

Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI

Profesor Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza JACEWICZA

p.t. „DYNAMIKA I ALGORYTMY STEROWANIA RAKIET W RÓŻNYCH FAZACH LOTU PRZY UŻYCIU SILNIKÓW KOREKCYJNYCH NA PALIWO STAŁE”

Recenzję sporządzono na podstawie pisma RNDIM/11/4/2021 z dnia 27.04.2021 od Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Jacewicza pod tytułem „Dynamika i algorytmy sterowania rakiet w różnych fazach lotu przy użyciu silników korekcyjnych na paliwo stałe” zawiera trzynaście rozdziałów, streszczenie, spis oznaczeń oraz wykaz literatury. Przedstawiona została na 485 stronach, zaś wykaz zacytowanej literatury liczy 437 pozycji.

Rozdział 1 „Wstęp”, zawiera krótkie omówienie tematyki pracy, która obejmuje dwa obszary:

- redukcję rozrzutu pocisków klasy ziemia-ziemia przeznaczonych dla artylerii raketowej,
- metodę tzw. „miękkiego” pionowego startu rakiet wykorzystującego silniki gazodynamiczne – z ang. „soft”.

W dalszej części rozdziału znajduje się uzasadnienie podjęcia się przez Autora realizacji tego tematu oraz omówienie zakresu i celu pracy.

Tezę pracy sformułowano w postaci: „silniki korekcyjne na paliwo stałe o impulsowym sposobie działania pozwalają efektywnie i z wymaganą precyzją sterować obiektami o napędzie raketowym w różnych fazach lotu”. Została ona podzielona na kilka zagadnień szczegółowych:

1. Zależność pomiędzy zastosowaniem silników korekcyjnych na paliwo stałe do sterowania rakiet a rozrzutem, w porównaniu do rakiet niesterowanych.
2. Dobór wartości impulsu właściwego silnika korekcyjnego i czasu jego włączenia podczas naprowadzania na cel.
3. Możliwość wysterowania obrotu rakiety podczas startu „miękkiego” za pomocą dwu silników korekcyjnych.
4. Wpływ braku stabilizacji rakiety w kanale przechylenia na jej obrót nad wyrzutnią.
5. Czynniki determinujące powtarzalność parametrów „miękkiego” startu rakiety.
6. Określenie poprawnej sekwencji włączania silników podczas „miękkiego” startu.

Część końcowa rozdziału zawiera zwarty opis zawartości poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział 2, zatytułowany „Metody generowania sił sterujących w odniesieniu do rakiet” rozpoczyna krótkie wprowadzenie do zagadnień sterowania ruchem obiektów z napędem raketowym. W dalszej części zawiera szczegółowy opis sterowania gazodynamicznego rakiet, układów je realizujących i ich charakterystyki operacyjne. Tu, przy omówieniu zasady działania pośrednich sterów gazodynamicznych pojawiło się stwierdzenie o „powstaniu sił aerodynamicznych, które działając na środek masy rakiety, zmieniają kierunek jej wektora prędkości”. Jest to nieścisłość, gdyż wypadkowa siła aerodynamiczna działa na środek parcia rakiety, leżący w pewnej odległości od jej środka masy. Dlatego wytwarza się moment obrotowy zmieniający jej położenie przestrzenne, a zatem także wektora jej prędkości. Rozdział kończy porównanie właściwości sterowania gazodynamicznego i aerodynamicznego rakiet.

Rozdział 3, zatytułowany „Metody startu pocisków raketowych”, poświęcony został przeglądowi tych metod. Opisane zostały podstawy metod startu: z wyrzutni obrotowej, „gorącego” startu pionowego, „zimnego” startu pionowego oraz „miękkiego” startu pionowego. Przedstawiono także zalety i wady opisanych metod startu rakiet.

W rozdziale 4, zgodnie z jego tytułem „Przegląd istniejących rozwiązań gazodynamicznych układów wykonawczych sterowania”, Autor przedstawia obszerny przegląd pocisków i rakiet wykorzystujących małe silniki raketowe do sterowania ich

lotem. Opisuje tu parametry i właściwości pięciu obiektów wykorzystujących sterowanie gazodynamiczne do realizacji startu „miękkiego” oraz ośmiu wykorzystujących takie sterowanie podczas końcowej fazy lotu – bezpośredniego naprowadzania na cel. Na końcu rozdziału umieszczone jest krótkie podsumowanie tych rozwiązań.

Zawartość Rozdziału 5 „Analiza literatury na temat metod sterowania raket z wykorzystaniem gazodynamicznych układów wykonawczych” jest zgodna z jego tytułem. Przegląd ten podzielił Doktorant na dwie części: pierwszą poświęcił pociskom artylerii raketowej, drugą naprowadzaniu na cel w ostatniej fazie lotu raket przeciwlotniczych.

W części pierwszej opisał szczegółowo trzy metody naprowadzania na cel pocisków, których tor lotu sterowanego jest zbliżony do krzywej balistycznej:

- według trajektorii referencyjnej,
- na podstawie predykcji współrzędnych punktu upadku,
- kształtowania trajektorii.

Autor omówił tu także zalety i wady metody proporcjonalnej naprowadzania pocisków na cel. W przypadku sterowania według trajektorii referencyjnej stosuje także inną jej nazwę „śledzenia zadanej trajektorii”. Należałoby ujednoczyć stosowaną w pracy nomenklaturę i zdecydować się na wybór jednej z tych nazw. Na podstawie przeprowadzonych analiz jako przedmiot badań Doktorant przyjął metody sterowania lotem rakiety:

- według trajektorii referencyjnej,
- na podstawie predykcji współrzędnych punktu upadku.

W części drugiej Autor przeprowadził dyskusję wykorzystania siników korekcyjnych w końcowej fazie lotu pocisków przeciwlotniczych i przeciwraketowych. Przyjął i uzasadnił wybór wartości współczynników do modelowania interferencji aerodynamicznej, które będzie stosował podczas dalszych badań. Rozdział kończy kilka uwag na temat niewielkiej liczby pozycji literatury dotyczącej zagadnień sterowania lotem rakiety podczas „miękkiego” startu.

Rozdział 6 zatytułowany „Model matematyczny lotu rakiety” Doktorant rozpoczyna od ogólnych rozważań na temat zasad budowy modeli fizycznych raket, a następnie przechodzi do podania danych dotyczących dwu typów modelowanych przez niego raket o kalibrach 122 i 152,4 mm. W kolejnym podrozdziale opisuje

założenia odnośnie modelu fizycznego rakiet, układy odniesienia, wyznaczanie orientacji przestrzennej modelowanej rakiety. Dalsza część rozdziału zawiera szczegółowe modele dynamiki ruchu rakiet przyjęte do badań wraz z dokładnymi opisami modeli jego elementów takich, jak struktury, zespoły napędowe, układ nawigacji, oddziaływanie zmiennych charakterystyk masowo-bezwładnościowych na lot rakiety.

Rozdział 7, zgodnie ze swoim tytułem „Wyznaczanie charakterystyk aerodynamicznych Rakietowych Platform Badawczych 122 mm oraz 152,4 mm” Doktorant poświęcił opisowi prac związanych z ich określeniem. Rozdział rozpoczął opisem metod wyznaczania charakterystyk aerodynamicznych rakiet, a do swoich badań wybrał metody półempiryczne. Wyznaczał je za pomocą pakietu oprogramowania PRODAS, z którym zintegrowany był moduł MISL3. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia szczegółowo sposób opracowania i uzyskane modele aerodynamiki obu rakiet. W przypadku rakiety kalibru 152,4 mm Autor przeprowadził badania jej modelu w tunelu aerodynamicznym, weryfikujące wyniki uzyskane metodami obliczeniowymi.

Rozdział 8 „Model symulacyjny” Autor poświęcił na streszczenie przeprowadzonych badań w środowisku wirtualnym oraz podsumowanie uzyskanych wyników. Przedstawił także szereg wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Są one uogólnieniem wniosków przedstawianych w każdym z rozdziałów pracy dotyczących badań.

Rozdział ten jest jednym z kluczowych w całej pracy. Sumuje wyniki prac opisanych w Rozdziałach 6 i 7, które to zostały zintegrowane do postaci modelu symulacyjnego stworzonego za pomocą pakietu symulacyjnego Simulink w środowisku Matlab. Modele symulacyjne poszczególnych modułów zostały oprogramowane przez Doktoranta, co dało mu możliwość kontroli nad przebiegiem symulacji oraz realnego wpływu na uzyskiwane wyniki. Ich funkcjonalności opisał Autor na początku rozdziału ale rysunek przedstawiający główne okno programu symulacji jest nieczytelny. Dla ułatwienia analizy wyników symulacji Doktorant wyposażył pakiet symulacyjny w aplikację wizualizacji, pokazującą uzyskane wyniki oraz przyspieszającą proces ich interpretacji.

W dalszej części rozdziału znalazły się:

- omówienie wielkości wejściowych do modelu,

- weryfikacja i walidacja modelu symulacyjnego na podstawie badań rakiety kalibru 122 mm. Weryfikację modeli przeprowadził Autor zgodnie z zasadami sprawdzania oprogramowania, w tym symulacyjnego. Podczas testów sprawdził: poprawność działania i stabilność stosowanych procedur całkowania równań ruchu rakiet, jednoznaczność i powtarzalność uzyskiwanych wyników, zgodność typów i struktur danych, poprawność sensu fizycznego i porównywalność uzyskiwanych wartości parametrów lotu. Walidacja modelu rakiet została przeprowadzona w oparciu o wyniki danych z badań rakiety 122 mm. Dla tej rakiety Doktorant miał dostęp do danych z badań w locie. Na podstawie przedstawionych obszernie badań porównawczych mógł stwierdzić poprawność stworzonych modeli symulacyjnych oraz pozytywnie zwalidować model rakiet przyjęty do badań. Rozszerzenie tego wniosku także na model rakiety kalibru 152,4 mm jest jak najbardziej prawidłowe, ze względu na podobieństwo obu tych obiektów.

Rozdział 9 zatytułowany „Algorytmy sterowania rakieta” poświęcony został algorytmom sterowania lotem rakiet za pomocą silników korekcyjnych na paliwo stałe. Prawie cały obejmuje rozważania na temat algorytmów sterowania lotem rakiety kalibru 122 mm, gdzie celem było osiągnięcie zadanego punktu trafienia na powierzchni ziemi, a jedynie bardzo krótki podrozdział algorytmom sterowania „miękkim” startem rakiety kalibru 152,4 mm.

Doktorant przedstawia kolejno założenia poczynione podczas formułowania algorytmu sterowania lotem rakiety 122 mm, analizę efektywności sterowania za pomocą silników korekcyjnych, a także strategię wyboru kolejności uruchamiania silników korekcyjnych. Analizuje w pracy jeden układ silników korekcyjnych dla rakiety 122 mm.

W dalszej części rozdziału przeprowadzona została dokładna analiza przyjętych metod sterowania lotem rakiety. Dla metody sterowania według trajektorii referencyjnej Autor wprowadza trajektorię wzorcową w postaci stabelaryzowanej, co skraca czas obliczeń i umożliwia ich skuteczne przeprowadzenie na pokładzie analizowanej rakiety. Ponadto przeprowadza skrupulatną analizę modulacji częstotliwości impulsów sterujących lotem, czyli częstości odpalania poszczególnych silników korekcyjnych. Analiza ta ma kluczowe znaczenie dla efektów końcowych sterowania – osiągnięcia zadanego punktu będącego położeniem celu. Wyprowadzone przez Doktoranta

wnioski mają istotną wagę dla dalszych części pracy. Odzwierciedla je struktura układu sterowania, w której wydzielono dwie połączone szeregowo części:

- naprowadzania,
- kolejności uruchamiania silników korekcyjnych.

Taki funkcjonalny podział systematyzuje i ułatwia analizę oraz syntezę układu sterowania.

Dla metody sterowania na podstawie predykcji współrzędnych punktu upadku mamy do czynienia z ciągłym kontrolowaniem położenia punktu upadku rakiety oraz jego odpowiednim korygowaniem względem zadanego przed startem położenia celu. Autor przeanalizował możliwe do wprowadzenia uproszczenia modelu lotu rakiety jako punktu materialnego, na który działają siły aerodynamiczne i ciężkości oraz ograniczenia sterowania do fazy lotu pasywnego.

Rozdział kończą rozważania Autora sposobu sterowania obrotem rakiety nad wyrzutnią przed uruchomieniem jej silnika startowego. Zastosował tu układ otwarty sterowania, a kąt pochylenia rakiety został uzyskany za pomocą dobrania odpowiedniej różnicy czasu odpalenia dwu przeciwnie położonych silników sterujących.

Rozdział 10 „Badania symulacyjne wykorzystania gazodynamicznego układu wykonawczego sterowania w pasywnej fazie lotu rakiety 122 mm” zawiera podstawowe wyniki badań symulacyjnych; jest kluczowy dla całej ocenianej rozprawy. Głównym celem badań przedstawionych w tym rozdziale jest zweryfikowanie opracowanych algorytmów sterowania lotem rakiety pod kątem poprawności uzyskiwanych efektów, a także wpływu ciągu i częstości sterowania silnikami korekcyjnymi na jakość sterowania. Oceniono także w jakim stopniu sterowanie lotem rakiety wpływa na dokładność trafienia w zadany punkt w porównaniu do lotu niesterowanego.

Do oceny jakości sterowania lotem rakiety Autor wprowadził pojęcie „efektywności sterów gazodynamicznych”. Definiuje je na stronie 242 jako „odległość mierzona w płaszczyźnie celu, o którą może zostać przesunięty punkt upadku pocisku względem położenia punktu dla lotu niesterowanego”. Nie jest to najszcześniejsze określenie, gdyż z reguły efektywność sterów rozumie się jako ich zdolność do wywołania określonej reakcji sterowanego obiektu. Definicja, jakiej użył Autor sugeruje raczej efektywność sterowania za pomocą sterów gazodynamicznych. W dalszej

części rozdziału Doktorant posługuje się konsekwentnie przyjętą definicją, co pozwala jednoznacznie ocenić uzyskane wyniki badań.

Przedstawia wyniki badań efektywności dla kątów strzału 20° i 50° , a następnie dla tych samych wartości kątów wyniki analizy poprawności obu wybranych algorytmów sterowania lotem rakiety. Analogiczne wyniki badań zaprezentował dla wpływu wartości impulsu całkowitego silnika korekcyjnego oraz granicznego kąta pochylenia rakiety, przy którym rozpoczyna się sterowanie, przeprowadzone także dla obu algorytmów sterowania lotem.

Wyniki badań efektywności dla dwu kątów strzału pokazują prawidłowości i podobieństwa pozwalające na sformułowanie szeregu wniosków. Autor sformułował je i potwierdził w niektórych przypadkach wyniki prezentowane w zacytowanych źródłach. Wnioski te mają praktyczne znaczenie dla wyboru sposobu sterowania lotem pocisków raketowych, a w przypadku wyboru do tego celu silników korekcyjnych na paliwo stałe – sposobu ich wykorzystania. W podrozdziale pojawiły się nieprecyzyjne opisy uzyskanych wyników. Tylko na rysunkach pokazujących zbliżenie końcowej fazy lotu pocisku podano legendę wyjaśniającą znaczenie poszczególnych krzywych wyróżnionych kolorami. Na pozostałych rysunkach brak takich legend i należy się domyślić, że znaczenie krzywych oznaczonych takim samym kolorem odnosi się do tego samego przypadku symulowanego lotu. Ponadto w podpisach bardzo istotnych rysunków pokazujących wpływ kąta granicznego pochylenia rakiety, dla którego rozpoczyna się sterowanie znajduje się nazwa „kąt aktywacji sterowania”. Dzięki takim samym oznaczeniom można jednak prawidłowo zinterpretować przedstawione wyniki. Te błędy redakcyjne nie umniejszają jednak znaczenia przeprowadzonych badań, w których pokazano wpływ poszczególnych czynników na końcowy rezultat sterowania, co pozwoliło na sformułowanie interesujących wniosków.

Celem badań algorytmu sterowania lotem rakiety na podstawie śledzenia trajektorii referencyjnej było określenie poprawności jego działania, gdzie kryterium poprawności związane zostało z dokładnością trafienia rakiety w zadany punkt. Doktorant przedstawił i przeanalizował wyniki badań symulacyjnych, które pozwoliły mu na sformułowanie bardzo ciekawych wniosków. Algorytm będzie działał poprawnie wtedy, gdy czujniki pokładowe będą wystarczająco dobrej dokładności, co pozwoli uwzględnić zmiany gęstości powietrza wynikające z osiągniętej wysokości lotu wynikającej ze stromości toru loty rakiety, a więc kąta ustawienia wyrzutni. Także sformułował wnioski dotyczące wielkości impulsu całkowitego silników korekcyjnych,

niezbędnego do uzyskania wymaganej dokładności trafienia celu. Końcowe badania tego algorytmu Autor poświęcił analizie wpływu chwili rozpoczęcia sterowania na jego efektywność. Określił wpływ toru lotu rakiety na dokładność trafienia w cel oraz opisał zależność liczby wykorzystanych do sterowania silników korekcyjnych od tych parametrów.

Następne podrozdziały poświęcił Doktorant badaniu efektywności algorytmu sterowania lotem rakiety na podstawie predykcji współrzędnych jej punktu upadku. Kolejność przeprowadzonych badań była taka jak w przypadku poprzedniego algorytmu. Uzyskane wyniki pozwoliły Autorowi stwierdzić duże podobieństwo w stosunku do wyników dla poprzedniego algorytmu. Jediną istotną różnicą był sposób wykorzystania silników korekcyjnych. W przypadku tego algorytmu silniki były uruchamiane w jednym ciągu czasowym.

Ostatni podrozdział zawiera wyniki badań rozrzutu pocisków raketowych. Poprzedza je szczegółowa analiza przyczyn powstawania rozrzutu pocisków raketowych oraz opis modelu tego zjawiska zastosowanego w badaniach. Autor określił także wpływ poszczególnych parametrów pocisku, strzału, sterowania i lotu na rozrzut. Podsumował ten podrozdział wnioskami, z których najważniejsze odnoszą się do pozytywnego wpływu obu metod sterowania lotem rakiety na wielkość rozrzutu, z pewną przewagą metody predykcji punktu trafienia.

W rozdziale 11, zatytułowanym „Badania symulacyjne „miękkiego” pionowego startu”, Doktorant podejmuje rozważania dotyczące sterowania lotem rakiety podczas tego typu startu. Głównym celem badań opisanych w tym rozdziale było wypracowanie wymagań odnośnie pokładowego układu rejestracji i sterowania lotem rakiety podczas prób poligonowych.

Badania symulacyjne rozpoczął. Autor od określenia wpływu prędkości początkowej na przebieg manewru obrotu rakiety nad wyrzutnią podczas „miękkiego” startu. Określił graniczną prędkość wyrzutu rakiety, a także czasy działania poszczególnych silników korekcyjnych oraz marszowego. W następnym kroku zbadał wpływ opóźnienia zadziałania drugiego silnika korekcyjnego oraz silnika marszowego na kąt pochylenia rakiety. Symulacje zakończyły się określeniem wpływu zaburzeń przede wszystkim powodujących powstanie ruchu obrotowego rakiety wokół jej osi podłużnej. Przeprowadzone badania pozwoliły określić najlepsze wartości parametrów sterowania lotem, zapewniające lot rakiety w pożądanym kierunku.

Rozdział 12, zatytułowany „Próby w locie „miękkiego” pionowego startu rakiety 152,4 mm”, zgodnie z tytułem, zawiera opis przeprowadzonych prób naziemnych poprzedzających próby w locie, badań w locie „miękkiego” startu rakiety, analizę wyników oraz wynikające z nich wnioski. Doktorant szczegółowo opisał wszystkie trzynastę przeprowadzonych prób dla różnych układów silników korekcyjnych i zmiennych parametrów czasowych uruchamiania silnika startowego, podsumował je i sformułował wnioski dotyczące ich przebiegu oraz zaleceń odnośnie następnych prób. Walidację opracowanego modelu symulacyjnego przeprowadził na podstawie czterech wybranych prób o najbardziej powtarzalnym przebiegu. Potwierdził poprawność samego modelu oraz określił wpływ sposobu sterowania silnikami, a także jakości wykonania silników, szczególnie korekcyjnych, na wykonanie „miękkiego” startu rakiet. Wnioski kończące ten rozdział potwierdzają możliwość wykonania rakiet o „miękkim” pionowym starcie, poprawności założeń opracowanego przez Autora matematycznego modelu manewru i jego powtarzalności przy zastosowanych pokładowych układach pomiarowym i sterującym. Należy w tym miejscu podkreślić, że cały projekt oraz zrealizowane w jego ramach badania przedstawione w pracy były pierwszą w Polsce udaną próbą sprawdzenia możliwości wykonania pionowego „zimnego” a raczej „miękkiego” startu rakiety.

Ostatni 13 rozdział o tytule „Podsumowanie, możliwości wykorzystania wyników oraz perspektywy dalszych badań” poświęcony jest krótkiemu podsumowaniu całej pracy. Autor potwierdza osiągnięcie zakładanych wyników i pozytywne zweryfikowanie tezy postawionej na początku pracy. Ponadto podkreśla znaczenie praktyczne uzyskanych rezultatów dla doskonalenia dokładności trafienia rakiet 122 mm eksploatowanych w Polsce. Wykonanie i zweryfikowanie teoretyczne i praktyczne układu sterowania lotem rakiety podczas pionowego „miękkiego” startu jest mocną podstawą do kontynuowania prac nad takim systemem.

W tym miejscu należy stwierdzić, że Autor zrealizował w całym zakresie założenia badawcze osiągając planowane cele naukowe. W sposób właściwy zaplanował i zrealizował badania eksperymentalne opracowanych przez siebie algorytmów sterowania lotem rakiet o nowatorskim charakterze. Potrafił zaproponować skuteczne rozwiązania problemów związanych z nieprawidłowym przebiegiem lotów rakiet podczas eksperymentów. Potwierdził te propozycje badaniami w warunkach symulowanych lotów. Stworzył podstawy pod rozwiązanie problemu sterowania lotem rakiety podczas pionowego „miękkiego” startu.

Praca cechuje się wysokim poziomem językowym, a drobne i nieliczne błędy redakcyjne świadczą o wysokim poziomie opanowania warsztatu przez Doktoranta. Uwagi odnośnie redakcji tekstu pracy znajdują się w opisie poszczególnych jej rozdziałów.

Pewnym mankamentem jest obszerność pracy. W istocie są to co najmniej dwie pełnowymiarowe rozprawy doktorskie zawarte w jednej. Wykonane przez Doktoranta badania każdej z raket są wystarczające by przedstawić je jako rozprawę doktorską. Tym bardziej, że sam Doktorant w pracy wspomina o konieczności ograniczenia jej objętości, przez co w sposób skrótowy, według Autora, potraktował część poświęconą badaniom rakiety kalibru 152,4 mm.

Przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo szczegółowa, a jej Autor wykazał się wszechstronną i głęboką wiedzą związaną z jej tematyką. Przedstawił szereg dogłębnych analiz przyczyn zjawisk, z jakimi spotkał się podczas realizacji pracy. Pokazał zdolność rozpatrywania ich z różnych punktów widzenia, tworząc ich spójne modele i formułując prawidłowe wnioski.

Podsumowując, oceniam poziom przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej jako bardzo dobry i spełniający w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Autor wykazał się umiejętnością formułowania celu naukowego badań oraz znajomością metodyki prowadzenia badań naukowych, popartą znajomością wiedzy w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Mariusza Jacewicza do publicznej obrony przedstawionej mi pracy jako rozprawy doktorskiej.



Dr hab. inż. Cezary Szczepański

Profesor Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa