

dr hab. inż. Sławomir Michalak, prof. ITWL
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
Zakład Awioniki
ul. Ks. Bolesława 6
01-494 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: WYKORZYSTANIE METODY POZYCJONOWANIA SBAS
W PROCEDURZE PODEJŚCIA DO LĄDOWANIA STATKU
POWIETRZNEGO

Autor rozprawy: mgr inż. Magda MROZIK

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Janusz ĆWIKLAK, prof. LAW

Promotor pomocniczy: dr inż. Kamil KRASUSKI

1. PODSTAWA OPRACOWANIA RECENZJI

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej, dr. hab. inż. Marcina Staniek, prof. PŚ, znak RDILT.512.12.2022, z dnia 06.10.2022 r., uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 22 września 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej oraz załączonej do nich rozprawy.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa liczy 140 stron oraz 7 stron załącznika. Poza tekstem zawiera 81 rysunków i 33 tabele, natomiast w załączniku zamieszczono wydruk programu, jak wynika z analizy tekstu rozprawy, napisanego w języku SciLab. Praca podzielona została na 9 zasadniczych rozdziałów uzupełnionych o spis treści, wykaz skrótów i akronimów, wstęp, zakończenie, spis rysunków oraz spis tabel. Całość opatrzone streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz bibliografią liczącą 103 pozycje, w tym 27 pozycji autorów zagranicznych.

Trzy pierwsze rozdziały stanowią wprowadzenie do problematyki, której poświęcona jest rozprawa.

Rozdział pierwszy zawiera ogólną charakterystykę nawigacji obszarowej w zestawieniu z klasycznymi zasadami nawigowania oraz koncepcją nawigacji uwzględniającej charakterystyki (tzw. osiągi) statku powietrznego.

W rozdziale drugim Autorka klasyfikuje globalne systemy satelitarne i systemy wspomagające,

a także wymienia podstawowe rodzaje ich błędów. Charakteryzuje satelitarny system wspomagający (SBAS) ze szczególnym uwzględnieniem zasadniczych dla przedmiotu rozprawy systemów, tj. EGNOS i SDCM. Na podstawie Załącznika 10 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym (ICAO) definiuje wymagania stawiane systemom nawigacji satelitarnej wraz z systemami wspomagającymi. *Trzeci rozdział* poświęcony jest omówieniu, klasyfikacji oraz scharakteryzowaniu procedur podejścia do lądowania zgodnie z dokumentem Doc-8168 „Operacje statków powietrznych”. Szczególną uwagę Doktorantka zwróciła na procedury podejścia wg wskazań przyrządów, a zwłaszcza z wykorzystaniem systemów GNSS.

W *rozdziale czwartym* zawarto skrótowe informacje o wybranych pracach badawczych dotyczących pozycjonowania statków powietrznych na etapie podejścia do lądowania z wykorzystaniem systemów nawigacji satelitarnej ze wsparciem SBAS, zrealizowanych zarówno w Polsce, jak i za granicą, natomiast w *rozdziale piątym* sprecyzowano postulowane w rozprawie podejście polegające na łącznym wykorzystaniu dwóch systemów wspomagających EGNOS+SDCM oraz sformułowano cel i tezę rozprawy.

Rozdział szósty stanowi wstęp teoretyczny, wraz z wykorzystywanym aparatem matematycznym, do zaplanowanych przez Autorkę badań modelowych nad możliwością i oceną wykorzystania hybrydowego (EGNOS+SDCM) wspomaganie nawigacji satelitarnej w procedurze instrumentalnego podejścia do lądowania.

W *rozdziale siódmym* przedstawiono wyniki badań w locie systemów SBAS, przeprowadzonych przez Lotniczą Akademię Wojskową i Uniwersytet Warmińsko-Mazurski. Szczegółowo omówiono jedyny lot testowy z rejestracją danych zarówno z systemu EGNOS, jak i SDCM, które zostały wykorzystane przez Autorkę do badań modelowych zaproponowanego przez siebie rozwiązania. Przedstawiono poszczególne etapy pracy, poczynając od lotu testowego, poprzez konwersję zarejestrowanych danych, po omówienie wykorzystywanego do obliczeń programu TRKLIB v.2.4.3, wraz ze szczegółowym omówieniem jego okien konfiguracyjnych.

Rozdział ósmy zawiera wyniki obliczeń, w tym uzyskane parametry charakteryzujące dokładność wyznaczania pozycji statku powietrznego w przestrzeni trójwymiarowej (a konkretnie średnie błędy poszczególnych składowych, odchylenia standardowe), a także – wg rozumienia i metodologii przyjętej przez Autorkę – dostępność, ciągłość i wiarygodność informacji pozyskiwanej z systemu GNSS z korekcją EGNOS+SDCM, przy zaproponowanym przez Autorkę sposobie wyliczania współczynników do wyznaczania hybrydowych składowych, a co za tym idzie – pozycji hybrydowej statku powietrznego.

W *rozdziale dziewiątym* Autorka porównuje uzyskane przez siebie wyniki obliczeń z ich odpowiednikami uzyskanymi przy zastosowaniu średniej arytmetycznej poprawek z systemów EGNOS i SDCM, z wynikami przy wykorzystaniu poprawek EGNOS jako wyłącznego systemu SBAS oraz z rekomendacjami zawartymi w Załączniku 10 do konwencji ICAO. Zamieszcza także zestawienie porównawcze wyników dla zaproponowanej przez siebie metody obliczeń z wynikami zaczerpniętymi z literatury. Ponadto dla porównania Doktorantka zamieściła wyniki analogicznych obliczeń przeprowadzonych dla drugiego odbiornika (Trimble Alloy) zamontowanego na samolocie, na którym wykonywano badania, a także dla odbiornika AsteRx-m2 UAS zabudowanego na platformie BSP.

W *Zakończeniu* Autorka dokonuje podsumowania wyników przeprowadzonych obliczeń i analiz oraz zamieszcza wyciągnięte na ich podstawie wnioski. Niestety, nie ze wszystkimi spośród nich mogą się zgodzić.

W mojej ocenie układ i struktura rozprawy nie budzą zastrzeżeń, kolejne jej rozdziały tworzą logiczną i spójną całość, zachowano właściwe proporcje pomiędzy poszczególnymi częściami rozprawy.

3. OCENA WYBORU PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

Tematyka rozprawy doktorskiej koncentruje się wokół utrzymania i poprawy bezpieczeństwa w transporcie lotniczym dzięki zapewnieniu odpowiednio wysokiej jakości nawigacji bazującej na radiotechnicznych pomocach nawigacyjnych. Spośród systemów radiotechnicznych w swoich analizach Autorka skupiła swoją uwagę na systemach nawigacji satelitarnej GNSS, a w szczególności systemach GPS i GLONASS wraz z satelitarnymi wspomagającymi EGNOS i SDCM oraz ich wykorzystaniu w procedurze podejścia do lądowania z prowadzeniem pionowym APV.

Spośród wszystkich faz lotu (start, wznoszenie, przelot po trasie itd.), w ujęciu statystycznym, podejście do lądowania i lądowanie obarczone są największym ryzykiem. Jeśli dodatkowo uwzględnić dynamiczny rozwój branży lotniczej (lotnictwo pasażerskie, transportowe, dyspozycyjne, prywatne, sportowe, specjalne, po części także BSP), a co za tym idzie wzrost natężenia ruchu lotniczego oraz liczby wykonywanych operacji lotniczych – jasnym staje się znaczenie precyzyjnej nawigacji w kontekście zapewnienia jak największej przepustowości przy zachowaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Wymienione powyżej czynniki spowodowały także konieczność nowelizacji procedur lotniczych, w tym również procedur podejścia do lądowania. Z uwagi na stosunkowo wysokie koszty oraz trudności logistyczno-techniczne związane z implementacją klasycznych procedur podejścia precyzyjnego, wykorzystujących systemy ILS i MLS, a także bardzo szerokie wykorzystywanie satelitarnych systemów nawigacyjnych jako głównego źródła informacji o pozycji statku powietrznego, systemy instrumentalnego podejścia do lądowania bazujące na danych z GNSS zyskały szczególne znaczenie. Jednak dla zapewnienia wymaganej dokładności pozycjonowania, zwłaszcza w płaszczyźnie pionowej, konieczne jest zastosowanie systemów wspomagających, dostarczających dane korekcyjne, co pozwala na wyeliminowanie lub znaczną minimalizację błędów określania pozycji, a także podniesienie wiarygodności danych nawigacyjnych.

Dlatego też tematykę podjętą w dysertacji przez Panią mgr inż. Magdę Mroziak uważam za istotną i aktualną, a przyjęty kierunek badań za uzasadniony, odpowiadający potrzebom lotnictwa i możliwościom współczesnych systemów nawigacyjnych.

4. ELEMENTY STANOWIĄCE WŁASNY, ORYGINALNY WKŁAD DOKTORANTKI

W swojej rozprawie Doktorantka zajmuje się zagadnieniem poprawy dokładności wyznaczania pozycji statku powietrznego przez systemy GNSS dzięki wykorzystaniu poprawek pozyskiwanych z satelitarnych systemów wspomagających. O ile system EGNOS jest dość szczegółowo opisany, a w literaturze można znaleźć wiele pozycji dotyczących badań jego właściwości i parametrów w rozmaitych aspektach, to literatura dotycząca rosyjskiego systemu SDCM jest stosunkowo skromna. Dlatego też należy docenić wykazanie przez Autorkę, że system GPS+SDCM może stworzyć alternatywne rozwiązanie dla rozpowszechnionego w Europie systemu GPS+EGNOS. Tym bardziej oryginalnym podejściem jest badanie systemu hybrydowego, łącznie wykorzystującego dane z obu omawianych systemów wspomagających, tj. EGNOS+SDCM. Za twórczy pierwiastek recenzowanej pracy można także uznać postulowane przez Autorkę zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu wyliczania hybrydowych składowych określających położenie statku powietrznego, uwzględniającego

liczbę satelitów współpracujących z każdym z systemów wspomagających. Również dość szerokie i wieloaspektowe analizy porównawcze różnych konfiguracji przedmiotowych systemów mogą stanowić własny wkład wniesiony przez Doktorantkę w rozwój wielosegmentowych systemów nawigacji satelitarnej.

5. SPOSTRZEŻENIA I UWAGI KRYTYCZNE

Pod względem typograficznym i estetycznym rozprawę doktorską Pani mgr inż. Magdy Mrozik oceniam pozytywnie. Jednak w czasie lektury moją uwagę zwróciła mała dbałość Autorki o jasność i jednoznaczność formułowanych treści. Wyraża się ona w pokaźnej liczbie spostrzeżonych przeze mnie błędów i uwag, których szczegółowy wykaz przekazałem Doktorantce. Są to błędy różnego rodzaju i „kalibru”. Prym wiodą tzw. „literówki”, błędy przestankowe oraz gramatyczne, np. „użyć standardową procedurę” (str. 20⁷), „bazującym o dodatkowe wyposażenie” (26¹⁵) i in. Nie brakuje także niezręczności językowych (np. „promień okręgu jako podstawy figury walca” – 35¹⁰, „Lądowanie do lotniska EPOD nastąpiło dla pasa startowego 27L” – 82⁷), niedopowiedzeń (np. „współczynnik zmiany pary wodnej”(?), „wskaźnik temperatury” – 59¹², „stałe współczynniki” – 59¹¹ – zapewne chodzi o przyspieszenie ziemskie i uniwersalną stałą gazową) oraz skrótów myślowych (np. „średnia wartość lotu wzdłuż osi B” – 79⁹, „poprawę wyznaczenia współrzędnych samolotu” – 15²³). W dysertacji napotkałem także sformułowania niespójne wewnętrznie, np. „poprzez **dokładność** rozumie się **błąd**” (34₂), współczynniki HPL i VPL w jednym miejscu nazywane są „parametrami wiarygodności” (65₄), w kolejnym „wiarygodnościami pozycjonowania” (99, Rys. 8.7. i 8.8), a w następnym „poziomami wiarygodności” (110, Tabela 9.1), przy czym żadna z tych nazw nie jest prawidłowa. Autorka także bardzo konsekwentnie używa swego rodzaju oksymoronu „płaszczyzna 3D”, dopiero w ostatnim rozdziale pracy przyznaje, że chodzi o **przestrzeń** 3D. Ponadto Doktorantka bardzo niefrasobliwie podchodzi do zapisu formalnego równań. Nie zachowuje ogólnie przyjętej notacji, wymagającej rozróżnienia zmiennych skalarnych i macierzowych, zapisuje np. wyznacznik macierzy w postaci $[A]$ zamiast ogólnie przyjętego $|A|$, elementy macierzy w nawiasach okrągłych zamiast kwadratowych. Znacznie utrudnia to zrozumienie i analizę wzorów, a także wywołuje wiele wątpliwości interpretacyjnych (np. str. 60, równanie (6.2)). Należy także zauważyć, że wiele wykresów zamieszczonych w dysertacji, szczególnie w kluczowej jej części, tj. rozdziałach 8 i 9, jest bardzo mało czytelnych z uwagi na bardzo dużą liczbę danych pomiarowych, przez co nie mają praktycznie żadnej wartości dla analizy. Celowe byłoby znalezienie innego sposobu ich prezentacji, aby wyeksponować istotne informacje. Za przykład może tu posłużyć Rys. 9.4 (str. 105). Wg mnie lepszym rozwiązaniem byłoby pokazanie na wykresie **różnicy** pomiędzy przebiegami. Dodatkowo zamieszczenie wprowadzających niezgodności danych zapisanych w tekście z pokazanymi na rysunkach, np. przedział czasu podany na str. 80⁹ nie zgadza się z pokazanym na Rys. 7.22-7.25, średnia wartość błędu składowej h podana na str. 93² już „na oko” jest wyraźnie zaniżona w stosunku do Rys. 8.1, wartości współczynników podanych w tekście na str. 93 w żaden sposób nie dadzą się dopasować do Rys. 8.2, a „wartość odchylenia standardowego” nie może wynosić „od 0,03 m do 0,62 m” (94⁹), skoro maksymalna wartość rzędnej na wykresie pokazanym na Rys. 8.3 wynosi 0,24.

Wymienione powyżej niedociągnięcia mogą świadczyć o dużym pośpiechu i deficycie czasu w trakcie przygotowywania rozprawy i – aczkolwiek utrudniają lekturę oraz analizę treści zawartych w dysertacji – to nie mają większego wpływu na jej wartość merytoryczną. Jest jednak grupa bardziej istotnych zastrzeżeń i uwag, wymagających przedyskutowania, lub co najmniej komentarza ze strony Doktorantki:

1. Proszę o podanie przyjętych w rozprawie i zgodnych z literaturą definicji dokładności, ciągłości, wiarygodności i dostępności usług.
2. W jaki sposób należy interpretować wartość wymaganej ciągłości wg Tabeli 2.3 w konfrontacji z danymi z Aneksu 10 [2], zwłaszcza uwzględniając podane w nim wymaganie ciągłości dla operacji trasowych? Jak należy rozumieć miano ciągłości?
3. Str. 58₃ – w jaki sposób Autorka wyznacza współrzędne X,Y,Z z pojedynczego równania (6.1)? I w jakim układzie współrzędnych?
4. Str. 62, równania (6.6) – jeśli współczynnik wyraża się równaniem w postaci $y = \frac{1}{x}$, to czy jest to współczynnik **liniowy**?
5. Str. 64⁸ – w jaki sposób przeliczono wartości kątowe B i L na marę liniową (metry)?
6. Str. 65, równania (6.13)–(6.14), str. 109, równania (9.1)–(9.4), – proszę o uzasadnienie takiego sposobu liczenia dostępności i ciągłości;
Str. 129, pkt. 6– proszę o uzasadnienie stwierdzenia, że parametry związane z **niezawodnością** systemu, takie jak ciągłość i dostępność, są zależne od sposobu wyliczania wartości średniej wyników pomiarów. Czy zmienia się struktura niezawodnościowa systemu?
7. 84⁷ – „wyznaczono także współczynnik rozmycia precyzji (...) PDOP” – w jaki sposób, wg jakiego wzoru?
8. Str. 98⁶ – skąd zaczerpnięto te informacje? Jak należy interpretować zamieszczone wzory?
9. Str. 105₅ – „W przypadku modelu średniej arytmetycznej wartości współczynników liniowych wynoszą: $\alpha_E = \alpha_S = 0,5$ ”, a na str. 109⁸ – „W przypadku zastosowania modelu średniej arytmetycznej, współczynniki liniowe przyjmują wartość $\alpha_E = \alpha_S = 1$ ”. Jakie zatem wartości współczynników przyjęto do obliczeń, czy też były one w każdym przypadku inne? Jeśli tak, to dlaczego?
10. Str. 111, Tabela 9.2. – Nawet jeśli przyjąć, że w wierszu 3 Tabeli podano ryzyko utraty ciągłości, to wynosi ono od $69,93 \times 10^{-6}$ do 599×10^{-6} , czyli **nie spełnia** wymagań podanych w Załączniku 10 [2] (8×10^{-6}). Tym samym nieuzasadnione jest stwierdzenie „wszystkie otrzymane wyniki ciągłości spełniają rekomendacje techniczne ICAO” (str. 124₈) oraz wniosek na str. 129, pkt. 8.
11. Str. 112, Tabela 9.3. – wnioski są co najmniej dyskusyjne i wymagają wyjaśnień; np. w Lp.2, „dokładność” współrzędnej L określona przez Autorkę wynosi od -1,62 m do 0,4 m (co daje rozpiętość 2,02 m), zaś dla porównywanego eksperymentu „dokładność” wynosi od 0,1 do 1,2 m, czyli błąd jest wyraźnie mniejszy.
12. Str. 114₁ – „wartość ciągłości zależy od czasu trwania eksperymentu badawczego”, str. 115, Tabela 9.5. – „parametr ciągłości jest obliczany w funkcji czasu” – proszę o podanie tej funkcji (zależności).

6. OCENA ROZPRAWY I WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując, uważam, że Pani mgr inż. Magda Mrozik przedstawiła oryginalne i poprawne rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego, mieszczącego się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Rozprawa posiada potencjał aplikacyjny i świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki. Autorka wykazała się także posiadaniem ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport w wystarczającym zakresie.

Stwierdzam, że pomimo wątpliwości, uwag i błędów zawartych w recenzowanej rozprawie można ją uznać za spełniającą wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw 2017, poz. 1789 z późn. zm.)

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy Pani mgr inż. Magdy Mrozik pt. „Wykorzystanie metody pozycjonowania SBAS w procedurze podejścia do lądowania statku powietrznego” do publicznej obrony.

Tym niemniej uważam za celowe wprowadzenie poprawek (np. w formie erraty), przynajmniej w egzemplarzu archiwalnym Rozprawy doktorskiej, zwłaszcza jeśli chodzi zamieszczone w niej błędne rysunki, definicje oraz równania, gdyż w sposób zasadniczy zniekształcają one zapisane treści.

Stanisław Michalek