) trasy do problemu optymalizacji grafowo-sieciowej. Węzły grafu znajdują się w środkach kwadratów. Łuki grafu prezentują odległości między środkami sąsiadujących segmentów (Rys. 5). Każdy węzeł połączony jest jedynie z węzłami znajdującymi się w sąsiadujących segmentach. Wyjątkami są punkty wlotowy i wylotowy. Nie znajdują się w środkach segmentów, jednak dostęp do nich jest możliwy tylko z segmentów sąsiednich.



Rys. 5. Dwuwymiarowa reprezentacja graficzna obszaru lotów zawierająca wydzielone segmenty.

Wartości przypisane łukom jak i wartości w wierzchołkach wyznaczane są na podstawie reguł, które obecnie nie są jeszcze precyzyjnie zdefiniowane. Ich opracowanie i analiza będą przedmiotem kolejnych prac.

Przykładowo, łukom grafu mogą zostać przypisane odległości między środkami sąsiadujących sześciątów lub czasy przelotu wyznaczone z uwzględnieniem kierunku i prędkości wiatru i inne. Wartości wierzchołków mogą być wyznaczane na podstawie reguły, której argumentami są elementy wektora X .

Do rozwiązania w/w problemu można zastosować którąś z powszechnie stosowanych metod. Jednak sposób rozwiązania tego zagadnienia nie jest tematem niniejszej pracy.

3.4. Model statku powietrznego

Mówiąc o modelu statku powietrznego należy zwrócić uwagę, że nie chodzi o zbiór równań opisujących dynamikę ruchu samolotu, jak w przypadku zagadnień związanych z układami automatycznego sterowania samolotem. Potrzebny jest model łączący w sobie podstawowe charakterystyki kinematyczne ruchu samolotu, parametry pracy zespołu napędowego, charakterystyki eksploatacyjne, parametry charakteryzujące operacje lotnicze wykonywane przez operatora oraz warunki atmosferyczne. Takie modele nazywane modelami BADA (Base of Aircraft Data) są opracowywane przez agencję zarządzającą ruchem lotniczym, linie lotnicze oraz producentów statków powietrznych [15].

4. PLAN LOTU

Opisana w pracy metoda automatycznego wyznaczania trasy przelotu w przestrzeni FRA jest odpowiedzią na zapotrzebowanie na takie rozwiązania w związku z planowanymi zmianami organizacji ruchu lotniczego na terenie Europy. Wymuszają one równoległy rozwój informatycznych systemów przygotowania i planowania lotów. Zgodnie z rozwijaną, w zadaniu badawczym „To Be Free” w ramach projektu SESAR, koncepcją planowane jest przeniesienie obowiązku wyznaczania trasy przelotu oraz generowania dokumentu planu lotu z pilota, operatora statku powietrznego na automatyczny system planowania lotów.

Opisane w rozdziale 3 propozycje zmian wpłyną na sposób definiowania przez użytkownika przestrzeni powietrznej, deklarowanej trasy przelotu. Obecnie do systemu należy wprowadzić precyzyjnie opisaną trasę. Obowiązkiem osoby zgłaszającej jest zapoznanie się i szczegółowa analiza prognoz pogody, dostępności sektorów przestrzeni. Często jest to kilkugodzinna praca, której efekt i tak może nie być zaakceptowany po weryfikacji złożonego wstępnego planu lotu.

Dodatkowym utrudnieniem jest brak informacji o planowanej zaletności poszczególnych sektorów, co podnosi poziom ryzyka, że plan lotu nie zostanie zaakceptowany.

Wdrożenie proponowanych zmian spowoduje, że plan lotu sprowadzi się do podania jedynie punktu startu, lądowania oraz wybranych charakterystyk operacyjnych i technicznych statku powietrznego. Zadaniem systemu będzie opracowanie szczegółowego planu lotu lub jego kilku wersji i przedstawienie go użytkownikowi do zatwierdzenia. W praktyce oznaczać to może na przykład dla lotu z Krakowa do Wrocławia zastąpienie zapisu (5) zapisem (6) w rubryce ROUTE (Rys. 6) lub całkowite pominięcie tej informacji, gdyż jest ona powtórzeniem zapisu z rubryki „16”.

Rys. 6. Fragment dokumentu planu lotu przeznaczony na opis trasy przelotu.

DCT KOTEK N133 PENEX/A040N180 VFR DCT (5)

DCT EPWR (6)

Działanie pilota zostanie ograniczone do podania jedynie punktu początkowego i końcowego przelotu. System planowania posiadając informacje o szeregu czynników wpływających na trasę przelotu wyznaczy ją i przekaże do właściwych służb zarządzających ruchem lotniczym. Rola operatora statku powietrznego sprowadzi się jedynie do jej akceptacji lub odrzucenia.

PODSUMOWANIE

Badania naukowe i działania praktyczne w zakresie inżynierii ruchu lotniczego będące odpowiedzią na nowe wyzwania stawiane przed sektorem lotniczym przynoszą szereg opracowań, mogących poprawić jakość usług transportu powietrznego. Zaproponowane przez autorów zmiany w sposobie deklarowania i wyznaczania trasy przelotu są zgodne z rozwijaną koncepcją przestrzeni lotów swobodnych. Ponadto jest bezpośrednim rozwinięciem idei elastycznego użytkownika przestrzeni powietrznej. Wiąże się z głównym nurtem ICAO, dotyczącym integracji międzynarodowej przestrzeni powietrznej. Jest w końcu odpowiedzią na niedostateczną skuteczność obecnego systemu. Uwzględnia wszystkie argumenty uzasadniające podążanie właśnie tym kierunkiem badań i rozwoju metod organizacji przestrzeni powietrznej.

Trzeba jednak pamiętać, że sektor lotniczy jest środowiskiem specyficznym, ponieważ ekstremalne warunki środowiskowe oraz restrykcyjne przepisy ograniczają rozwijanie i wdrażanie nowych rozwiązań. Wymaga to od inżynierów planowania na wielu płaszczyznach. Oprócz rozwijania koncepcji ważne jest również opracowywanie mechanizmów pozwalających na wdrażanie projektów do użytku powszechnego.

BIBLIOGRAFIA

1. Cook A., European Air Traffic Management: Principles, Practice, and Research, Ashgate, U.K. 2007.
2. Grzybowski P., Kordos D., Rzucidło P., Metody zapewnienia bezpieczeństwa z poziomu naziemnej stacji kontroli lotu, Konferencja - Bezzałogowe statki powietrzne w Polsce, Warszawa, 2012.
3. Mahalingam S., Air Traffic Control: Past, Present and Future Kaveri Books, U.K. 1999.
4. Malarski M., Inżynieria ruchu lotniczego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
5. Skorupski J., Praca zbiorowa pod redakcją, Współczesne problemy inżynierii ruchu lotniczego. Modele i metody, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
6. Wytyczne Nr 3 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 16 kwietnia 2014 r. w sprawie ogłoszenia wymagań ustanowionych przez Organizację Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) – Doc. 4444, „Dziennik Urzędowy Urzędu Lotnictwa Cywilnego” Warszawa, dnia 16 kwietnia 2014 r.
7. Tinseth Randy, Current market outlook 2011, Boeing Commercial Airplanes, 2011.
8. <https://skyvector.com/>
9. http://www.amc.pata.pl/?menu_lewe=mapy&lang=_pl
10. <https://www.eurocontrol.int/>
11. <http://epats.eu/>
12. <http://www.sesarju.eu/>
13. <http://www.eurocontrol.int/publications/european-free-route-air-space-developments> Free Route Airspace developments
14. <https://www.eda.europa.eu/info-hub/press-centre/latest-news/2016/02/11/new-project-to-facilitate-integration-of-rpas-into-european-airspace>.
15. <http://www.eurocontrol.int/services/bada>

The algorithm of automatic route generation at free routing airspace

A future growth of aviation transport is being started to be restricted by some existing, at this moment, regulations regarding airspace structure and flight planning rules. Aviation community has encountered some barrier stopping further development of this aviation industry's branch. The future development require some solutions improving system's capability and productivity must be found and deploy. There are national, European and worldwide scientific projects lunched to research new solutions which could improve the system.

The paper presents a concept of some amendments into flight planning procedures and propose the algorithm of automatic route generation related to so called Free Routing Airspace idea. The paper doesn't provide full, deployment-ready instruction regulation but focuses on general trends and point some directions of future research

Autorzy:

inż. **Marcin Pęczkowski** - Politechnika Rzeszowska, Katedra Awioniki i Sterowania
 dr hab. inż. **Tomasz Rogalski** - Politechnika Rzeszowska, Katedra Awioniki i Sterowania
 dr inż. **Grzegorz Kopecki** - Politechnika Rzeszowska, Katedra Awioniki i Sterowania