

RECENZJA

pracy doktorskiej magistra inżyniera Michała SOBOLEWSKIEGO
p.t.: „Analiza dynamiki i sterowania platformy stabilizującej urządzenia obserwacyjno-śledzącego
umieszczonego na pokładzie obiektu latającego”

Recenzję opracowałem zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 14.07.2016 r. na zlecenie Dziekana Wydziału prof. dr hab. inż. Zbigniewa Koruby.

Celem rozprawy magistra inżyniera Michała Sobolewskiego było przeprowadzenie analiz dotyczących kinematyki i dynamiki innowacyjnego rozwiązania platformy stabilizującej oraz opracowanie algorytmu zapewniającego efektywną stabilizację przy zoptymalizowanej konstrukcji. Cel ten został sformułowany w powiązaniu z **tezą pracy** - według Doktoranta opracowanie modelu matematycznego oraz algorytmu sterowania platformą stabilizująca skraca czas stabilizacji oraz zwiększa efektywność urządzenia obserwacyjno-śledzącego pracującego na pokładzie obiektu latającego w warunkach oddziaływania zakłóceń wewnętrznych.

Dysertacja powstała na bazie prowadzonych przez Doktoranta analiz teoretycznych dotyczących opracowanej w Centrum Badań Kosmicznych PAN platformy.

Przegląd treści pracy i uwagi do niej

Przedstawiona do recenzji praca zawiera 180 stron i składa się z: wykazu symboli i oznaczeń, ośmiu rozdziałów /w tym wprowadzenia i podsumowania/ oraz bibliografii i dwóch załączników. Spis literatury obejmuje 45 pozycji /w tym strony internetowe/ i zawiera min. cztery publikacje, których autorem lub współautorem jest Doktorant. Związane są one bezpośrednio z zakresem rozprawy.

We **wprowadzeniu** /rozdział pierwszy/ Doktorant zwięźle omówił wybrane rozwiązania konstrukcyjne urządzeń obserwacyjno-śledzących. Stwierdził tu, że:

- rozwój techniki lotniczej koncentruje się min. na unowocześnianiu wyposażenia pokładowego, którego elementem są głowice obserwacyjno-śledzące;
- aktualnie użytkowane rozwiązania wibroizolacyjne głowic mają ograniczenia polegające na tłumieniu drgań w niepełnym zakresie częstotliwości występujących wymuszeń;
- układy wibroizolacyjne bazują na połączeniu aktywnych i pasywnych metod tłumienia drgań.

W rozdziale pierwszym sformułowane też zostały wymagania dotyczące systemu stabilizacji głowicy - zakres częstotliwości podlegających tłumieniu od 0.01 Hz, oraz brak rezonansów w obszarze roboczym głowicy. Istotny fragment tego rozdziału dotyczy zdefiniowania warunków pracy urządzeń obserwacyjno-śledzących montowanych na statkach powietrznych. Doktorant dokonuje tu podziału częstotliwości wymuszeń na tzw. "kołysanie" wywołane ruchem nosiciela oraz "wibracje" generowane przez układ napędowy. Praca zawiera też informacje o częstotliwościach występujących w rzeczywistości na trzech typach obiektów latających. W tym kontekście wątpliwość budzą rys. 1.24 i 1.25. Na rysunku 1.24 pokazano dane dla: *helikoptera*, *odrzutowca* i *śmigłowca*. Czym różni się śmigłowiec od helikoptera i co to jest odrzutowiec? Dlaczego na rysunku 1.25 amplitudę drgań wyrażono w [m/s²] zaś w tabeli 1.1 w [mm]?

Z treści pracy wynika, że przeprowadzona przez Doktoranta analiza dotyczyła min. zaprojektowanego i wykonanego stanowiska laboratoryjnego odtwarzające oscylacyjne wymuszenia występujące w trakcie lotu.

Również w rozdziale pierwszym Doktorant omówił problemy związane z eksploatacją głowic obserwacyjno-śledzących: - konieczność zapewnienia dobrej jakości obrazu, - wzrost czułości na

zakłócenia z powodu malejącej masy konstruowanych urządzeń, - ograniczenia dotyczące rejestracji i obróbki sygnałów wizyjnych.

Uważam, że treść wprowadzenia dowodzi bogatej, fachowej wiedzy Doktoranta w obszarze urządzeń obserwacyjno-śledzących.

Rozdział drugi dotyczy metodologii badań. Sformułowano tu przytoczone wcześniej cel i tezę pracy oraz w sposób ogólny zdefiniowano obiekt badań, ich zakres i wymieniono stosowane oprogramowanie. Uważam, że bez szkody dla jakości pracy mógłby on stanowić podrozdział obszernego wprowadzenia.

Rozdział trzeci poświęcony jest opisowi budowy oraz zasad działania platformy stabilizującej układ obserwacyjno-śledzący. Doktorant wymienił tu dwa możliwe tryby pracy - bezpośrednią transmisję obrazu wycinka powierzchni Ziemi oraz pracę jako urządzenie skanujące pas powierzchni Ziemi. Wskazał na wymagania dotyczące wieloosiowego montażu głowicy na statku powietrznym oraz krótko omówił trzy, stosowane w praktyce, rodzaje montażu oraz inne nietypowe rozwiązania. Rozdział zawiera też formuły pozwalające obliczyć kątowne błędy orientacji pola widzenia dla dwóch najpowszechniejszych sposobów montażu głowicy /tab.3.1/. Poprawności tych formuł nie można niestety zweryfikować ze względu na niepodanie ich źródła i jednocześnie brak określenia zastosowanych oznaczeń (np. zmienna A).

Ważny fragment rozdziału odnosi się do budowy zaprojektowanego podwójnego przegubu Kardana, którego dokumentację techniczną zawiera Załącznik 1. Doktorant stwierdza, że uzyskana dokładność pozycjonowania wynosi 0.50. Niestety nie wyjaśnia co to oznacza.

Omówiono tu też zadania zasadniczych elementów mechanizmu: - zawieszenia zewnętrznego, - osłony, - układu tłumienia wibracji, - zawieszenia wewnętrznego, - platformy obrazującej. Rozdział zawiera szczegółowe opisy zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz sposobu działania poszczególnych podzespołów mechanicznych, w tym elastomerowych, membranowych tłumików drgań. Są one elementem pasywnym. Dodatkowo Doktorant wskazał na aktywny system tłumienia drgań oparty o liniowe siłowniki neodymowe, tworząc tym samym układ hybrydowy zapewniający tłumienie w całym zakresie częstotliwości wymuszeń zewnętrznych. Rozdział ten zawiera model matematyczny ruchu belki pomiarowej, który stanowi podstawę do opisu ruchu kolejnych elementów układu rzeczywistego. Model ten budzi następujące uwagi:

- na rysunku 3-23 nie pokazano kątów α i β . - Dlaczego?
- nie da się przekształcić równania (5) do postaci (8) - skąd się bierze pierwszy składnik po prawej stronie równania (8)?
- błędnie zdefiniowano współczynnik tłumienia na dole strony 60.
- jak w praktyce wyznacza się momenty po prawej stronie równania (11).

Rozdział trzeci zamyka opis zasady działania platformy stabilizującej z uwzględnieniem jej aktywnej stabilizacji.

Rozdział czwarty dotyczy modelu fizycznego platformy stabilizującej. Wbrew tytułowi nie pokazano w nim schematu relacji dynamicznych pomiędzy elementami układu /częściowo zawiera je rozdział trzeci/. Przedstawiono natomiast szczegółowe analityczne obliczenia mas i momentów bezwładności elementów ruchomych platformy. Porównane one zostały z ich wartościami obliczonymi z wykorzystaniem oprogramowania CAD. Moim zdaniem zawartość merytoryczna tego rozdziału świadczy o inżynierskiej wiedzy Doktoranta, ale jest całkowicie zbędna w pracy doktorskiej - wystarczyłoby podanie, obliczonych z wykorzystaniem wybranej metody, wartości mas i momentów.

W **rozdziale piątym** przedstawiony został model matematyczny platformy stabilizującej. Opisane tu zostały przyjęte uproszczenia, zastosowane oznaczenia i układy współrzędnych oraz pokazano macierze transformacji, zdefiniowano prędkości kątowne ruchomych ramek platformy i wyznaczono wyrażenie określające energię kinetyczną platformy. Posłużyło to do wyznaczenia równań ruchu ramek przy wykorzystaniu metody Lagrange'a. Równania te określono "ręcznie", a następnie zweryfikowano korzystając z obliczeń symbolicznych w programie Matlab. Równania ruchu zawarte zostały w Załączniku 2. Rozdział piąty zawiera też zlinearyzowaną postać równań ruchu oraz przykładowe wyniki symulacji ruchu ramek dla modelu nieliniowego i zlinearyzowanego, gdzie zaburzano warunki równowagi. Doktorant przedstawił wnioski dotyczące wpływu różnych czynników

na ruch ramek. Ocenil też wpływ zastosowania linearyzacji na wyniki obliczeń. Na zakończenie rozdziału przedstawiono wyniki jednostkowych symulacji ruchu ramek uzyskane w oparciu o zbudowany model matematyczny i przy wykorzystaniu oprogramowania Matlab SimMechanics. Oprogramowanie to generuje wewnętrzny model ruchu w oparciu o wprowadzone dane geometryczno-masowe i mechaniczne. Wyniki były zbieżne.

W odniesieniu do tego rozdziału mam następujące uwagi:

- str. 86 - prędkości kątowe /pochodne względem czasu/ oznacza się kropką nad daną wielkością, a nie znakiem '
- formuła (24) nie jest poprawnie zapisana ponieważ dotyczy wielkości wektorowych, a nie skalarnych;
- na stronie 88 /i w wielu innych miejscach w pracy doktorant pisze o "weryfikacji modelu" poprzez wykonanie obliczeń numerycznych. Nie rozumiem na czym polega ta weryfikacja?
- na stronie 89 współczynniki tarcia wiskotycznego oznaczono literami "e", zaś w spisie oznaczeń użyto "E",
- co oznacza zwrot "wzrost momentu sił zewnętrznych o stałej wartości" na stronie 90?
- we wzorach na stronie 92 użyto symboli η , zaś we wcześniejszych wzorach (35)-(38) symboli ε ,
- współczynnik $b_{\phi l}$ na str.90 powinien być zapisany ze znakiem minus,
- na stronie 96 i w innych miejscach w tekście Doktorant używa pojęcia "warunki brzegowe", które ma zastosowanie do równań różniczkowych cząstkowych. Powinno być "warunki początkowe".

Rozdział szósty poświęcono sterowaniu urządzeniem obserwacyjno-śledzącym. Dobór praw sterowania oparto na zlinearyzowanych równaniach ruchu. Zastosowano sterowanie proporcjonalno-różniczkowe PD oraz sterowanie optymalne LQR. Doktorant podaje tu tylko ogóle informacje wskazując, że współczynniki wzmocnienia dobierano empirycznie. Porównano tu ruch ramek uzyskany dla obu typów sterowań stwierdzając, że sterowanie LQR daje większe tłumienia ruchów.

Dodatkowo, w rozdziale szóstym, Doktorant przedstawił informacje dotyczące metody wprowadzania obserwatora stanu dla platformy stabilizującej. Motywuje to trudnościami w wyznaczeniu wszystkich elementów wektora stanu np. z powodu występowania szumów. Autor pokazuje, że takie postępowanie jest skuteczne i wartości estymowane dążą do wartości referencyjnych dla sterowania LQR.

W odniesieniu do tego rozdziału mam następujące uwagi:

- według mojej wiedzy i źródeł, które sprawdzałem, w algebraicznym równaniu Ricattiego (45) nie występuje liczba "2" w trzecim składniku równania,
- szkoda, że nie przedstawiono praktycznie żadnych informacji o empirycznym doborze współczynników w prawach sterowania,
- dyskusyjne jest stwierdzenie na stronie 106, że "sterowanie LQR zapewnia większe tłumienie układu" - tłumienie zależy od współczynników wzmocnienia w prawach sterowania i można zapewne znaleźć ich wartości dla sterownika PD dające duże tłumienie - większe niż dla LQR.
- we wzorach (47) brak części odnoszącej się do fragmentu rys.6-10 dotyczącego sygnału sterującego,
- szkoda, że w pracy brak informacji dotyczących doboru macierzy L wzmocnienia błędu wyjściowego występującej we wzorach (53),

Rozdział siódmy dotyczy możliwości zastosowania sterownika rozmytego do wyboru sposobu aktywnej stabilizacji głowicy. Początek rozdziału to opis i wyjaśnienie podstawowych pojęć z zakresu logiki rozmytej takich jak np. fuzyfikacja, wnioskowanie rozmyte i defuzyfikacja. Jest to wiedza akademicka dostępna w literaturze. W wyniku przeprowadzonych badań opracowany został nadrzędny kontroler rozmyty dokonujący wyboru sposobu aktywnego sterowania /PD lub LQR/ lub zaniechania sterowania. Został on przetestowany w warunkach zakłóceń działających na głowicę. Niestety w pracy nie ma informacji na podstawie czego ustalono konkretne wartości funkcji przynależności /zawarte w tabelach 7-1 i 7-2/ oraz reguły wnioskowania /tab.7-3/.

Ostatni rozdział to **rozdział ósmy** zawierający podsumowanie i wnioski końcowe dotyczące całości pracy. Wskazują one, że Doktorant osiągnął założone cele tzn. przeprowadził analizy

