

RECENZJA

pracy doktorskiej magister inżynier Marty GRZYB
p.t.: „Analiza naprowadzania na cel naziemny obiektu latającego
jako układu z nałożonymi więzami”

Recenzję opracowałem zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 16 marca 2023 r. na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny dr hab. inż. Sławomira Błasiaka.

Celem rozprawy magister inżynier Marty GRZYB było „*opracowanie autorskiego algorytmu hybrydowego sterowania wraz z analizą kinematyki i dynamiki bomby kierowanej naprowadzanej na cel naziemny w warunkach oddziaływania zakłóceń atmosferycznych*”. Praca powstała na bazie prowadzonych przez Doktorantkę prac badawczych, które obejmowały: - opracowanie modelu ruchu bomby i zaburzeń atmosferycznych, - opracowanie różnorodnych wariantów sterowania, - przeprowadzenie obliczeń numerycznych dotyczących lotu bomby kierowanej na cel naziemny.

PRZEGLĄD TREŚCI

Przedstawiona do recenzji praca zawiera 198 stron i składa się z pięciu rozdziałów oraz spisu oznaczeń i skrótów, spisu literatury oraz streszczenia. Spis literatury obejmuje 164 pozycje literaturowe oraz adresy 57 stron internetowych. Spis ten zawiera trzy artykuły których współautorem jest Doktorantka.

Rozdział pierwszy stanowi obszerny przegląd literatury. Autorka opisała rozwój techniki raketowej, bomb lotniczych oraz bezzałogowych statków powietrznych stosowanych min. do przenoszenia bomb i rakiet. Wskazała też na rozwój nowych technologii wykorzystywanych w tym zakresie np. sztucznej inteligencji. Na tej podstawie sformułowała wskazany powyżej cel pracy.

Rozdział drugi zawiera klasyczny model ruchu bomby traktowanej jako ciało sztywne, na które działają zewnętrzne siły i momenty sił. Zdefiniowane zostały stosowane dalej układy współrzędnych oraz pokazano macierze transformacji pomiędzy tymi układami. Kolejny krok w budowaniu modelu to określenie równań ruchu postępowego i obrotowego oraz związków kinematycznych. W rozdziale tym pokazano też wyrażenia pozwalające obliczyć siły i momenty oraz stosowane w pracy charakterystyki aerodynamiczne. Model jest sformułowany poprawnie i nie odbiega od modeli stosowanych w mechanice lotu i balistyce zewnętrznej. W rozdziale drugim Doktorantka ogólnie omówiła również podstawowe metody naprowadzania pokazując przykłady ich zastosowania. Pokazała też w jaki sposób warunki początkowe zrzutu (prędkość i kąt pochylenia bomby) wpływają na zrzut swobodny. Wskazała, że dynamika układu wykonawczego może istotnie wpływać na skuteczność sterowania.

Rozdział trzeci zawiera obszerny opis różnych metod sterowania bombą. Na początku rozdziału Autorka wykonała analizę wpływu linearyzacji lokalnej równań ruchu na poprawność symulacji ruchu swobodnego i sterowanego bomby. Dalsza część rozdziału

została poświęcona omówieniu różnych metod sterowania bombą, której dynamikę opisuje model nieliniowy. Analizowano celność trafienia w cel nieruchomy i ruchomy. Rozważano następujące metody sterowania:

- klasyczne sterowanie PID z różnymi kombinacjami członów sterujących;
- metoda regulatora ślizgowego w trzech różnych wariantach;
- sterowanie hybrydowe wykorzystujące jednocześnie sterowanie PID oraz sterowanie ślizgowe w wariantach szeregowym i równoległym.

Rozdział czwarty poświęcono opisowi zaburzeń atmosferycznych, którym podlega bomba. Doktorantka wskazała na trzy typy zaburzeń: - uskok wiatru, poryw wiatru, - turbulencje. Podaje zależności dotyczące modelowania tych zaburzeń. Rozdział zawiera też wyniki modelowania lotu swobodnego i sterowanego bomby w warunkach zaburzeń atmosferycznych. Sterowanie uwzględniało różne, omówione wcześniej, typy regulatora.

Rozdział piąty to syntetyczne podsumowanie wyników badań oraz wskazanie potencjalnych kierunków dalszych badań.

Pracę zamykają spis literatury i streszczenie w języku polskim i angielskim.

UWAGI DO PRACY

Na podstawie analizy recenzowanej pracy nasuwają mi się poniższe uwagi. Mają one różne znaczenie i będą omawiane zgodnie z kolejnością prezentowanych w pracy zagadnień:

str. 43

Opis układów $Sx_v y_v z_v$ i $Sx_c y_c z_c$ jest dość pobieżny. Nie zdefiniowano położenia osi tych układów.

str. 46

Macierz $R_{\sigma\varepsilon}$ jest macierzą transformacji z układu $Sx_g y_g z_g$ do układu $Sx_c y_c z_c$, a nie jak napisano w pracy z układu $Sx_c y_c z_c$ do układu $Sx_g y_g z_g$. Wynika to też z pierwszego zdania na stronie 47.

str. 62

Pokazana na rysunku 2.13 wielkość C_m nie jest współczynnikiem momentu statycznego, ale pochodną współczynnika momentu pochylającego względem kąta nutacji (natarcia).

str. 64

Pokazana na rysunku 2.14 wielkość C_q nie jest współczynnikiem tłumiącego momentu pochylającego/odchylającego, ale pochodną współczynnika momentu pochylającego względem prędkości kątowej.

str.65

Dlaczego w zależnościach (2.47) przyjęto, że nie występuje moment przechylający ($M_x=0$)?

str.67

Zależność (2.51) zawiera następujące formalne błędy:

- z lewej i prawej strony występuje to samo oznaczenie pochodnej tzn. $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$. Tymczasem z lewej strony występuje pochodna „globalna”, a z prawej „lokalna”.
- pierwszy składnik z prawej strony $\mathbf{i}_c \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ jest iloczynem skalarnym dwóch wektorów. Tymczasem lewa strona równania to wektor.
- w wyznaczniku po prawej stronie nie powinien znajdować się wektor \mathbf{r} , ale jego długość r .

str.67

Wzór (2.53) zawiera błąd. Trzeci składnik po prawej stronie powinien być $\sigma \cos \varepsilon$. Wynika to z macierzy $R_{\sigma\varepsilon}$, gdzie element o numerze (3,3) to $\cos \varepsilon$ (bez znaku minus).

str.68

Formuły (2.55) przedstawiają wektory prędkości bomby i celu w układzie opływu. Każdy z tych wektorów ma jedną składową. Sugeruje to, że odrębny układ opływu dotyczy bomby i odrębny celu. Sugerują to też wzory (2.56), gdzie pojawiają się kąty χ_c i γ_c . We wcześniejszej części pracy brak informacji o stosowaniu dwóch różnych układów opływu.

str.68

Ostatnie równanie (2.59) zawiera po lewej stronie znak minus. Zgodnie z uwagą dotyczącą wzoru (2.53) ze strony 67 nie powinno go być.

str. 69

- Na rysunku 2.15 symbolem γ oznaczono kąt pochylenia bomby. Tymczasem γ jest to kąt pochylenia toru lotu (wektora V).
- Na rysunku 2.15 wektor prędkości bomby oznaczono jako V_a zamiast V .
- Drugie z równań (2.60) nadal zawiera znak minus po lewej stronie. Dlaczego?
- Dlaczego rozpatrywano ruch bomby i celu jedynie w płaszczyźnie pionowej (równania (2.60))?

str.72

Na rysunkach 2.16 i 2.17 pokazano trajektorie bomby dla krzywej pogoni, metody proporcjonalnej nawigacji i metody równoległego zbliżania. Dlaczego dla metody równoległego zbliżania przyjęto współczynniki a_ε i a_σ równe 11 skoro zgodnie z warunkami (2.63) powinno być: $\frac{d\gamma}{dt} = 0$ i $\frac{d\chi}{dt} = 0$ bez względu na wartość tych współczynników.

str.73

Podany w tabelach 2.1 i 2.2 czas naprowadzania wydaje się nierealny – zbyt długi. Jeżeli bomba spada z 3000m, to czas pionowego spadania w próżni wynosi:
$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3000}{9.81}} = 24.73s.$$
 W powietrzu może być nieco dłuższy, ale nie niemal trzykrotnie.

str.75

Czy wyniki symulacji przedstawione w rozdziale 2.3 dotyczą swobodnego spadku bomby bez sterowania?

str.81

Na jakiej podstawie przyjęto wartości $\omega_n=150$, $\xi=0.7$.

str.82

Autorka stwierdza, że w dalszej części pracy przyjęto, że $u_w = \delta_w$. Czy oznacza to, że pominięto dynamikę układu sterowania opisaną w rozdziale 2.4?

str.90-92

Pokazane na rysunkach 3.7-3.11 wyniki dotyczą warunku $\Theta_z = \text{const}$. Dlaczego nie podano w jawnej postaci praw sterowania (relacji $\delta_w = f(\Delta\Theta)$). Jakie współczynniki wzmocnienia zastosowano?

str.94

W rozdziale 2.2.7 sugerowano, że spośród parametrów ($r, \gamma, \chi, \varepsilon, \sigma$) dwa będą definiować prawa sterowania. Tymczasem w rozdziale 3.2 sterowanie jest określone w oparciu o uchyby: kąta pochylenia Θ i kąta odchylenia bomby Ψ , a dalej dodatkowo wysokość lotu.

str.97

- Czy zapis $\Theta_z = \varepsilon$ pod wzorem (3.17) oznacza, że obliczenia dotyczą metody równoległego zbliżania i kąta pochylenia LOC powinien być stały w czasie zrzutu?
- Jaka jest relacja pomiędzy sygnałem u_w i kątem wychylenia steru δ_w ? Czy jest to $u_w = \delta_w$?

str.98

Jak ustalono początkowe wartości kątów $\gamma_0 = -81.06^\circ$ i $\Theta_0 = -71.56^\circ$? Jak w praktyce zrealizować zrzut z podanymi początkowymi wartościami kątów?

str.102

- Opis pod wzorem (3.19). Czy zmienna z jest współrzędną położenia LOC, czy też współrzędną celu?
- Opis pod wzorem (3.21). Czy zmienna z jest współrzędną położenia LOC, czy też współrzędną celu?

str.110

- Jaka jest relacja pomiędzy sygnałem u_w obliczanym z wzorów (3.24), (3.26) lub (3.27) i kątem wychylenia steru δ_w ?
- Jak wyznaczano występujące tu stałe $\lambda_w, c_c, k_\varepsilon, k_b$?

str.112-125

Jak wyjaśnić skokowe zmiany kąta pochylenia i kąta natarcia bomby w czasie lotu – rys.3.26 i (3.29)?

str.137

Jakie wyrażenie dotyczy powierzchni ślizgu S_w na rysunku 3.110?

str.138

Jaka jest relacja pomiędzy składnikami u_{PID} i u_{SMC} we wzorze (3.30)?

str.152

Wzór (4.8) interpretowany jako opis uskoku wiatru (również w wielu publikacjach), to w rzeczywistości opis rozkładu średniej prędkości wiatru w funkcji wysokości. Natomiast uskok wiatru to gwałtowna zmiana kierunku i prędkości wiatru. Najsilniejsze uskoki wiatru mogą powodować nagłą poziomą zmianę prędkości większą niż 8 m/s [15kts] lub zmiany pionowe większe niż 150 m/min [500 ft/min]. Chociaż uskoki wiatru mogą się zdarzać na wszystkich wysokościach, to jednak szczególnie groźne są te, które występują w warstwie od powierzchni ziemi do wysokości 600 m [2000ft]. Angielska nazwa uskoku wiatru to „*microburst*”.

str.153

wzór (4.9) - Co to jest „przebyta odległość podmuchu x ”?

str.154

Dlaczego na rysunku 4.2 pokazano profil podmuchu w funkcji czasu chociaż we wzorze (4.9) zmienną niezależną jest odległość?

str.161

Jaki był kierunek wiatru dla obliczeń, których wyniki pokazano na rysunku 4.7?

rys.4.20

Jaki był kierunek podmuchu w symulacji, której wyniki pokazano na rys.4.20? Na jakim fragmencie toru lotu bomby podmuch na nią oddziaływał?

Jak zaznaczyłem wcześniej powyższe uwagi mają różne znaczenie. W związku z powyższym proszę o ustosunkowanie się Doktorantki do niektórych z nich w trakcie obrony pracy. Oto one:

1. Dlaczego w zależnościach (2.47) przyjęto, że nie występuje moment przechylający ($M_x=0$) i dlaczego dalej rozpatrywano tylko ruch płaski.
2. W rozdziale 2.2.7 sugerowano, że spośród parametrów ($r, \gamma, \chi, \varepsilon, \sigma$) dwa będą definiować prawa sterowania. Tymczasem w rozdziale 3.2 sterowanie jest określane w oparciu o uchyby: kąta pochylenia Θ i kąta odchylenia bomby Ψ , a dalej dodatkowo położenie bomby.
3. Podany w tabelach 2.1 i 2.2 czas naprowadzania wydaje się nierealny – zbyt długi. Jeżeli bomba spada z 3000m, to czas pionowego spadania w próżni wynosi:
$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3000}{9.81}} = 24.73s$$
. W powietrzu może być nieco dłuższy, ale nie niemal trzykrotnie.
4. Jak ustalono początkowe wartości kątów $\gamma_0 = -81.06^\circ$ i $\Theta_0 = -71.56^\circ$? Jak w praktyce zrealizować zrzut z podanymi początkowymi wartościami kątów? Dlaczego przyjęto takie wartości skoro zrzut bomb dokonywany jest z reguły przy innych warunkach początkowych?

Ocena pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska potwierdza, że mgr inż. Marta Grzyb samodzielnie rozwiązała problem naukowy wskazując cel badań, tworząc model fizyczny i matematyczny obiektu i dalej model symulacyjny. Precyzyjnie określiła szeroki zakres symulacji, których wynik pokazała. Osobny wątek badań dotyczy różnych praw sterowania. Oprócz klasycznych praw sterowania dokonała też analizy tzw. sterowania ślizgowego. Zaproponowała też istotną modyfikację wyrażenia określającego tzw. płaszczyznę ślizgu (wzór (3.29)) uwzględniając dodatkowo jednoczesne uchyby kilku parametrów. Za jej indywidualny dorobek naukowy uważam też wprowadzenie sterowania hybrydowego w wariacie szeregowym i równoległym. Uzyskane wyniki pokazują, że zastosowane rozwiązania były skuteczne i znacząco wpłynęły na precyzję trafienia celu.

Otrzymanie zaprezentowanych wyników badań naukowych wymagało olbrzymiego nakładu pracy oraz pozyskania/wykorzystania wiedzy z obszaru mechaniki klasycznej, aerodynamiki i teorii sterowania. Opracowanie autorskiego oprogramowania, a nie korzystanie z gotowych komercyjnych programów, to dodatkowa wartość pracy.

W tym kontekście uważam, że Doktorantka niepotrzebnie zrezygnowała z możliwości symulacji obrotu bomby wokół osi podłużnej oraz niepotrzebnie ograniczyła się do analizy ruchu płaskiego w płaszczyźnie pionowej. Uproszczenia te powinny być w dalszych pracach Doktorantki pominięte. Rozszerzy to możliwości badawcze i zbliży model symulacyjny do rzeczywistych warunków zrzutu bomby.

Recenzowaną pracę uważam za wartościowy wkład w rozwój techniki uzbrojenia lotniczego w Polsce. Doktorantka w pełni zrealizowała określony we wstępie cel pracy.

Wniosek końcowy

Uwzględniając zarówno uwagi krytyczne jak i osiągnięcia Doktorantki uważam, że przedstawiona do recenzji praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego balistyki zewnętrznej sterowanych bomb lotniczych.

Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ustawy o tytule i stopniach naukowych (Dz. U. z dnia 27.09.2017 poz. 1789) i stawiam wniosek o dopuszczenie magister inżynier Martę GRZYB do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

18.05.2023

