

WPLYNĘŁO

dn. 2022 -05- 0 8

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Michała Okulskiego
pt. „Zaawansowane modelowanie oraz sterowanie lotem drona typu quadplane”
w dziedzinie **nauk technicznych**, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika
i technologie kosmiczne

1. Podstawa formalna

Praca została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, zgodnie z pismem z dnia 24 lutego 2023 r.

2. Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne, zwane powszechnie *dronami*, od kilkunastu lat stanowią zarówno interesującą tematykę badawczą, jak i narzędzie badawcze czy źródło rozrywki. Bardzo ogólnie można je podzielić na drony do zastosowań wojskowych i cywilnych. Zainteresowanie tą pierwszą grupą zauważalnie wzrosło po wybuchu wojny na Ukrainie. Ogólnie jednak uważa się, że drony mają wysoki potencjał w obszarze zastosowań cywilnych, który przyczyni się do powstania wielu miejsc pracy, a ich wykorzystanie na szeroką skalę pomoże w rozwoju społeczeństwa. Unia Europejska szacuje, że w przeciągu około 20 lat sektor związany z dronami będzie zatrudniał więcej niż 100 tys. ludzi i generował przychód około 10 miliardów euro rocznie. Unia Europejska od roku 2014 realizuje strategię rozwoju sektora dronów, a jednym z jej elementów jest projekt pt. „Zaawansowane loty bezzałogowych statków powietrznych na szeroką skalę”, realizowany przy współpracy Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej między innymi w Gliwicach. Na budynku Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, to jest macierzystego Wydziału autora niniejszej recenzji, zainstalowane zostaną anteny odbiorcze systemu ADS-B, umożliwiające odbiór sygnałów z nadajników zainstalowanych w dronach, co umożliwi ich śledzenie i zapobieganie potencjalnym niebezpiecznym sytuacjom w powietrzu. Należy zatem stwierdzić, że tematyka podejmowana w pracy doktorskiej należy do tematów ważnych i intensywnie obecnie rozwijanych.



Drony stanowią zagadnienie badawcze w wielu różnych dyscyplinach, takich jak inżynieria materiałowa, mechanika, czy transport. Bez wątplenia jednak bezałogowe statki powietrzne nie mogą się poruszać bez zaawansowanych systemów pomiarowych i sterowania. Recenzowana praca koncentruje się w dużej mierze właśnie na nich, dlatego mieści się dobrze w zakresie dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca nie ma klasycznego układu monografii, lecz składa się ze zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych w języku angielskim, opatrzonego autoreferatem w języku polskim. Rozwiązanie takie jest dopuszczalne przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Autoreferat liczy 44 strony (łącznie ze spisem bibliografii). Pierwszy z załączonych artykułów pt. „A Small UAV Optimized for Efficient Long-Range and VTOL Missions: An Experimental Tandem-Wing Quadplane Drone”, opublikowany w czasopiśmie Applied Sciences w roku 2022, to obszerny artykuł podsumowujący większość dorobku uzyskanego podczas pracy nad doktoratem, liczący 24 strony. Drugi załączony artykuł pt. „How Much Energy Do We Need to Fly with Greater Agility? Energy Consumption and Performance of an Attitude Stabilization Controller in a Quadcopter Drone: A Modified MPC vs. PID”, opublikowany w czasopiśmie Energies również w roku 2022, liczy 13 stron. Trzeci artykuł pt. „A Novel Neural Network Model Applied to Modeling of a Tandem-Wing Quadplane Drone”, opublikowany w czasopiśmie IEEE Access w roku 2021, liczy 20 stron. Ostatni artykuł składający się na osiągnięcie to publikacja ze znanej w środowisku automatyki konferencji MMAR z roku 2019 pt. „Development of a high-efficiency pitch/roll inertial measurement unit based on a low-cost accelerometer and gyroscope sensors”, o objętości 6 stron. Wszystkie artykuły powstały w zespole dwuosobowym, składającym się z Doktoranta oraz jego promotora, prof. dr. hab. inż. Macieja Ławryńczuka. Każda z przedstawionych prac zawiera spis literatury, zawierający od 14 (w przypadku artykułu konferencyjnego) do 50 pozycji, co jest liczbą wystarczającą. Cytowane pozycje są omówione w sposób pokazujący ich zbieżność z tematyką wykonywanej pracy.

Ponieważ format artykułów w czasopismach nie jest do tego odpowiedni, tezy pracy zostały zdefiniowane w autoreferacie. Pierwsza z nich dotyczy samej konstrukcji drona, artykułując zalety konstrukcji z dwoma skrzydłami i dodatkowym silnikiem napędowym w kontekście osiągnięć drona. Druga teza wynika z pierwszej: konstrukcja quadplane jest na tyle rzadko stosowana, że w celu zaprojektowania sterowania tego typu dronem konieczne jest przeprowadzenie badań identyfikacyjnych dynamiki drona. Trzecia teza mówi, że zastosowanie innego typu regulatorów niż zazwyczaj stosowane regulatory PID polepszy osiągi drona. Podane tezy są w sposób wystarczający uzasadnione przez zacytowanie odpowiednich pozycji literaturowych.

Chociaż artykuły stanowiące podstawę wystąpienia o nadanie stopnia naukowego ułożone są w kolejności od najnowszego do najstarszego, wypada omówić je w kolejności powstawania, gdyż taka kolejność układa się w logiczny ciąg badań, który doprowadził do powstania osiągnięcia. Zatem czwarty załączony artykuł, a jednocześnie chronologicznie pierwszy, dotyczy tematyki dokładnego pomiaru kątów przechyłu urządzenia zaopatrzonego w jednostkę inercyjną (IMU – *Inertial Measurement Unit*) oraz akcelerometr. Rozważanym urządzeniem jest oczywiście dron, a autorzy wychodzą z założenia, że zastosowanie dobrej jakości jednostek

IMU w dronów cywilnych powszechnego użytku jest ekonomicznie nieuzasadnione. Tanie jednostki IMU z kolei cechuje szereg niekorzystnych właściwości metrologicznych, jak duży szum pomiarowy oraz dryft temperaturowy. Celem przedstawionej pracy było zatem opracowanie algorytmów filtracji szumu i kompensacji dryftu temperaturowego. Droga do celu wiodła przez skonstruowanie stanowiska do wymuszania trajektorii przestrzennych badanej jednostki IMU, na którym zostały przeprowadzone ciekawe badania zakończone sukcesem w postaci opracowanego algorytmu poprawiającego dokładność danych uzyskiwanych z zastosowanego IMU. Opisanie prace można uznać za etap przygotowawczy, poprzedzający konstrukcję drona.

Trzeci dołączony artykuł dotyczy już zupełnie innego zagadnienia i wiąże się z drugą tezą pracy. Prezentuje on wyniki badań, których celem była identyfikacja modeli dynamiki drona. Oczywiście, w momencie przeprowadzania tych badań dron był już skonstruowany. Ponieważ modele te były potrzebne do sterowania dronem, na etapie ich tworzenia nie było jeszcze możliwości swobodnego latania; w zamian skonstruowane zostało stanowisko do badań drona na uwięzi. Artykuł opisuje przyjętą metodologię badań, modele matematyczne torów sterowania dronem, użyte (nieliniowe) kryterium optymalizacji, a następnie uzyskane modele w postaci sieci neuronowych różnych typów. W dodatku do tych badań, których wyniki są unikalne ze względu na użytą konstrukcję drona, autorzy proponują swoją własną postać sieci neuronowej, nazwaną *Feature Sequence-to-Sequence Recurrent Neural Network Model*, której zalety obejmują redukcję liczby neuronów oraz możliwość inicjalizacji wag w zależności od stanu drona.

Drugi artykuł dotyczy algorytmów sterowania dronem, a zatem wiąże się z trzecią tezą pracy. Autorzy porównują działanie algorytmu PID, który jest najczęściej wykorzystywany do sterowania dronami, ze standardowym algorytmem predykcyjnym (*Model-Predictive Control*, MPC) oraz z jego zmodyfikowaną wersją. Modyfikacja polega na przewidywaniu trajektorii zadanej dla algorytmu sterowania z uwzględnieniem ograniczeń fizycznych: prędkość kątowna (obrotu) drona nie może zmienić się gwałtownie (skokowo), gdyż wymagałoby to nieskończonej energii do przemieszczenia masy drona. Trzy wymienione algorytmy zastosowano do sterowania jedną z osi pochyłu drona, który w dalszym ciągu pozostawał na uwięzi. Porównanie dotyczy zarówno szybkości reakcji na zadane pochylenie, jak również energii potrzebnej do realizacji sterowania.

Pierwszy artykuł jest natomiast artykułem przeglądowym, opisującym całość prac związanych z dronem: począwszy od jego konstrukcji, przez dobór pędników oraz innych komponentów elektronicznych, dobór oprogramowania, krótki opis eksperymentów z dronem na uwięzi, i wreszcie opis finalnych eksperymentów z dronem podczas swobodnego lotu.

Układ pracy jest formalnie poprawny. Autoreferat jest napisany poprawną polszczyzną i zawiera jedynie niewielką liczbę pomyłek edytorskich. Redakcyjna strona pracy oraz jej estetyka są bez zarzutu.

4. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć pracy można z pewnością zaliczyć samą konstrukcję drona, nie szczędząc podziwu dla zręczności i cierpliwości Doktoranta. Osiągnięcia tego nie można jednak zaliczyć do osiągnięć naukowych, gdyż jest to typowa praca inżynierska, bazująca na wspomnianych przez Doktoranta gotowych narzędziach do wspomagania projektowania dronów, np. eCalc czy MotoCalc.

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy z pewnością opracowanie i zidentyfikowanie modeli dynamiki drona o dość rzadko spotykanej konstrukcji. W zakres tego osiągnięcia wchodzi także opracowanie do zastosowanej postaci sieci neuronowej analogii w postaci równania różnicowego. Pozwala to na inicjalizację stanu sieci neuronowej na podstawie bieżącego stanu drona, i natychmiastowe przejście do predykcji stanu w przyszłości, która to predykcja jest głównym celem stosowania modelu neuronowego. W ten sposób opisane dokonania można określić jako stworzenie *metodologii* modelowania drona za pomocą sieci neuronowej. Szkoda tylko, że Doktorant nie pokusił się na opublikowanie opracowanych modeli w postaci otwartej bazy danych, którą inni naukowcy mogliby wykorzystywać i rozszerzać.

Jednak za najważniejsze osiągnięcie pracy uważam zastosowanie odpowiednio zmodyfikowanego algorytmu sterowania predykcyjnego do sterowania dronem. Regulator ten wykorzystuje oczywiście stworzony model w postaci sieci neuronowej do predykcji trajektorii (stanu) drona. Doktorant zastosował ponadto oryginalną modyfikację polegającą na wykorzystaniu wiedzy o zjawiskach fizycznych związanych z poruszającym się dronem (skończone prędkości i przyspieszenia), co poprawiło jeszcze zdolność regulatora do śledzenia zadanej trajektorii. Jako niemały sukces należy zaliczyć, że przedstawione osiągnięcia teoretyczne zostały przetestowane w praktyce: nowy regulator został zaimplementowany, a pracujący pod jego kontrolą dron pomyślnie przeszedł testy w powietrzu. Implementacja wykonana została w środowisku rzeczywistego kontrolera lotu drona, z uwzględnieniem jego mocno ograniczonych zasobów sprzętowych. Osobiście mocno doceniam tę fazę weryfikacji poprawności rozważań teoretycznych.

Uwzględniając powyższe można napisać, że osiągnięciem autora jest przejście całej ścieżki konstrukcji drona typu quadplane: od pomysłu, przez projekt samego drona, badanie jego właściwości z punktu widzenia sterowania, stworzenie koncepcji efektywnego sposobu sterowania (dla drona o dość trudnych właściwościach aerodynamicznych), implementacja tego algorytmu sterowania i wreszcie przeprowadzenie testów w środowisku rzeczywistym.

5. Uwagi krytyczne i pytania

Uważam, że pierwsza postawiona w pracy teza, dotycząca możliwości zwiększenia osiągnięć drona poprzez zastosowanie konstrukcji *quadplane* z dwoma skrzydłami, nie jest związana z dyscypliną naukową, do której zgłoszone zostało osiągnięcie, nawet uwzględniając fakt, że nazwa dyscypliny została ostatnio rozszerzona o *technologie kosmiczne*. Teza ta wpisuje się jednak dobrze w całość prac, które zostają oceniane, pokazując ich genezę i motywację.

Mój duży sceptycyzm budzą wyniki prac dotyczących zwiększenia dokładności jednostki IMU. W pracy opisującej szczegółowo ten wątek badań (stanowiącej element ocenianego cyklu) autorzy przedstawiają wyniki badań nad jednym egzemplarzem jednostki IMU jednego producenta. W moim mniemaniu uogólnienie tych wyników nawet na inne egzemplarze tej samej jednostki IMU niekoniecznie będzie możliwe bez powtórzenia dużej części opisywanych badań. Nie zostało także pokazane, że wyprowadzone modele matematyczne (równania (12)-(14)) będą mogły być zastosowane do IMU innych producentów. W tym kontekście wniosek o niższej cenie takiego rozwiązania nie jest trafiony, gdyż powtarzanie badań nad każdym egzemplarzem to właśnie proces kalibracji, który prawdopodobnie decyduje o wyższej cenie czujników wyższej klasy, cechujących się wyższą dokładnością.

Na szczególną krytykę zasługuje sposób prezentacji (a być może także zaprojektowania) filtra służącego do wygładzania sygnału z jednostki IMU, zaprezentowany w Załączniku nr 1 do artykułu w czasopiśmie *Energies*. Autorzy opisują, iż drugim ważnym celem projektowania filtra (oprócz wygładzenia sygnału) było uniknięcie nadmiernych opóźnień. Jednakże ani charakterystyka amplitudowa, ani fazowa zaprojektowanego filtra nie zostały pokazane. Co więcej, sama postać filtra jest postacią uwikłaną, wyrażającą wyjście filtra w funkcji pochodnych sygnału wejściowego. Właśnie to pozwala domniemywać, że filtr został wymyślony jakąś metodą inżynierską, z uzupełnieniem za pomocą metody prób i błędów. W pracy doktorskiej z zakresu dyscypliny *Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* nie powinno to mieć miejsca. Istnieją przecież metody formalne i narzędzia do projektowania filtrów cyfrowych. Szeroki ich wybór gwarantuje nawet środowisko Matlaba, dodając dodatkowo poradniki pokazujące różne aspekty procesu projektowania. Takie właśnie narzędzia powinny zostać użyte do zaprojektowania właściwego filtra, zaś wynik ich zastosowania zobrazowany nie tylko efektem działania filtra, lecz także jego charakterystykami.

6. Uwagi szczegółowe i pytania

Poniżej przedstawiam listę uwag szczegółowych i pytań, które nasunęły mi się podczas lektury pracy.

1. Ponieważ autoreferat został przedstawiony w języku polskim, opisy na rysunku 4.10 na stronie 19 należało przetłumaczyć.
2. Uważam, że rysunek 4.11 na stronie 20 w kontekście pracy doktorskiej jest bardzo mało szczegółowy. Nie zostały opisane niektóre z sygnałów, np. pogrubiona magistrala po lewej stronie rysunku, czy strzałki w bloku „PID Design”. Ponadto uważam, że w kontekście zaprezentowanego układu należałoby podać na tym rysunku konkretne użyte częstotliwości próbkowania. Uwaga ta dotyczy także rysunku umieszczonego w artykule opublikowanym w *Applied Sciences*. Oczywiście, rysunek należałoby także na potrzeby autoreferatu przetłumaczyć.
3. Pomimo dużej staranności edycyjnej, Doktorant nie ustrzegł się także drobnych błędów edycyjnych, jak np. odstępy nowego akapitu pod równaniami (6.5) i (6.6) na stronie 27 i w kilku innych miejscach.
4. Proszę o wyjaśnienie wzoru (6.9) na stronie 30 – czy zmienna u nie powinna być zależna od czasu dyskretnego, oraz dlaczego w drugim równaniu występuje iloczyn $C \cdot X(k+1)$ zamiast $C \cdot X(k)$?
5. Pogrubione zdanie na stronie 31 wspomina o „agresywności” drona – pojęcie to, choć intuicyjnie zrozumiałe, powinno zostać formalnie zdefiniowane.
6. Pomimo niewielkiej liczby zaprezentowanych wyników pomiarowych z lotów rzeczywistych, czy nie było możliwe przedstawienie jakichkolwiek wyników liczbowych dotyczących lotu rzeczywistego? Mam tutaj na myśli np. wskaźniki całkowite dotyczące trajektorii lotu. Uważam, że wyniki takie byłyby doskonałym uzupełnieniem opisów lotów przedstawionych w artykule w *Applied Sciences*, na stronach 19-21.
7. Użyta w artykule w czasopiśmie *Energies* nazwa „trajectory guessing” wydaje mi się mocno niefortunna. Uważam, że znacznie lepsza byłaby „trajectory prediction” lub „trajectory forecasting”.



8. Proszę o przedstawienie charakterystyki amplitudowej, fazowej oraz opóźnienia grupowego filtra opisanego w Załączniku nr 1 do publikacji w czasopiśmie *Energies* (str. 11). Oczywiście, drogą do tego musi być pokazanie rozwikłanej postaci filtra, którą także chciałbym poznać.
9. W artykule opublikowanym w czasopiśmie *IEEE Access*, na stronie 14162 we wzorze (5) użyto numerycznego przybliżenia pochodnych przez różnice wsteczne pierwszego rzędu. Dlaczego spośród różnych możliwości wybrano akurat ten sposób?
10. Na tej samej stronie opisano zbiór danych uczących do sieci neuronowych, zawierający 5678 próbek, a także zbiór do walidacji (2000) i testowy (500). Łącznie daje to mało imponującą liczbę danych równą 8178 próbek. Przy częstotliwości próbkowania 50 Hz oznacza to pomiary przez jedynie 163 sekundy. Dlaczego zbiór ten był tak mało liczny, skoro eksperymenty były wykonywane na uwięzi i nie powinno być problemów z przeprowadzeniem znacznie dłuższych eksperymentów?
11. Na str 14165 napisano, że została przeszukana pełna przestrzeń hiperparametrów. Ponieważ większość z tych parametrów to wartości naturalne, i nie zostało podane ich górne ograniczenie, ta informacja nie może być ścisła. Proszę zatem o uściślenie jakie były zakresy wartości wymienionych na str. 14166 hiperparametrów uwzględniane w badaniach.
12. W artykule opublikowanym na konferencji MMAR, na str. 658 napisano, że sygnały przedstawione na Rys. 3 i 4 mogą być traktowane jako szum biały. Tymczasem przedstawione spektra (rysunki nie są właściwie opisane, nie wynika z nich, co dokładnie przedstawiają dolne wykresy) w zasadzie wykluczają taką konkluzję: są na nich widoczne wyraźne składowe harmoniczne o znacznym poziomie. Dlatego proszę o przedstawienie rozszerzonej analizy tych sygnałów, która zaprzeczy lub potwierdzi postawioną hipotezę.
13. Rysunek 5 na stronie 659 nie został właściwie opisany: nie wynika z niego jaka jest rozpiętość wartości sygnału „surowego”, ani jakim rzeczywistym wartościom przyspieszenia te wartości odpowiadają. Nie podano także dla jakiej zmiany temperatury to zjawisko wystąpiło. Dlatego trudno z niego wywnioskować, czy wpływ zmian temperatury był duży. Proszę o uściślenie tych danych.

7. Ocena końcowa

Czytając przedstawione powyżej uwagi krytyczne można odnieść wrażenie, że recenzent jest nastawiony do pracy nieprzychylnie. Uważam jednak, że pomimo wysokiego poziomu pracy, zadaniem recenzenta jest pokazanie, co jeszcze można by zrobić lepiej. Nie umniejsza to jednak wartości pracy.

Warto zauważyć, że w swojej pracy doktorskiej mgr Michał Okulski trafnie zdefiniował zadanie badawcze, które nie zostało jeszcze w sposób zadowalający rozwiązane, i sformułował tezę, że rozwiązanie tego zagadnienia można znacznie poprawić, lecz wymaga to uprzednich dodatkowych badań identyfikacyjnych i odpowiedniego podejścia do projektowania algorytmu sterowania. Sposobem udowodnienia postawionej tezy było samodzielne skonstruowanie drona wybranego typu, przeprowadzenie wskazanych badań identyfikacyjnych, a następnie implementacja wybranych algorytmów sterowania: standardowo



stosowanych i ulepszonych, w tym autorsko zmodyfikowanych, co stanowi oryginalny dorobek autora i poszerza wiedzę w ramach dyscypliny. W moim przekonaniu postawione tezy zostały przez autora udowodnione. Pracę cechuje wysoka przydatność dla nauk inżynieryjno-technicznych z uwagi na jej wysoką przydatność w rzeczywistych zastosowaniach, co zostało przez autora wykazane poprzez konstrukcję drona i jego testy na lotnisku. Dowodem ich przeprowadzenia są nagrane i udostępnione przez Doktoranta filmy dokumentujące przeloty drona.

Podczas przeprowadzania prac autor wykazał się znajomością projektowania i budowy układów mikroprocesorowych, budowy modeli w postaci sieci neuronowych oraz ich wykorzystania do modelowania układów automatyki, oraz sterowania przy pomocy algorytmów standardowych (PID) oraz algorytmów regulacji predykcyjnej. Jako zagadnienia pomocnicze podczas przeprowadzania badań Doktorant nabył lub rozszerzył umiejętności programowania mikrokontrolerów i posługiwania się Matlabem. W sposób jednoznaczny dowodzi to, że kandydat posiada wiedzę z zakresu objętego dyscypliną *Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, oraz ma umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uważam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może stanowić podstawę nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*. Wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Z wyrazami szacunku

Dawid Bismar

Gliwice, 27 kwietnia 2023

