

# Wpływ dynamiki samolotu i jego stanu lotu na bezpieczeństwo wykonania manewru ominięcia ruchomych przeszkód

Jerzy Graffstein

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Centrum Technologii Kosmicznych, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

**Streszczenie:** Właściwe określenie istotnych czynników wpływających na przebieg wyliczanego manewru uniknięcia kolizji z ruchomymi przeszkodami jest niezbędne w celu zapewnienia bezpiecznego ominięcia ruchomej przeszkody. Jednocześnie w trakcie manewru omijania wymagane jest zachowanie żądanej separacji między samolotem a przeszkodami. Przedmiotem pracy jest analiza sposobu w jaki czynniki wpływają na przebieg manewru antykolizyjnego z uwzględnieniem deformacji trajektorii i zmian przebiegu odległości samolotu od wykrytych przeszkód. Skupiono się na wewnętrznych oddziaływaniach, które wynikają z istotnych zmian zachowania się samolotu. Rozważania zostały zilustrowane wybranymi wynikami z symulacji komputerowych typowych manewrów ominięcia przeszkód, poddanych negatywnym wpływom wybranych czynników. Zaproponowano wytyczne, które powinny umożliwić przeciwdziałanie niekorzystnym oddziaływaniom na realizację wyliczonego manewru.

**Słowa kluczowe:** unikanie kolizji, dynamika lotu, automatyczne sterowanie lotem, komputerowa symulacja lotu

## 1. Wprowadzenie

Lista czynników wpływających na przebieg omijania ruchomych przeszkód oraz zwiększających poziom zagrożenia kolizji lub zmniejszenie separacji poniżej żądanej wartości jest niezwykle długa. Wiele z nich to czynniki zewnętrzne związane z szeroką gamą scenariuszy i konfiguracji przeszkód. Nie mniej istotne są czynniki, które można ogólnie określić jako wewnętrzne czyli związane z możliwymi zachowaniami się samolotu. To zachowanie się wynika z dynamiki lotu obiektu oraz fazy lotu. Sposób ruchu samolotu od pewnego momentu  $t_0$  do  $t_k$  zależy nie tylko od jego dynamiki i sposobu jego sterowania ale również od historii jego ruchu sprzed niezbyt odległego czasu mierzono przed  $t_0$ . Lot samolotu składa się z typowych jego faz takich jak: start, przelot po zaplanowanej trasie oraz lądowanie lub bardziej specyficznych np. przejście z lotu pionowego do zawisu lub w odwrotną stronę. Innym elementem wpływającym na zmiany w sposobie ruchu samolotu jest zmiana w czasie lotu jego geometrii, masy i położenia środka ciężkości. Powody tych zmian oraz skutki ich występowania zostaną

opisane w dalszej części pracy, a niektóre z nich zostaną zilustrowane przykładami wyników z symulacji. Wszystkie opisane wyżej zagadnienia występują gdy uwzględniane są sytuacje ograniczonych możliwości technicznych detektorów przeszkód [1]. Jednym z niekorzystnych skutków tych ograniczeń są przypadki wykrywania przeszkód w stosunkowo niedużych odległościach. Może to powodować konieczność wykonania szybkiego manewru antykolizyjnego z zachowaniem ograniczonej do minimum separacji między przeszkodą a samolotem. Rozwiązania, które pozwalają na unikanie kolizji z ruchomymi przeszkodami znajdującymi się w bliskim otoczeniu samolotu różnią się od procedur stosowanych w lotnictwie cywilnym w ogólnie dostępnej przestrzeni lotniczej. Z tego względu zaproponowano w pracy specyficzne podejście z konieczności musi uwzględniać zagadnienia nie rozpatrywane w dostępnej przestrzeni lotniczej.

## 2. Wybrane definicje w relacji samolot – przeszkoda i wykrycie zagrożenia kolizją

W kontrolowanej przestrzeni powietrznej, w jakiej odbywają się najczęściej loty pasażerskich samolotów, mogą powstawać zagrożenia kolizji rozwiązywane przez decyzje pilotów zgodnie z poleceniami przesyłanymi przez obsługę naziemną w kontroli ruchu lotniczego [6, 9, 13]. Biorąc pod uwagę sytuacje, w których nie ma na pokładzie samolotu pilota i nie jest możliwa łączność z naziemną kontrolą przyjęto w pracy odmienne

### Autor korespondujący:

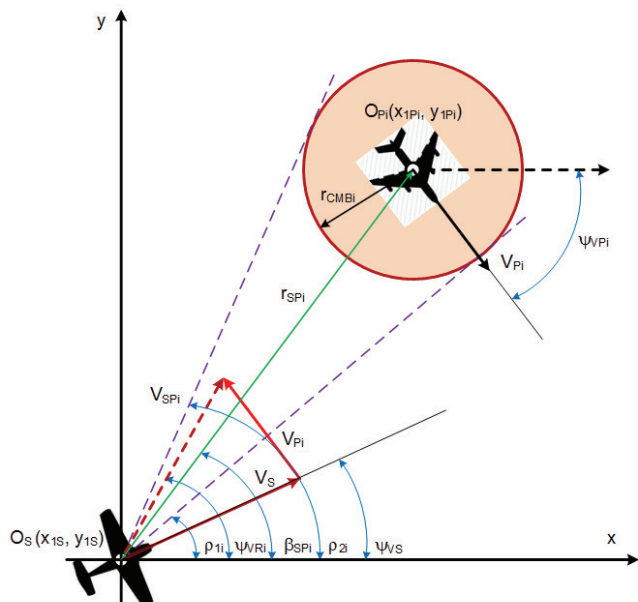
Jerzy Graffstein, Jerzy.Graffstein@ilot.lukasiewicz.gov.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 05.11.2021 r., przyjęty do druku 24.01.2022 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Zmienne opisujące układ samolot – przeszkoda  
 Fig. 1. Variables describing an aircraft – obstacle configuration

podejście uwzględniające podane w tym rozdziale założenia. Polega ono na autonomicznym przygotowaniu w pokładowym komputerze wszelkich niezbędnych danych i automatycznym podjęciu decyzji o sposobie znalezienia rozwiązania występującego konfliktu [3, 7, 8, 11].

Do dalszych rozważań przyjęto następujące założenia:

- Wykrywanie przeszkód i ich omijanie odbywa się tylko w przedniej półpłaszczyźnie.
- Rozważane jest stosunkowo bliskie otoczenie samolotu.
- Ze względu na możliwość wystąpienia deficytu czasu dopuszcza się mniejszą separację pomiędzy samolotem a ruchomymi przeszkodami w porównaniu do przyjętej w lotnictwie cywilnym.
- Niezbędne informacje o przeszkodach, znane są z dostateczną dobrą dokładnością i bez opóźnień.
- Uniknięcie kolizji i jej omięcie odbywa się bez negocjacji.
- Nie są uwzględniane przepisy w ruchu lotniczym.

Przedostatnie założenie dotyczące braku negocjacji podczas działań mających na celu uniknięcie kolizji oznacza, że kontrola ruchu lotniczego nie ingeruje w te działania i nie wskazuje na sposób rozwiązania problemu. Nie ma wymiany informacji między operatorem (pilotem) samolotu a pilotem (operatorem) przeszkód poruszających się w otoczeniu tego samolotu. Przyjmuje się, że przeszkody przez cały czas trwania manewru antykolizyjnego wykonują ruch w podobny sposób. Ostatnie założenie częściowo wynika z założenia przedostatniego i jest uzasadnione w sytuacjach związanych z nadrzędnością wykonania zadania, co występuje np. w sytuacjach samolotów bezzałogowych działających na obszarze konfliktu zbrojnego. Ocena bieżącej sytuacji zagrożenia wystąpienia kolizji z ruchomymi przeszkodami opiera się na następującym kryterium [2, 3]:

$$\Psi_{VRi} < \rho_{1i} \vee \Psi_{VRi} > \rho_{2i} \wedge r_{SPi} = \sqrt{(x_{1Pi} - x_{1S})^2 + (y_{1Pi} - y_{1S})^2} > r_{CMBi} \quad (1)$$

W dalszej części tego rozdziału zostaną podane podstawowe, matematyczne zależności opisujące wybrane zmienne [3, 4, 9] (Rys. 1) dla samolotu i przeszkody. Kąty stycznych do okręgu o promieniu  $r_{CMBi}$  wynoszą:

$$\rho_{1i}, \rho_{2i} = \beta_{SPi} \mp \arcsin\left(\frac{r_{CMBi}}{r_{SPi}}\right) \text{ i } \beta_{SPi} = 2 \beta_{0i} \quad (2)$$

gdzie  $\beta_{SPi}$  kąt patrzenia opisuje zależność:

$$\beta_{SPi} = \arctg\left(\frac{(y_{1Pi} - y_{1S})}{(x_{1Pi} - x_{1S})}\right) \quad (3)$$

Kąt wektora prędkości wypadkowej (samolotu i przeszkody) wynosi:

$$\Psi_{VRi} = \arctg\left(\frac{(\dot{y}_{1Si} - \dot{y}_{1Pi})}{(\dot{x}_{1Si} - \dot{x}_{1Pi})}\right) \quad (4)$$

Kąt wektora prędkości wypadkowej  $\Psi_{VRi}$  samolotu i przeszkody jest wyliczany dla prędkości jaką samolot uzyska po wykonaniu zakrętu lub innego manewru poprzedzającego manewr antykolizyjny. Okrąg o promieniu  $r_{CMBi}$  (jak w zależności (1) i (4)) jest figurą reprezentującą hipotetyczną, i-tą przeszkodę z charakterystycznym wymiarem stanowiącym sumę maksymalnego wymiaru samolotu, przeszkody i marginesu bezpieczeństwa [3, 4].

### 3. Wybrane czynniki wpływające na bezpieczeństwo przebiegu manewru omijania ruchomych przeszkód

Występowanie ruchomych przeszkód w otoczeniu samolotu wiąże się z zagrożeniem kolizji z jedną lub więcej niż jedną przeszkodą. W celu uniknięcia zderzenia z ruchomą przeszkodą lub zapobieżeniu zbliżeniu się jej na niebezpiecznie małą odległość, samolot powinien wykonać manewr antykolizyjny. Do tego celu konieczna jest nieprzerwana obserwacja wielu obiektów oraz identyfikacja ich charakterystycznych parametrów. Należy brać pod uwagę istnienie kombinacji parametrów opisujących te przeszkody takie, jak ich liczba, wymiary geometryczne, sposób ruchu, wzajemne usytuowanie powodujące, że wykonanie wspomnianego manewru jest obciążone podwyższonym poziomem zagrożenia bezpieczeństwa lotu. Dodatkowe zagrożenia dla tego bezpieczeństwa mogą wynikać z ograniczeń czasu przejścia z aktualnego stanu lotu do stanu jaki jest wymagany podczas wykonania manewru antykolizyjnego. Może to prowadzić do osiągnięcia lub przekroczenia dopuszczalnych wartości zmiennych stanu lotu dla danego typu samolotu. W pracy nie są rozważane dodatkowe negatywne skutki wynikające z braku dostępu do dokładnych pomiarów parametrów opisujących ruch i geometrię przeszkód. Przyjęto, że występujące opóźnienia w pomiarze wspomnianych parametrów nie wpływają na przebieg omijania ruchomych przeszkód. Poniżej zostaną opisane wymienione wcześniej czynniki, ich rodzaje i przykłady oraz niektóre skutki ich występowania.

Zwiększenie poziomu niebezpieczeństwa lotu i związane z tym podwyższenie stopnia trudności określenia przebiegu manewru uniknięcia kolizji zależy ogólnie, między innymi od następujących czynników:

1. Stan lotu samolotu różny od ustalonego krótko przed wykonaniem manewrów antykolizyjnych.
2. Fazy lotu, w których samolot zmienia sposób swojego ruchu i reakcje na jego sterowanie.
3. Przyjęcie istotnych uproszczeń modelu dynamiki lotu samolotu do wyznaczenia przebiegu manewru antykolizyjnego.
4. Zmiana charakterystyk dynamicznych samolotu podczas lotu wynikająca ze zmiany jego geometrii i rozkładu masy.

Bardziej szczegółowe przykłady sposobu oddziaływania wymienionych czynników oraz niektóre przyczyny ich występowania:

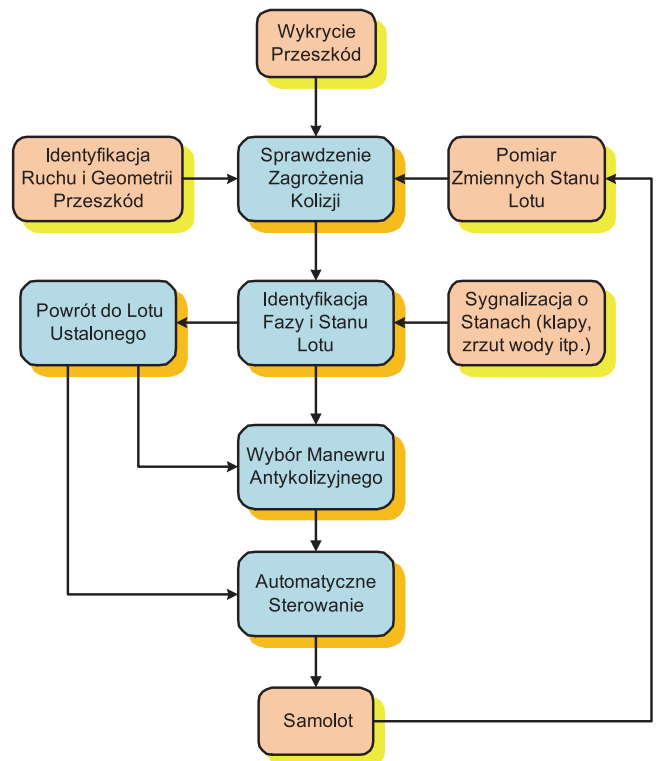
1. Zmiana zakrętu w przeciwnym kierunku do już wykonywanego (dla różnych prędkości lotu i różnych prędkości zakrętu). Powoduje wydłużenie czasu osiągnięcia zadanej wartości kąta odchylenia samolotu.
2. Konieczność zwiększenia wysokości gdy samolot wcześniej znajdował się w fazie opadania (szczególnie dla małej prędkości i małej wysokości lotu). Jest przyczyną zwiększenia czasu do uzyskania zadanej wysokości.
3. Wykonanie głębokiego zakrętu (z dużym kątem przechylenia) przy dużej zmianie kąta odchylenia samolotu i jednoczesnym deficycie siły ciągu może powodować utratę wysokości i zagrożenie osiągnięcia niebezpiecznej lub zakazanej wysokości.
4. Wykonanie manewru zakrętu podczas podejścia do lądowania (przy małej prędkości lotu i małej wysokości oraz konieczności utrzymania żądanej prędkości opadania). To powoduje niebezpieczeństwo przekroczenia dopuszczalnej prędkości opadania niezgodnie z wymaganiami procedury podejścia do lądowania oraz może doprowadzić do lotu na niebezpiecznie małej wysokości lotu.
5. Przejście z lotu pionowego do poziomego dla samolotów z pionowym startem w sposób istotny i niekorzystnie zmienia warunki wykonywania manewru antykolizyjnego.
6. Istotne zmiany geometrii samolotu powodujące zmianę jego dynamiki występują w typowych sytuacjach takich, jak wypuszczenie klap w czasie lądowania lub zmiana skosu skrzydeł w niektórych wojskowych samolotach. Mogą również wystąpić szczególne przypadki, np. częściowe oblodzenie samolotu zmieniające wartości siły i momentów sił aerodynamicznych.
7. Zmiana masy samolotu oraz przesunięcie środka ciężkości w czasie lotu w wyniku zużycia paliwa lub zużycia wody (dla samolotów do gaszenia pożarów) może powodować znaczne efekty w sposobie ruchu samolotu.

W dalszej części pracy zostanie przedstawiony wpływ wybranych czynników (spośród wyżej wymienionych) na podwyższenie poziomu niebezpieczeństwa kolizji z ruchomymi przeszkodami. W większości przypadków sposobem uniknięcia tego niekorzystnego wpływu polega na jego odpowiednim uwzględnieniu w procesie wyznaczania przebiegu manewru antykolizyjnego.

#### 4. Wytyczne umożliwiające zapobieganie niekorzystnym wpływom zmian dynamiki

W rozważaniach nad sposobem redukcji niekorzystnego wpływu zmian dynamiki lotu najczęściej istotne jest nie źródło tych zmian ale stopień oddziaływania na przebieg manewru. Pierwszym krokiem do oceny jak duże zmiany występują w zachowaniu samolotu należy zidentyfikować (zgodnie z pokazanym schematem – Rys. 2) rodzaj tych zmian.

W drugim kroku niezbędne jest oszacowanie jego wpływu na wyliczony manewr. Do przeprowadzenia tej identyfikacji niezbędna jest analiza przebiegu zmiennych stanu samolotu oraz odczyt informacji z pokładowych urządzeń typu: sygnalizacja o wysuniętych klapach i ostrzeżenie o wystąpieniu oblodzenia oraz np. sygnalizacja dokonania zrzutu wody w samolocie do gaszenia pożaru. Dla sformułowanych wcześniej założeń jednym z decydujących parametrów w doborze przebiegu manewru antykolizyjnego jest wyliczony czas jego rozpoczęcia. Jego defi-



Rys. 2. Schemat struktury omijania ruchomych przeszkód z uwzględnieniem stanu samolotu

Fig. 2. Structure of avoiding moving obstacles with adverse impacts of flight state

cyt powoduje konieczność wykonania gwałtownego manewru przypadkach mogą stanowić granicę zagrożenia zniszczenia mniej odpowiedzialnych elementów konstrukcji samolotu i jego wyposażenia. Manewr antykolizyjny powinien rozpocząć się nie później niż gdy odległość samolotu od przeszkody osiągnie wartość zgodnie z poniższą nierównością:

$$r_{SPi} < V_{SPi} (\omega_{zakl} / |\rho_{2i} - \rho_{1i}|) + V_{SPi} (a_i + b_i \Phi_{z0}) \quad (5)$$

gdzie:  $\omega_{zakl}$  – przyjęta prędkość kątowa zakrętu w manewrze antykolizyjnym,  $\Phi_{z0}$  – kąt przechylenia samolotu w czasie manewru poprzedzającego manewr antykolizyjny,

Wartości współczynników:  $a_i = 0,0345$  i  $b_i = 0,219$  występujących w zależności (3) stanowią wyliczone na podstawie symulacji przejścia samolotu (dla podanego dalej typu) z zakrętu do lotu poziomego dla prędkości przelotowej  $V_s = 50$  m/s. Wielkości tych współczynników są uzyskane dla lotu sterowanego zgodnie z propozycją zamieszczoną m.in. w [5]. Dla różnych wartości prędkości lotu od podana wyżej należy wyliczać czas wyjścia z zakrętu  $t_z$  na podstawie zależności w formie wielomianowej typu:

$$t_z(\Phi_{z0}, V_s) = a_i + b_i \Phi_{z0} + c_i V_s + d_i V_s \Phi_{z0}, \quad (6)$$

dla której niezbędne jest wyznaczenie czterech współczynników uwzględniających różne wielkości prędkości lotu i różne wartości kąta przechylenia w trakcie wykonywania zakrętu.

Prędkość zbliżania się samolotu do przeszkody  $V_{SPi}$  wynosi:

$$V_{SPi} = V_s \cos|\Psi_{SV} - \beta_{SPi}| + V_{Pi} \cos|\Psi_{Pi} - \beta_{SPi}| \quad (7)$$

Relację między prędkością zakrętu a kątem przechylenia wynikającą z dynamiki lotu i dla wyżej wymienionych zakrętów określone są następującą zależnością:

$$\omega_{zakl} = g \operatorname{tg}(\Phi_{zi}) / V_s \quad (8)$$

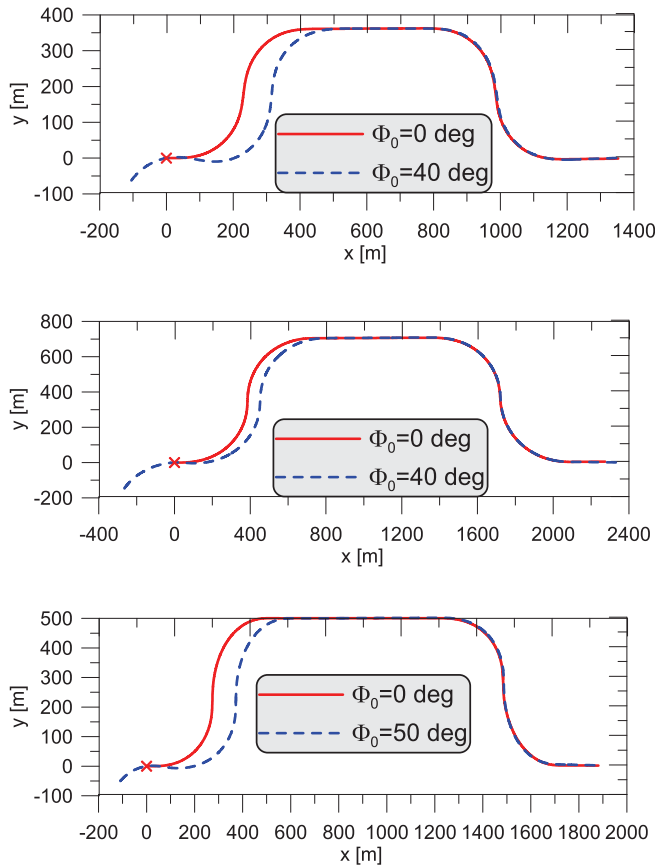
gdzie:  $\Phi_{zi}$  – kąt przechylenia samolotu w czasie manewru antykolizyjnego,

Zgodnie z przedstawionym schematem (Rys. 2) dobór manewru dokonywany jest na podstawie danych dotyczących sposobu ruchu przeszkód i samolotu. Gdy wyliczony czas rozpoczęcia manewru jest dostatecznie długi i możliwe jest w tym czasie sprowadzenie samolotu do lotu w stanie ustalonym to wyznaczony wcześniej manewr antykolizyjny pozostaje bez zmian. W przeciwnym razie niezbędne jest powtórzenie wyliczeń przebiegu manewru z uwzględnieniem wcześniej wykonywanych ruchów samolotu. Powinny być uwzględnione przede wszystkim takie parametry ruchu jak prędkość liniowa oraz kąty położenia samolotu.

W przypadku, gdy nie dysponujemy zapasem czasu czyli rozpoczęcie manewru jest możliwe później niż to wynika z zależności (5) to niezbędne jest wykorzystanie zależności opisującej zadany kąt wektora prędkości samolotu różny w zależności od kierunku zakrętu:

dla zakrętu w lewo:

$$\Psi_{VS} = \rho_{li} - \arcsin[\sin(\rho_{li} - \Psi_{VPi})V_{Pi}/V_s], \quad (9)$$

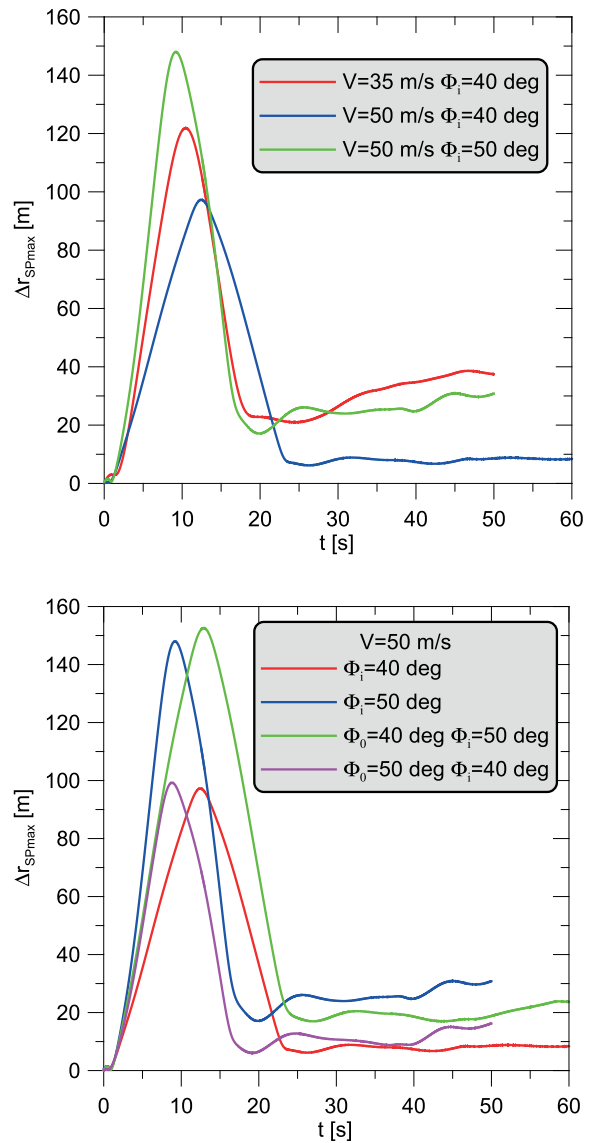


Rys. 3. Przebieg trajektorii manewru antykolizyjnego bez wpływu zakrętu ( $\Phi_0 = 0^\circ$ ) i z wpływem dla przechylenia  $\Phi_0 = 40^\circ$  i  $\Phi_0 = 50^\circ$  dla prędkości lotu  $V_s = 35$  m/s (a) i  $V_s = 50$  m/s (b i c)  
Fig. 3. Trajectory of an anti-collision manoeuvre without influence of a turn and with influence of a turn for a roll angle  $\Phi_0 = 40^\circ$  and  $\Phi_0 = 50^\circ$  and for a velocity  $V_s = 35$  m/s (a) and  $V_s = 50$  m/s (b and c)

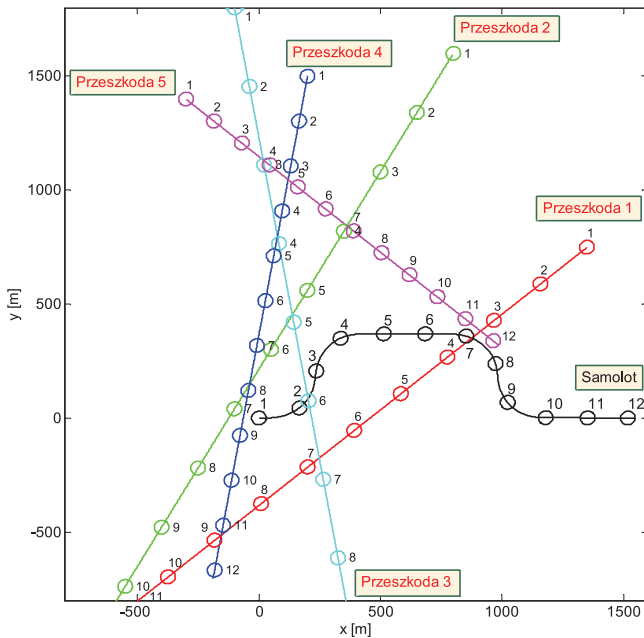
dla zakrętu w prawo:

$$\Psi_{VS} = \rho_{li} + 2\beta_{oi} - \arcsin[\sin(\rho_{li} + 2\beta_{oi} - \Psi_{VPi})V_{Pi}/V_s]. \quad (10)$$

Jest to zagadnienie złożone i według wiedzy autora nie było przedmiotem analiz czy systemowych rozwiązań w dostępnych publikacjach. Odrębnego traktowania wymagają sytuacje dotyczące niektórych faz lotu, np. w trakcie startu i podejścia do lądowania, podczas których samolot leci w konfiguracji z wychylonymi klapami [5]. Dotyczy to także rzadziej występujących sytuacji, w których samolot ulega oblodzeniu (zachodzą zmiany charakterystyk aerodynamicznych i masowych). Obejmuje to jeszcze inne przypadki dotyczące zrzutu ze zbiorników wody (gaszenie pożarów) lub paliwa (w sytuacjach awaryjnego lądowania). W tych wypadkach podczas występowaniu zagrożenia niezbędne jest (od razu po uzyskaniu wspomnianych informacji) oszacowanie, jak duże są zmiany w zachowaniu nowego manewru antykolizyjnego z ewentualnym uwzględnieniem



Rys. 4. Odległości od samolotu pięciu przeszkód i przeszkody zastępczej z przebiegiem jej promienia dla SC-1  
Fig. 4. Distance from an aircraft to five obstacles and to alternative obstacle with the time – history of its radius for SC-1

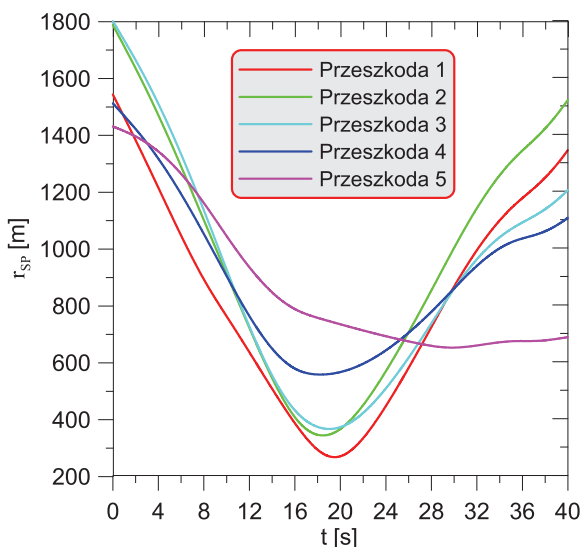


Rys. 5. Trajektorie samolotu i przeszkód  
Fig. 5. Trajectory of an aircraft and obstacles

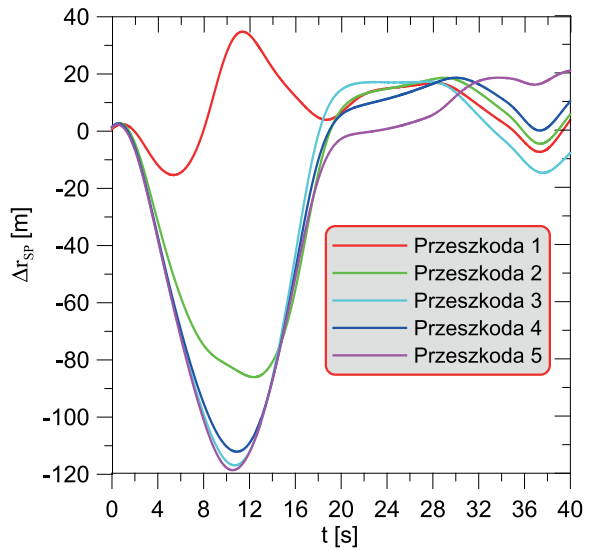
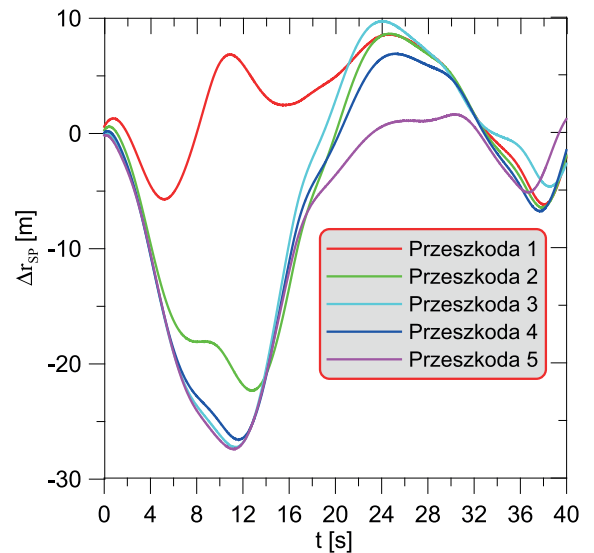
niem zmian w modelu dynamiki ruchu samolotu obejmujących jednocześnie zmiany charakterystyk aerodynamicznych i masowych lub tylko jednego z wymienionych rodzajów charakterystyk. W tym wypadku wykonywane jest sprawdzanie czasów rozpoczęcia manewru i czasu doprowadzenia samolotu do lotu ustalonego dla nowych warunków lotu.

## 5. Przykłady symulacji wpływu wybranych czynników na przebieg wybranych manewrów

W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki symulacji oddziaływania zmian dynamiki lotu na przebieg manewru antykolizyjnego. Wybrano przykłady oddziaływania na prze-



Rys. 6. Odległości samolotu od pięciu przeszkód bez oddziaływań  
Fig. 6. Distance from an aircraft to obstacles without any impact



Rys. 7. Różnice odległości samolotu i przeszkód wynikające z oddziaływania na manewr antykolizyjny: 1) wcześniejszego zakrętu, 2) wcześniejszego zakrętu i wypuszczenia klap  
Fig. 7. Differences in distance from an aircraft to obstacles caused by impact on an anti-collision manoeuvre of 1) former turn, 2) former turn and extending flaps

bieg manewru antykolizyjnego wcześniej wykonywany zakręt oraz wpływ wychylenia klap (powodujące zmiany charakterystyk aerodynamicznych samolotu opisane między innymi w pracach [5, 11, 12] i działanie układu napędowego, którego uproszczony model zawierają prace [11, 12].

Na Rys. 3 przedstawiono deformację trajektorii manewru antykolizyjnego pod wpływem wcześniej realizowanego zakrętu z kątem przechylenia  $\Phi_0 = 40^\circ$  i  $\Phi_0 = 50^\circ$  w locie z prędkościami  $V_s = 35$  m/s oraz  $V_s = 50$  m/s. Analiza przedstawionych wykresów (Rys. 3) pozwala na wyciągnięcie następującego wniosku: dla większych kątów przechylenia  $\Phi_0$  podczas zakrętu przed manewrem oraz dla mniejszych prędkości lotu występuje większa deformacja trajektorii. Wymienioną tendencję zwiększenia zmian przebiegu ruchu samolotu potwierdzają wykresy (Rys. 4) pokazujące odległości między kolejnymi punktami z oddziaływaniami i bez oddziaływania. Maksymalne różnice położenia samolotu w kolejnych punktach lotu osiągają wartość w zależności od parametrów lotu w granicach od 96 m do 152 m. Wspomniane maksymalne wartości występują w przedziale  $<8$  s,  $13$  s> od rozpoczęcia manewru antykolizyjnego

Ten przedział czasu jest istotny z punktu widzenia omija ruchomych przeszkód, ponieważ jak pokazano w podanym przykładzie na wykresie (Rys. 6), samolot szybko zbliża się do większości przeszkód. Prześledzenie bezpośredniego wpływu badanych czynników na zmiany w omijaniu ruchomych przeszkód jest możliwe dla wybranego powyżej przykładu scenariusza (Rys. 5) ruchu omawianych obiektów. Występuje w nim pięć ruchomych przeszkód przemieszczających się ze stałymi ale różniącymi się między sobą prędkościami z przedziału  $<50 \text{ m/s}, 80 \text{ m/s}>$ . Wszystkie poruszały się ze stałymi ale różnymi kierunkami z przedziału  $<-120^\circ, 140^\circ>$ . Samolot leciał ze stałą prędkością  $50 \text{ m/s}$  na stałej wysokości  $200 \text{ m}$  i wykonywał manewr omijania (rys. 5) zmieniając maksymalnie kurs lotu o kąt odchylenia równy  $87^\circ$ . Do symulacji wykorzystano nieliniowy, matematyczny model dynamiki lotu samolotu typu I-23 Manager opisany układem równań różniczkowych zwyczajnych [11, 12]. Rozwiązywanie tych równań uzyskano wykorzystując procedurę biblioteczną MATLAB Rungego-Kutty czwartego rzędu z krokiem całkowania  $dt = 0,01 \text{ s}$ . W trakcie manewru antykolizyjnego odległości samolotu miały przebieg pokazany na rys. 6. Dla większości przeszkód minimalne odległości samolotu od przeszkód wystąpiły w przedziale  $<18 \text{ s}, 20 \text{ s}>$ . Przebiegi zmian odległości samolotu od przeszkód spowodowane wcześniejszym zakretem oraz dodatkowo brakiem uwzględnienia wpływu wysuniętych klap i działania układu napędowego przedstawiono na Rys. 7 (wykres 1 i 2). Porównując oba wykresy widoczny jest znaczny efekt kumulacji wpływu trzech wymienionych czynników na zmiany odległości pomiędzy wspomnianymi obiektami. Wpływ wcześniej wykonywanego zakretem powoduje w rozpatrywanym przypadku maksymalną zmianę odległości wynoszącą  $28 \text{ m}$ . Oddziaływanie wszystkich trzech wyżej wspomnianych czynników spowodowało dużo większą różnicę, która maksymalnie wyniosła  $120 \text{ m}$ .

## 6. Wnioski

Przedstawiony materiał i wyniki symulacji numerycznej wpływu wybranych czynników na przebieg manewrów omijania ruchomych przeszkód pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

Rozpoczęcie manewru antykolizyjnego w trakcie wykonywania przez samolot zakretem skutkuje zniekształceniem trajektorii tego manewru w stopniu zależnym od kąta przechylenia samolotu w zakręcie i od postępowej prędkości lotu.

Wybrany, przykładowy scenariusz ruchu omawianych obiektów potwierdza wpływ wychylenia klap i działania układu napędowego na zmiany odległości samolotu od przeszkód.

Występuje trudna do oszacowania (na obecnym etapie badań) kumulacja efektu kilku jednocześnie występujących czynników.

Złożonym zagadnieniem jest określenie kryteriów decyzji o wylczeniu nowego manewru antykolizyjnego.

Przedstawiona analiza przebiegu manewru antykolizyjnego wymaga wykonania dalszych badań dla szeregu różnych czynników związanych z dynamiką lotu i dla różnych scenariuszy.

## Bibliografia

- Graffstein J., *Functioning of air anti-collision system during test flight*, "Aviation", Vol. 18, No. 1, 2014, 44–51, DOI: 10.3846/16487788.2014.865945.
- Graffstein J., *Manewry wykonywane przez samolot podczas omijania ruchomej przeszkody dla wybranych scenariuszy*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 19, Nr 2, 2015, 19–24, DOI: 10.14313/PAR\_216/19.
- Graffstein J., *Sposób wyboru optymalnej trajektorii lotu manewru antykolizyjnego realizowanego w otoczeniu ruchomych przeszkód*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 22, Nr 4, 2018, 5–11, DOI: 10.14313/PAR\_230/5.
- Graffstein J., *Selected aspects of automatic maneuver control to avoid moving obstacles resulting from the simulation analysis of the course of aircraft movement*, Advances in Intelligent Systems and Computing, "Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques", Vol. 440, 2016, 127–139.
- Graffstein J., *Symulacja przebiegu automatycznie sterowanego manewru omijania ruchomej przeszkody w warunkach podejścia do lądowania*, „Mechanika w Lotnictwie”, PTMTiS, 2016, 113–125.
- Jung T., Piera M.A., Ruiz O.S., *A causal model to explore the ACAS induced collisions*, "Journal Aerospace Engineering", Vol. 228, No. 10, 2015, 1735–1748, DOI: 10.1177/0954410014537242.
- Lin C.E., Wu Y.-Y., *Collision avoidance solution for low-altitude flights*, "Journal Aerospace Engineering", Vol. 225, No. 1, 2011, 779–790, DOI: 10.1177/0954410011399211.
- Lin Z., Castano L., Mortimer E., Xu H., *Fast 3D collision avoidance algorithm for fixed wing UAS*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 97, 2019, 577–604, DOI: 10.1007/s10846-019-01037-7.
- Orefice M., Di Vito V., *Aircraft automatic collision avoidance using spiral geometric approach*, International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology (ICASAT), "International Scholarly and Scientific Research & Innovation", 2016, 705–712.
- Paielli R.A., *Modeling maneuver dynamics in air traffic conflict resolution*, "Journal of Guidance, Control, and Dynamics", Vol. 26, No. 3, 2003, 407–415.
- Phillips W.F., *Mechanics of Flight*, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey 2010.
- Stevens B.L., Levis F.L., *Aircraft Control and Simulation*. J. Wiley & Sons, Inc., 2016.
- Tang J., Piera M.A., Baruwa O.T., *A discrete-event modeling approach for the analysis of TCAS-induced collisions with different pilot response times*, "Journal Aerospace Engineering", Vol. 229, No. 13, 2015, 2416–2428, DOI: 10.1177/0954410015577147.

# The Influence of Airplane's Dynamics and Its' State of Flight on Safety of an Evasive Manoeuvre Performed to Avoid Moving Obstacles

**Abstract:** The exact identification of essential factors affecting the course of evasive manoeuvre, that has been computed to avoid a collision with moving obstacles, is necessary to ensure a safe passing by a moving obstacle. At the same time, during the evasive manoeuvre the pre-defined separation between the airplane and obstacles is required. The matter of presented work is defined as the analysis of influence of factors on execution of anti collision manoeuvre taking into account deformation of flight trajectory and changes of time histories of distance from the airplane to detected obstacles. Attention has been focused on internal interactions, resulting from the essential changes of the airplane's behaviour. Discussion has been illustrated by selected results of computer simulations, executed for typical manoeuvres performed to avoid obstacles, while affected by adverse impacts of selected factors. The appropriate guidelines have been proposed, that should counteract these adverse effects on realisation of computed manoeuvre.

**Keywords:** collision avoidance, flight dynamics, flight control, numerical simulation



## dr inż. Jerzy Graffstein

jerzy.graffstein@ilot.edu.pl

ORCID: 0000-0002-9329-8648

Adiunkt w pionie Centrum Technologii Kosmicznych Instytutu Lotnictwa. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia modelowania dynamiki ruchu obiektów latających, automatyczne sterowania lotem wzdłuż zadanej trajektorii, oraz zagadnienia autonomicznych systemów antykolizyjnych w zastosowaniach lotniczych.

