
WOJCIECH GIERNACKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

ZAŁĄCZNIK 2.

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

12 marzec 2019

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Wojciech Giernacki

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

2011 r. Doktor nauk technicznych

Dyscyplina naukowa: Automatyka i Robotyka

Politechnika Poznańska

Wydział Elektryczny

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Odporne sterowanie adaptacyjne z ograniczeniem sygnału sterującego oparte na algorytmie CDM*

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Królikowski

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Stefan Domek (Zachodniopomorski Uniwersytet

Technologiczny), dr hab. inż. Karol Rumatowski, prof. PP (Politechnika Poznańska)

2006 r. Magister inżynier

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka

Politechnika Poznańska

Wydział Elektryczny

Tytuł pracy dyplomowej: *Przegląd i analiza metod opisujących działanie układów regulacji impulsowej*

Promotor: dr hab. inż. Karol Rumatowski, prof. PP

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej,
adiunkt od 01.10.2018 r. do obecnie.

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej,
starszy wykładowca od 01.10.2015 r. do 30.09.2018 r.
(zmiana stanowiska z powodów zdrowotnych)

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej,
adiunkt od 01.10.2011 r. do 30.09.2015 r.

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej,
doktorant od 01.10.2006 r. do 30.09.2011 r.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie pod wspólną nazwą:

***Wybrane aspekty poprawy jakości sterowania i bezpieczeństwa lotów
bezzałogowych statków powietrznych***

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl 13 publikacji przedstawionych poniżej.

b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- [A1] B. Kranjec (25%), S. Sladić (10%), **W. Giernacki (40%)**, N. Bulic (25%)
PV System Design and Flight Efficiency Considerations for Fixed-Wing Radio-Controlled Aircraft – A Case Study
Energies, 11(10), 2648, 2018
DOI: 10.3390/en11102648
MNiSW Lista A: 25 pkt., IF₂₀₁₇=2,676¹
- [A2] **W. Giernacki (60%)**, T. Sadalla (40%)
Comparison of Tracking Performance and Robustness of Simplified Models of Multirotor UAV's Propulsion Unit with CDM and PID Controllers (with anti-windup compensation)
Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 19(3): 31-40, 2017
MNiSW Lista A: 15 pkt., IF₂₀₁₇=0,698
- [A3] **W. Giernacki (100%)**
Near to Optimal Design of $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Fractional-Order Speed Controller (FOPID) for Multirotor Motor-Rotor Simplified Model
2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 7-10.06.2016, Arlington, VA, USA, str. 320-326
DOI: 10.1109/ICUAS.2016.7502516
MNiSW: 15 pkt., konferencja indeksowana cyklicznie w Web of Science
- [A4] **W. Giernacki (80%)**, J. P. Coelho (20%)
Evolutionary Based Tuning Approach of $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Fractional-order Speed Controller for Multirotor UAV
13th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing (CONTROLO), 4-6.06.2018, Ponta Delgada, Portugalia
DOI: 10.1109/CONTROLO.2018.8514269
MNiSW: 15 pkt., konferencja indeksowana cyklicznie w Web of Science
- [A5] **W. Giernacki (60%)**, T. Sadalla (15%), J. Gośliński (5%), P. Kozierski (10%), J. P. Coelho (5%), S. Sladić (5%)
Rotational Speed Control of Multirotor UAV's Propulsion Unit based on Fractional-order PI Controller
2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 28-31.08.2017, Miedzyzdroje, Polska, str. 993-998
DOI: 10.1109/MMAR.2017.8046965
MNiSW: 15 pkt., konferencja indeksowana cyklicznie w Web of Science

¹ Wartość Impact Factor (IF) podana zgodnie z rokiem publikacji lub wg IF dla roku 2017 w przypadku prac z lat 2018-2019 (z tych lat IF jest jeszcze niedostępny) – źródło: Journal Citation Report. Punkty MNiSW podano zgodnie z rokiem publikacji. Procentowy wkład habilitanta w powstanie poszczególnych prac udokumentowano oświadczeniami współautorów (Załącznik nr 5), natomiast w Załączniku nr 3 habilitant wyszczególnia swój najważniejszy wkład merytoryczny.

- [A6] **W. Giernacki (65%)**, D. Horla (20%), T. Sadalla (10%), T. Espinoza Fraire (5%)
Optimal Tuning of Fractional Order Controllers for Rotational Speed Control of UAV's Propulsion Unit Based on an Iterative Batch Method
 Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 20(4):22-31, 2018
MNiSW Lista A: 15 pkt., IF₂₀₁₇=0,698
- [A7] **W. Giernacki (100%)**
Drony i bezzałogowe statki powietrzne (UAV). Ku lotom autonomicznym grup latających robotów wielowirnikowych operujących w otoczeniu bliskim człowiekowi
Monografia, MNiSW: 25 pkt. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2018
 Recenzent wydawniczy: dr hab. inż. Paweł Dworak (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny)
- [A8] J. Gośliński (45%), **W. Giernacki (45%)**, A. Królikowski (10%)
A Nonlinear Filter for Efficient Attitude Estimation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
 Journal of Intelligent & Robotic Systems, online, 2019
 DOI: 10.1007/s10846-018-0949-7
MNiSW Lista A: 25 pkt., IF₂₀₁₇=1,583
- [A9] T. Espinoza Fraire (25%), A. Dzul (25%), F. Cortés-Martínez (5%), **W. Giernacki (45%)**
Real-time Implementation and Flight Tests using Linear and Nonlinear Controllers for a Fixed-wing Miniature Aerial Vehicle (MAV)
 International Journal of Control, Automation and Systems, 16(1):392-396, 2018
 DOI: 10.1007/s12555-016-0590-9
MNiSW Lista A: 20 pkt., IF₂₀₁₇=2,173
- [A10] **W. Giernacki (90%)**, T. Espinoza Fraire (5%), P. Koziński (5%)
Cuttlefish Optimization Algorithm in Autotuning of Altitude Controller of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
 In: Ollero A., Sanfeliu A., Montano L., Lau N., Cardeira C. (eds) ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference. ROBOT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 693. Springer, str. 841-852
 DOI: 10.1007/978-3-319-70833-1_68
MNiSW: 0 pkt., Konferencja z 2017 r. nie jest jeszcze zaindeksowana w Web of Science
- [A11] **W. Giernacki (100%)**
Optimal Tuning of Altitude Controller Parameters of Unmanned Aerial Vehicle Using Iterative Learning Approach
 In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Automation 2019. AUTOMATION 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 920. Springer, str. 398-407
 DOI: 10.1007/978-3-030-13273-6_38
MNiSW: 0 pkt., Konferencja z 2019 r. nie jest jeszcze zaindeksowana w Web of Science
- [A12] **W. Giernacki (45%)**, D. Horla (40%), T. Bába (5%), M. Saska (10%)
Real-Time Model-Free Minimum-Seeking Autotuning Method for Unmanned Aerial Vehicle Controllers Based on Fibonacci-Search Algorithm
 Sensors, 19(2), 312, 2019
 DOI: 10.3390/s19020312
MNiSW Lista A: 30 pkt., IF₂₀₁₇=2,475
- [A13] **W. Giernacki (100%)**
Iterative learning method for in-flight auto-tuning of UAV controllers based on basic sensory information
 Applied Sciences, 9(4), 648, 2019
 DOI: 10.3390/app9040648
MNiSW Lista A: 25 pkt., IF₂₀₁₇=1,689

Na jednotematyczny cykl składa się **13** publikacji, wśród których **7** zostało opublikowanych w czasopiśmie indeksowanych w bazie *Journal Citation Reports (JCR)*. **4** publikacje w zbiorze to prace autorskie (w tym m.in. **1** monografia oraz **1** artykuł na liście JCR). Sumaryczny współczynnik wpływu czasopism (*Impact Factor*) publikacji wchodzących w skład osiągnięcia wynosi **11,992**. Sumaryczna liczba punktów zgodnie z wykazem czasopism naukowych przygotowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) za publikacje z listy JCR oraz wszystkie publikacje w cyklu – odpowiednio **155** oraz **225**. Uśredniony, procentowy udział habilitanta w publikacjach wynosi **71,53%**.

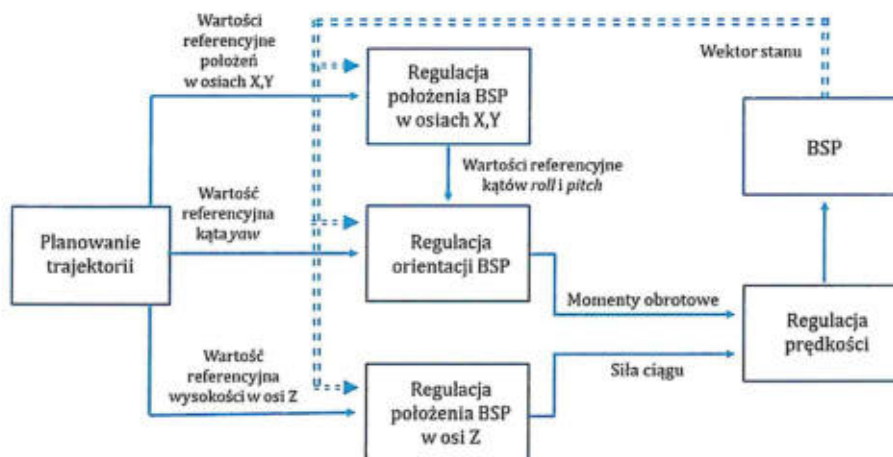
c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Przedłożony cykl publikacji obejmuje wyniki badań dotyczące **opracowania nowoczesnych metod, procedur oraz algorytmów związanych z poprawą jakości sterowania i bezpieczeństwa lotów bezzałogowych statków powietrznych.**

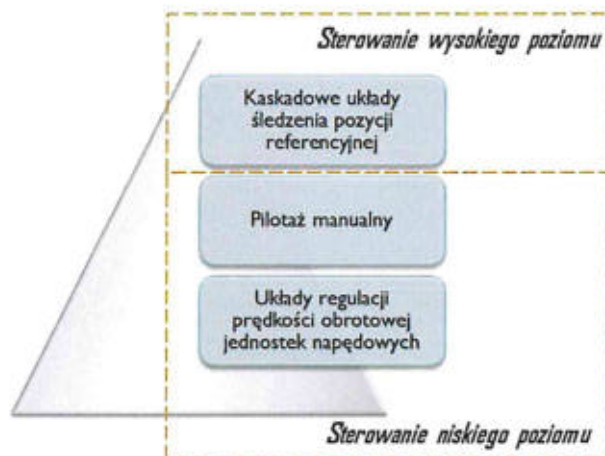
Na bazie doświadczeń zebranych przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora (głównie w zakresie metod sterowania odpornego i adaptacyjnego) oraz zainteresowania rozwijającą się tematyką Bezzałogowych Statków Powietrznych – BSP, nazywanych także robotami latającymi, habilitant nakreślił obszar badawczy wokół problemu zapewnienia czterech pożądanых cech charakteryzujących jakość lotu BSP, które z perspektywy samych metod sterowania można uogólnić niemalże na wszystkie procesy automatycznej regulacji i śledzenia w wyartykułowanej kolejności (według priorytetów stawianych układom regulacji). Są to odpowiednio: **bezpieczeństwo, precyzja, szybkość, wydatek energetyczny.**

Priorytetem w lotach wszystkich bezzałogowych statków powietrznych, jest zapewnienie bezpieczeństwa ich eksploatacji, szczególnie w otoczeniu bliskim człowiekowi. Niezależnie od użytego sposobu zdalnego sterowania lotem robota, tj. manualnej lub autonomicznej kontroli jego położenia i orientacji w przestrzeni, potrzebne są rozwiązania sprzętowe i programowe pozwalające zminimalizować ryzyko niekontrolowanych zachowań, np. gwałtownych, niespodziewanych przyziemień na skutek różnorodnych oddziaływań środowiskowych – w tym zakłóceń. Pojęcie bezpieczeństwa utożsamiane może być więc z niezawodnością sprzętową (w ujęciu wąskim), lub też rozumiane nieco szerzej jako cel nadrzędny stawiany architekturze sprzętowej oraz wielowarstwowemu układowi sterowania robotem (Rys. 1) – w tym stabilizacji jego pozycji i orientacji w sterowaniu niskiego i wysokiego poziomu (Rys. 2). Wówczas ocenę poziomu bezpieczeństwa lotu można sprowadzić do mierzalnych wskaźników powszechnie stosowanych w automatyce i robotyce, towarzyszących ocenie pracy układu regulacji, tj. jakości śledzenia sygnałów referencyjnych. Wskaźniki te pozwalają wyrazić i scharakteryzować precyzję lotu oraz jego dynamikę (np. błędy śledzenia sygnałów położenia i orientacji robota czy też prędkości obrotowej lub siły ciągu zastosowanych jednostek napędowych). Zapewnieniu wysokiej jakości i precyzji sterowania przy oczekiwanej dynamice lotu BSP nieustannie towarzyszy skorelowany wydatek energetyczny. Parametr kluczo-

wy, gdyż determinuje długotrwałość lotu, a tym samym paletę możliwych aplikacji robotów latających. Aktualnie poszukuje się rozwiązań, które pozwalają prowadzić „gospodarkę energetyczną” robota w sposób efektywny – szczególnie poprzez wykorzystanie środków sprzętowo-algorytmicznych, by maksymalizować czas przebywania statku powietrznego w locie oraz utrzymać siłę ciągu jednostek napędowych na zadeklarowanym poziomie. Tematyka ta stanowi obszar zainteresowania badawczego habilitanta z uwagi na potencjał rozwoju metod sterowania i optymalizacji.



Rys. 1. Schemat blokowy architektury sterowania BSP (źródło: [A7])



Rys. 2. Piramida warstw układów sterowania w architekturze BSP (źródło: [A7])

Analizując najnowszą literaturę poświęconą robotyce mobilnej bezzałogowych statków powietrznych, **coraz to mocniej zauważalny i akcentowany jest trend badawczy, w którym poszukuje się metod poprawy jakości i bezpieczeństwa lotu poprzez rozwój technik sterowania i estymacji, a środka do ich realizacji upatruje się w podejściach opartych na algorytmach optymalizacji czy algorytmach inteligencji maszynowej.**

W przedłożonym cyklu habilitant przedstawia tok rozumowy, który skłonił go do określenia kolejnych problemów badawczych we wszystkich warstwach architektury sterowania BSP z rysunku 2 (rozpoczynając od najniższych). **Habilitant jest jednocześnie szczególnie zainteresowany, by proponowane metody syntezy układów sterowa-**

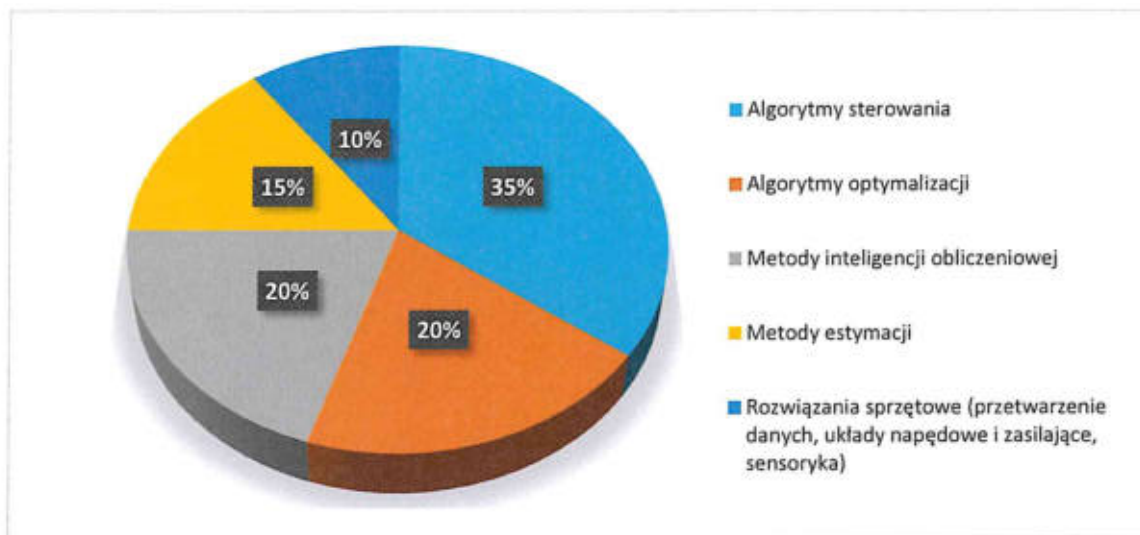
nia oznaczały się maksymalną możliwą prostotą oraz niską złożonością obliczeniową, a jednocześnie poprzez użycie mechanizmów optymalizacji wykazywały wysoką skuteczność działania w postawionym zadaniu.

Drugi, poniekąd przeciwległy biegun zainteresowania naukowego habilitanta pozwala nakreślić bardzo aktualny w środowisku naukowym problem badawczy osadzony wokół dostarczania robotowi maksymalnej możliwej wiedzy „o nim samym” poprzez projektowanie zaawansowanych algorytmów estymacji (parametrów modeli oraz wektora stanu robota), które na podstawie wyłącznie podstawowych (i niejednokrotnie zawodnych) sensorów pokładowych mogą dostarczać jednak precyzyjnej, bieżącej informacji (estymat orientacji robota w przestrzeni), minimalizując niebezpieczeństwo w sytuacji błędów lub częściowej awarii systemu sensorycznego robota. W połączeniu z przyjętymi układami sterowania położeniem oraz orientacją robota, metody estymacji przyczyniają się do niwelacji wpływu niepożądanego dryfu, który nadal stanowi problem w przypadku stosowania niskokosztowej elektroniki pomiarowej. Habilitant w przywołanym obszarze badań unika bezkrytycznego polegania wyłącznie na sensorach wizyjnych oraz systemach przechwytywania ruchu (ang. *motion capture*), powszechnie obecnie używanych do wyznaczania pozycji i orientacji robota w układzie obserwatora, z uwagi na brak możliwości ich realnego wykorzystania w lotach na zewnątrz pomieszczeń w warunkach zróżnicowanego nasłonecznienia. Rozumowanie to jest zgodne z polityką i oczekiwaniami najlepszych periodyków z robotyki, wymagających rzetelnej walidacji wyników badań w warunkach poza laboratoryjnych.

Na bazie ww. przesłanek, uszczegóławiając: **cel naukowy w przeprowadzonych badaniach prezentowanych w Osiągnięciu habilitanta stanowi rozwiązanie problemów badawczych poprzez opracowanie oryginalnych sposobów, procedur, algorytmów i metod (oraz walidacji ich skuteczności) w kontekście poprawy właściwości lotnych bezzałogowych statków powietrznych, a tym samym zwiększenia poziomu bezpieczeństwa ich lotów manualnych i autonomicznych, poprzez rozwiązania odnoszące się do poszczególnych warstw architektury sterowania BSP.**

Na rysunku 3 habilitant zamieścił poglądowo oszacowane rozłożenie uwagi odpowiadające nakładowi czasu na prace badawcze zrealizowane w poszczególnych obszarach tematycznych, którego efektem jest prezentowany cykl.

Celem zapewnienia przejrzystości referowanych treści, tj. przede wszystkim scharakteryzowania najważniejszych osiągnięć naukowych z przedstawieniem kontekstu, co owe badania wnoszą do światowej nauki, postanowiono zreferować cykl publikacji w kolejności od rozwiązań traktujących o najniższych warstwach sterowania z rysunku 2, po te prace traktujące o autonomicznych lotach bezzałogowych statków powietrznych (w warstwie najwyższej).



Rys. 3. Procentowy rozkład uwagi habilitanta na poszczególne obszary tematycznie związane z BSP

Badania nad długotrwałością lotu BSP

Pierwszym, niezwykle istotnym i pasjonującym habilitanta poznawczo obszarem pracy badawczej były rozważania, jak przyczynić się do wydłużenia czasu lotu bezzałogowego statku powietrznego, zmniejszając przy tym liczbę międzylądowań – najniebezpieczniejszych manewrów z jakimi klasa niewielkich stałopłatowych samolotów bezzałogowych ma do czynienia. Okazję ku temu stanowił wyjazd szkoleniowy na Uniwersytet w Rijecie, w Chorwacji, gdzie w 2014 roku habilitant miał możliwość po raz pierwszy zetknąć się z tą klasą BSP na polu kilku wspólnych prac badawczych z zespołem dr. Sasy Sladica. W ramach zawiązanej współpracy naukowej, przez kolejne lata, dzięki udostępnieniu zaplecza technicznego (BSP o rozpiętości skrzydeł ~ 1 m, paneli fotowoltaicznych oraz lotniska w Grobniku), **możliwe było wykonanie następujących zadań, składających się na osiągnięcia habilitanta:**

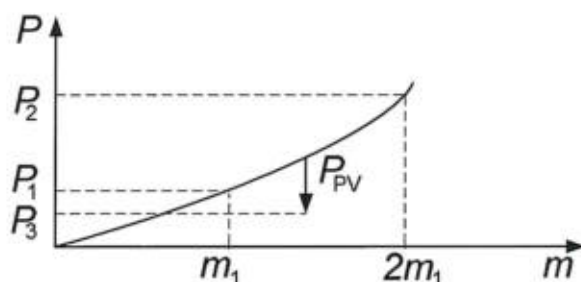
- a) opracowanie systemu fotowoltaicznego (PV) z przekształtnikiem DC-DC (podwyższającym napięcie) oraz mikroprocesorowym sterownikiem – wykorzystując algorytm poszukiwania punktu mocy maksymalnej MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*) w układzie sterowania przekształtnika celem wydłużenia czasu lotu BSP,
- b) opracowanie i przeprowadzenie kompleksowych badań (w drodze opracowania teoretycznego oraz lotów eksperymentalnych) nad wydłużeniem czasu lotu niewielkiego BSP wyposażonego w zaproponowany system PV oraz oszacowanie granic miniaturyzacji tego typu konstrukcji BSP z uwagi na potencjalnych zysk energetyczny.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w [A1], gdzie prace badawcze były inspirowane projektem Solar Impulse², lecz rozważania dotyczą mniejszych rozmiarów samolotu bezzałogowego operującego na pułapie lotu o wiele niższym (w zasięgu wzroku), a więc

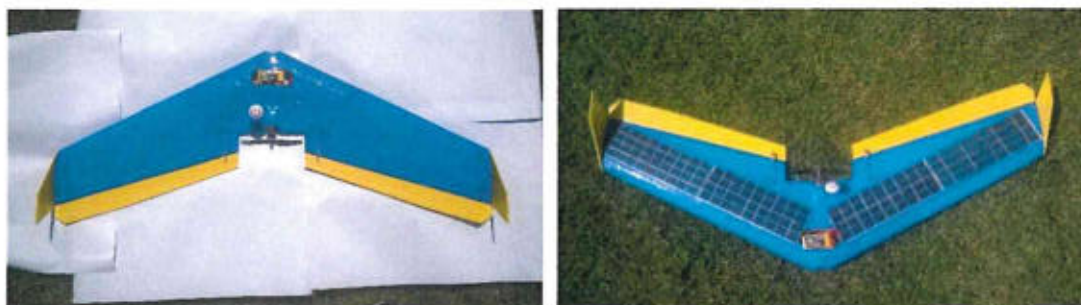
² Solar Impulse Project – zainicjowany w Szwajcarii projekt budowy samolotu napędzanego energią słoneczną. Pierwsza wersja Solar Impulse o potężnej rozpiętości skrzydeł wynoszącej 63,4 m, na przełomie pierwszej i drugiej dekady XXI wieku udowodniła, że można skutecznie zasilać energią słoneczną samolot wyposażony w ogniwa słoneczne, by jego układ napędowy był zdolny do lotów na dalekie odległości.

pułapie w którym mocno ograniczony bywa dostęp do energii słonecznej w stosunku do np. zasilanych solarnie BSP używanych powszechnie do obserwacji Ziemi z dużej wysokości. Na niższych wysokościach odczuwalne są silnie podmuchy wiatru, fluktuacja promieniowania słonecznego oraz nieliniowe zjawiska przepływu cieplnego. Zjawiska te skutkują silnym zakłóceniem w dostępie do promieniowania słonecznego powodując problemy, których projektanci BSP operujących na dużych wysokościach nie muszą się obawiać, tj. odcinków czasu, w których układ PV nie generuje dodatkowej energii w układzie zasilania, a wręcz odwrotnie – sam staje się dodatkową masą obciążającą układ napędowy BSP skracając nominalny czas lotu. Naturalne jest wówczas pytanie o opłacalność stosowania „zielonej energii” w kontekście rozważanej klasy BSP i jej ograniczeń. Być może lepiej środka do zwiększenia zasięgów lotu szukać w doborze efektywniejszych energetycznie metod sterowania – lepiej stabilizujących BSP w trakcie lotu, a tym samym generujących mniejsze, chwilowe opory aerodynamiczne? Tak sformułowane pytania nurtowały habilitanta przystępując do prac, których wyniki zaprezentowano w publikacji [A1].

Z wyprowadzeń matematycznych przedstawionych w [A1], moc P niezbędną do przeniesienia całkowitej masy m BSP (dla stałej prędkości przelotowej BSP v_f) można przedstawić graficznie jak na rysunku 4. Rysunek ten obrazuje jak ważna z perspektywy wydatku energetycznego jest minimalizacja masy startowej i z jakim potencjalnym ograniczeniem mierzy się współczesna robotyka BSP w zadaniach transportowych – mając na uwadze powszechnie stosowane układy napędowe z silnikami bezszczotkowymi prądu stałego (ang. *BrushLess Direct-Current motor*) zasilanymi najczęściej z akumulatorów litowo-polimerowych (LiPo).



Rys. 4. Przedstawienie graficzne zależności $P=f(m)$: m_1 – masa nominalnego BSP, P_{PV} – moc uzyskana z systemu PV, P_1 – moc generowana z nominalnego układu zasilania, P_2 – moc przy której można przenieść dwukrotność masy BSP, P_3 – moc którą potrzeba wygenerować przez układ zasilania BSP wsparty systemem PV (źródło: [A1])



Rys. 5. Nominalny (a) oraz doposażony w system PV (b) bezzałogowy statek powietrzny użyty w przeprowadzonych eksperymentach lotniczych (źródło: [A1])

W artykule, przedstawiono porównanie wyników badań dla BSP z rysunku 5 o masie nominalnej 774 g oraz jego modyfikacji, tj. wersji z zaproponowanym systemem PV (z przekształtnikiem napięcia oraz mikrokontrolerem) o łącznej wadze 293 g. Loty eksperymentalne były prowadzone na lotnisku w Grobniku w dni słoneczne (21-22.06.2016 r.) oraz wcześniej w położonej na tej samej wysokości miejscowości Viškovo, dla których na podstawie baz danych prognozy pogody oszacowany poziom radiacji słonecznej (wyrażonej irradiancją – intensywnością) wyniósł 1,1 kW/m². Z zarejestrowanych eksperymentów, których reprezentatywny wynik przedstawiono i omówiono szczegółowiej w artykule wynika, że nie jest możliwe uzyskanie radykalnej poprawy długotrwałości lotu BSP o tak małych rozmiarach, a jedynie o 6,25% można wydłużyć czasu lotu (pozbawionego agresywnych manewrów). Dla innego rejonu geograficznego (np. Wielkiej Brytanii, gdzie średni szacowany poziom intensywności promieniowania słonecznego wynosi 0,5 kW/m²), proponowany system byłby niestety deficytowy ($P_1 < P_3$). Jedną z przyczyn takiego stanu jest stosunkowo niski współczynnik sprawności ogniw fotowoltaicznych η . Analizowany przypadek BSP o rozpiętości skrzydeł 1 m, uznano za graniczny w rozpatrywanych warunkach, natomiast w obszarach o mniejszej intensywności promieniowania słonecznego zasadnym jest użycie konstrukcji stałopłatowych BSP o rozpiętości skrzydeł > 2 m.

W świetle uzyskanych wyników badań habilitant postanowił skierować uwagę na potencjał, który tkwi w metodach modelowania, sterowania, estymacji i optymalizacji użytych w wielowarstwowej architekturze sterowania BSP, by tą drogą przyczynić się do zwiększenia długotrwałości lotów.

Poprawa jakości regulacji prędkości obrotowej i siły ciągu jednostek napędowych BSP

Prace badawcze omówione w tej części Autoreferatu powstały w początkowym okresie zainteresowania habilitanta układami sterowania bezzałogowych statków powietrznych. W syntetycznej formie część z nich (lata 2011-2016) została zestawiona i podsumowana w Rozdziale 10 monografii [A7]³.

W bezzałogowych statkach powietrznych, by mówić o efektywnym i bezpiecznym wykorzystaniu potencjału tkwiącego w ich układzie jednostek napędowych złożonym z silników (najczęściej BLDC), elektronicznego regulatora prędkości (ESC) oraz śmigieł, potrzeba przywrócić się problemowi uzyskania oczekiwanej siły ciągu oraz prędkości obrotowej poszczególnych śmigieł, a w przypadku konstrukcji wielowirnikowych – problemowi zrównoważenia prędkości obrotowej/siły ciągu poszczególnych jednostek. Niezwykle niebezpieczny efekt nierównoważenia sił ciągu jest szczególnie widoczny w fazie zawisu BSP. Wówczas wszystkie jednostki napędowe teoretycznie powinny odznaczać się jednakową siłą ciągu i prędkością obrotową (dla w pełni symetrycznej konstrukcji wielowirnikowego BSP), stabilizując robota w bezruchu. Na skutek potencjal-

³ W Przedmowie monografii [A7] wyartykułowano zamysł jej powstania oraz finalny kształt i pokładaną rolę – pierwszego, przygotowanego w polskim ośrodku akademickim, zwarte opracowania w obszarze wielowirnikowych bezzałogowych statków powietrznych systematyzującego dostępną wiedzę w tym zakresie oraz dotychczasowe wyniki samodzielnych oraz współautorskich prac badawczych habilitanta dla docelowego odbiorcy treści, tj. pracowników środowisk naukowych oraz studentów przedmiotu obieralnego „Roboty latające” na kierunku *Automatyka i Robotyka* Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej.

nych różnic w precyzji wykonania elementów (szczególnie śmigieł), zużycia elementów jednostki napędowej czy drobnych, nawet niewidocznych otarć śmigieł, jednostki napędowe w wielowirnikowym BSP są tylko teoretycznie identyczne. Wykorzystanie regulatorów pozycji i orientacji pozwala korygować niepożądane efekty w locie robota, jednak w ocenie habilitanta poprawę stabilizacji i dynamiki BSP można uzyskać także dzięki wprowadzeniu w niskopoziomowej architekturze sterowania BSP dodatkowych struktur regulacji prędkości obrotowej / siły ciągu dla każdej z jednostek napędowych. Tak zdefiniowana hipoteza badawcza stanowi wynik analizy dwóch aspektów:

- a) regulacja w proponowanym podejściu może zachodzić z bardzo dużą częstotliwością (powszechnie do sterowania pracą silników BLDC w jednostkach napędowych BSP stosuje się np. modulację szerokości impulsów), co sprzyja szybkiej reakcji regulatora na pojawiający się uchyb regulacji,
- b) w większości (szczególnie niskokosztowych) konstrukcji BSP, brak jest nominalnie pomiaru prędkości obrotowej śmigieł lub/i estymacji wytwarzanej za ich pomocą siły ciągu, przez co nie można rozważać układów ESC jako „pełnoprawnych” regulatorów w nakreślonym znaczeniu, gdyż wielkość uchybu wyzwalająca ich pracę nie jest sygnałem prędkości lub siły ciągu.

Odwzorowując realizację kolejnych etapów założonego planu badawczego, do oryginalnego wkładu publikacji [A2]-[A6] w rozwój dyscypliny naukowej, habilitant wniósł wartość dodaną poprzez: sformułowanie zdefiniowanej hipotezy badawczej, opracowanie kolejnych, skutecznych metod i procedur syntezy układów regulacji prędkości i siły ciągu oraz strojenia zaproponowanych regulatorów przy określonych warunkach i zakresach ich stosowalności.

Na bazie wcześniejszych doświadczeń i prac habilitanta dotyczących stosunkowo mało rozpowszechnionej metody sterowania odpornego CDM (ang. *Coefficient Diagram Method*), jak również podjętej roli promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim traktującym o tematyce kompensatorów zjawiska windup (docelowo dla układów niecałkowitego rzędu), habilitant zainteresowany był przeniesieniem i rozwojem tych doświadczeń na problem śledzenia referencyjnych zmian siły ciągu jednostek napędowych stosowanych w BSP. Habilitant dysponował wówczas zapleczem technicznym w postaci pierwowzoru stanowiska laboratoryjnego do prowadzenia prób dynamicznych z jednostkami napędowymi (opracowanym w Zakładzie Automatyki i Robotyki Politechniki Poznańskiej, scharakteryzowanym w [B3], które ewoluowało w kolejnych latach do formy z [B2]). Dzięki niemu **możliwe było opracowanie modeli matematycznych wyselekcjonowanych jednostek napędowych o różnej dynamice oraz różnych gabarytach silników i śmigieł w drodze eksperymentu identyfikacji prowadzonego dla rejestrowanych charakterystyk odpowiedzi skokowych zaproponowanymi przez habilitanta metodami i narzędziami do estymacji parametrów modeli opisanymi w [A2]**. W tej samej pracy, dla uzasadnionego w oparciu o dane z eksperymentów i fazy walidacji, przybliżenia dynamiki jednostek napędowych modelami w strukturze Kūpfmüllera (inercyjnej I rzędu z opóźnieniem), możliwa była ich parametryzacja z wykorzystaniem:

- a) środowiska numerycznego *System Identification Toolbox* pakietu MATLAB,
- b) estymacji opartej na metodzie graficznej.

Prace te stanowiły bezpośrednie rozszerzenie rezultatów sygnalizowanych w ramach doniesienia (referatu) konferencyjnego⁴, przedstawiając analizę rezultatów dla trzech modeli jednostek napędowych. W okresie ich powstawania kilka bardzo silnych ośrodków naukowych pracowało nad tematyką poprawy właściwości dynamicznych jednostek napędowych (w kontekście metod sterowania), m.in. Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS), Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, KU Lueven.

Z uwagi na poczynione uproszczenia w modelowaniu dynamiki jednostek napędowych (założenie struktury modelu obiektu), **do syntezy układów regulacji siły ciągu w pracy [A2], habilitant wykorzystał regulator odporny zaprojektowany metodą diagramu współczynnikowego (CDM), którego skuteczność zestawiono z pracą najpowszechniej stosowanego regulatora PID strojonego metodą lokowania biegunów i wyposażonego w układy kompensacji zjawiska windup (AWC) w pięciu różnych wariantach, jak i z wariantem bez kompensatora.** Rozszerzony opis metody diagramu współczynnikowego (m.in. o aspekt użycia tytułowego diagramu współczynnikowego, jako narzędzia kontroli stabilności, dynamiki oraz odporności projektowanego układu regulacji) oraz inne, wybrane wyniki badań z publikacji habilitanta, a także schematy blokowe i szczegóły zastosowanych układów AWC, odnaleźć można na kartach monografii [A7], uzupełniającej i systematyzującej wyniki badań z referowanego tutaj obszaru badawczego.

Dobór obu projektowanych układów regulacji (CDM oraz PID z AWC) nie był przypadkowy, gdyż obie strategie strojenia regulatorów wywodzą się bezpośrednio z metody lokowania biegunów. Obie pozwalają też dla znanego, opisanego transmitancją operatorową modelu obiektu oraz zadanej struktury regulatora, wyznaczyć jego nastawy w oparciu o rozwiązanie równania diofantycznego. Istotną różnicę stanowi natomiast sposób wyznaczania lokowania biegunów transmitancji operatorowej zamkniętego układu regulacji, co skutkuje zróżnicowaną skutecznością tłumienia zakłóceń, zróżnicowaniem kształtu przebiegów przejściowych sygnału wyjściowego oraz zróżnicowaną odpornością na niepewność parametryczną. W kontekście tych różnic habilitant w publikacji [A2] dokonał analizy porównawczej. Za miarę oceny jakości śledzenia i odporności parametrycznej, posłużyły zaproponowane w pracy całkowite wskaźniki jakości, czas ustalania sygnału wyjściowego oraz skuteczność tłumienia zakłóceń (typu podmuch wiatru).

Za najważniejsze, własne osiągnięcie naukowe w ramach niniejszej publikacji, habilitant uważa zaproponowanie oryginalnego, autorskiego podejścia do problemu poprawy jakości sterowania pracą jednostek napędowych poprzez regulację siły ciągu możliwą dzięki syntezie układu regulacji, w której regulator (w rozważanym przykładzie: CDM oraz PID z AWC) jest strojony dla modelu inercyjnego I rzędu z opóźnieniem, uzyskanego w wyniku eksperymentu identyfikacji na podstawie zarejestrowanych danych z prób dynamicznych prowadzonych na stanowisku badawczym (tzw. hamowni). Układ regulacji wykazujący wysoką odporność na niepewność parametryczną modelu pozwala wówczas kompensować uproszczenia poczynione w opracowanym modelu. Wymierną korzyść stanowi również prostota budowy regulatora.

⁴ Giernacki W., Horla D., Sadalla T., Coelho J.P., *Robust CDM and pole placement PID based thrust controllers for multirotor motor-rotor simplified model: The comparison in a context of using anti-windup compensation*, IEEE 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491826.

Zaproponowane podejście, metodykę i powyższe rozumowanie można z powodzeniem uogólnić i przenieść na problem regulacji prędkości obrotowej, momentu obrotowego czy też regulację napięcia w najniższej warstwie architektury sterowania BSP (Rys. 2), co zostało przedstawione w kolejnych pracach z cyklu [A3]-[A6], traktujących o regulacji prędkości obrotowej jednostek napędowych i sposobach optymalizacji nastaw regulatorów prędkości. Odpowiednio, habilitant po fascynującej lekturze publikacji rozpoznawalnych autorów (m.in. Podlubny, Petráš, Monje, Ostalczyk, Chen, Tepljakov, Dzieliński, Sierociuk), reprezentujących najsilniejsze ośrodki prowadzące badania w zakresie rachunku różniczkowego niecałkowitego rzędu (ang. *non-integer order calculus*), dostrzegł potencjalne korzyści płynące z jego zastosowania w kontekście syntezy układów regulacji z regulatorami ułamkowego rzędu, czego wyrazem są prace [A3]-[A6]. W środowisku naukowym skupionym wokół tematyki bezzałogowych statków powietrznych niewiele było w tych latach prac traktujących o rozszerzeniu możliwości klasycznych regulatorów takich jak PID, PD czy PI, wprowadzając elementy rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu. W literaturze dowiedziono, że dla konkretnego modelu liniowego obiektu regulacji w ogólności zawsze można zaproponować regulator ułamkowego rzędu w strukturze FOPID (ang. *fractional-order proportional-integral-derivative*) z równania (1), który odznaczać się będzie zapewnieniem lepszej jakości regulacji niż regulator całkowitego rzędu, tj. dzięki precyzyjniejszemu dopasowaniu nachylenia logarytmicznej charakterystyki modułu zamkniętej pętli regulacji (-20λ dB/dek), poprzez wprowadzenie dwóch dodatkowych stopni swobody regulatora: nastaw (λ i μ) odpowiadających odpowiednio rzędowi członu całkującego i różniczkującego regulatora.

Habilitant zainspirowany wynikami tych prac postanowił rozszerzyć dotychczasowe badania własne o prace nad syntezą regulatorów ułamkowego rzędu dla problemu śledzenia referencyjnych zmian prędkości obrotowej według nakreślonego planu badań. Syntetyczny opis uzyskanych wyników zawarto w monografii [A7] w Rozdziale 10. W Autoreferacie habilitant zaprezentował najważniejsze wyniki z prac [A3]-[A6] oraz ich wkład w rozwój dyscypliny (wytluszczenie tekstu):

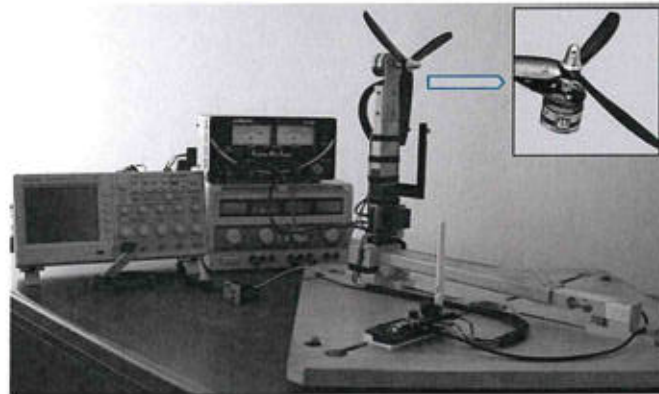
- a) W pracy [A3] zaprezentowanej na najbardziej prestiżowej, cyklicznej, międzynarodowej konferencji ICUAS (*International Conference on Unmanned Aircraft Systems*) poświęconej wyłącznie tematyce BSP, habilitant zaproponował, by dla problemu śledzenia referencyjnych zmian prędkości obrotowej modelu jednostki napędowej BSP z rysunku 6 użyć regulatora ułamkowego rzędu w strukturze FOPID:

$$G_{FOPID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu, \quad (1)$$

gdzie K_p jest wzmocnieniem członu proporcjonalnego, K_I – wzmocnieniem członu całkującego, K_D – wzmocnieniem członu różniczkującego, λ i μ są dodatnimi, rzeczywistymi liczbami.

W artykule pojawia się propozycja oryginalnego podejścia do syntezy układu regulacji, w myśl autorskiej procedury numerycznego strojenia regulatora FOPID nazwanej *Best from the best*, wykorzystującej model matematyczny jednostki napędowej. Za pomocą studium przypadku, uszczegółowiono kolejne etapy ogólnej procedury strojenia regulatora

w kontekście zapewnienia najlepszej możliwej jakości śledzenia sygnału referencyjnego w układzie z ograniczeniem amplitudy sygnału sterującego oraz w obecności zakłócenia o charakterze skokowym dla zaproponowanej funkcji celu (miary oceny jakości śledzenia). Problem poszukiwania nastaw regulatora sprowadzony został do problemu optymalizacji funkcji celu przy ograniczeniach (zadawanych przedziałach poszczególnych nastaw regulatora). W pracy na podstawie wyników badań numerycznych zamieszczono wyniki analizy odporności w uzyskanym układzie regulacji prędkości obrotowej na wzór wcześniejszego rozumowania zaprezentowanego w pracy [A2].



Rys. 6. Jednostka napędowa (silnik BLDC AXI 2814/12 GOLD LINE ze śmigłem GWS-HD9050x3-SW 9x5") zamocowana na stanowisku laboratoryjnym do prowadzenia prób dynamicznych opracowanym w Instytucie Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej (źródło: [A3])

- b) Wyniki przeprowadzonych badań numerycznych podsumowane w pracy [A3] uzmysławiają, że problem poszukiwania najlepszych nastaw regulatora lub nastaw zbliżonych do nich względem zdefiniowanego kryterium oceny i wprowadzonych ograniczeń jest niezwykle czasochłonny jeśli przyjmie się szeroki zakres poszukiwanych nastaw, a należy pamiętać, że w przypadku regulatora FOPID jest ich aż pięć i są one niezależne od siebie. Z pomocą w eksploracji tak dużej przestrzeni poszukiwań w pracy [A4] przychodzą heurystyczne metody optymalizacji inspirowane światem przyrody – uznawane przez habilitanta za niezwykle interesujące patrząc przez pryzmat ich rozwoju i mnogości w ostatnich latach. Z tak szerokiego spectrum metod **habilitant w publikacji [A4] zaproponował użycie jednej z najpowszechniej stosowanych w różnorodnych problemach badawczych, tj. metodę optymalizacji rojem cząstek PSO (ang. Particle Swarm Optimization) do syntezy układu regulacji prędkości obrotowej (z regulatorem typu FOPID oraz modelem jednostki napędowej z rysunku 6) w zaproponowanych dwóch wariantach:**
- w pierwszym – synteza układu prowadzona jest dwufazowo – w pierwszej dla klasycznego regulatora PID, a następnie optymalizacji poddawane są dwa parametry regulatora FOPID, tj. λ i μ ,
 - w drugim – poszukiwane są jednocześnie wszystkie nastawy regulatora FOPID z równania (1).

Zaproponowaniem takiego podejścia do syntezy układu regulacji prędkości obrotowej kierowała chęć pozyskanie wiedzy: na ile zastosowany algorytm PSO jest niewrażliwy na lokalne minima w obu wariantach; jak duża liczba obliczeń jest niezbędna do uzyskania wyników, które można uznać za satysfakcjonujące we-

dług nakreślonej miary oceny oraz jak uzyskane wyniki plasują się w porównaniu do regulatora PID w kontekście poprawy jakości regulacji.

- c) Praca [A5] stanowi kontynuację badań zaprezentowanych w publikacjach [A3] i [A4]. Habilitant podjął w niej próbę odpowiedzi na pytanie: Jak skuteczne śledzenie referencyjnego sygnału prędkości obrotowej można uzyskać w prostszej strukturze regulatora ułamkowego rzędu niż FOPID? Wobec konieczności strojenia pięciu parametrów regulatora FOPID oraz braku metod skutecznej analizy i oceny stabilności w procedurze syntezy układów regulacji z takim typem regulatora, **habilitant zaproponował zastosowanie struktury regulatora FOPI (ang. *Fractional-Order Proportional-Integral*) do opracowania autorskiej procedury syntezy układu regulacji prędkości obrotowej – nazwanej SCoMR-FOPI (*Modeling and Rotational Speed Control of Motor-Rotor Unit*), bazującej na twierdzeniach Hermite'a-Biehlera i Pontryagina pozwalających wyznaczyć zakresy nastaw regulatora FOPI, dla których zamknięty układ regulacji będzie stabilny w sensie kryterium BIBO (ang. *Bounded Input Bounded Output*). Wymierny zysk w opracowanej procedurze, to redukcja czasu poszukiwania nastaw regulatora tylko do przedziałów, dla których układ regulacji jest stabilny. W [A5] wzorem wcześniejszych prac przeprowadzono kompleksową analizę porównawczą w kontekście oceny jakości śledzenia oraz odporności układów z poszczególnymi typami regulatorów (PID, CDM, FOPI, FOPID).**
- d) Praca [A6] jest w ocenie habilitanta pracą przełomową i zwrotną w jego dorobku. Pozwoliła wyznaczyć aktualny i przyszły kierunek prac badawczych i dydaktycznych zespołu osób zebranych wokół laboratorium dronowego AeroLab⁵. Zaprezentowana w pracy [A6] koncepcja użycia deterministycznej metody optymalizacji zerowego rzędu w procesie samostrojenia nastaw regulatora wykorzystująca mechanizmy uczenia iteracyjnego, ewoluowała w kolejnych pracach [A11]-[A13] stając się przyczynkiem dużego zainteresowania środowiska naukowego BSP (oraz współpracy habilitanta z ośrodkami naukowymi w Czechach, Hiszpanii i Chinach).

Główny wkład habilitanta w powstanie pracy [A6] polega na udoskonaleniu i zweryfikowaniu w warunkach eksperymentów symulacyjnych autorskiej procedury syntezy układu regulacji automatycznej z [A5] o nowy moduł optymalnego wsadowego samostrojenia regulatora.

W proponowanym podejściu, strojenie regulatorów ułamkowego rzędu w strukturze proporcjonalno-całkującej (FOPI) jest prowadzone w oparciu o liniowy model jednostki napędowej. Korzystając z użycia zaproponowanego przez habilitanta twierdzenia Hermite'a-Biehlera i Pontryagina wyznaczony zostaje dopuszczalny zakres nastaw regulatora, dla których układ regulacji prędkości obrotowej pracuje stabilnie – analogicznie, jak miało to miejsce w [A5]. W pracy [A6] **kluczową nowość stanowi opracowanie oryginalnej metody samostrojenia re-**

⁵ Poznan University of Technology Drone Laboratory „AeroLab” – zainicjowane i współtworzone przez habilitanta laboratorium dronowe, w którym prace badawcze i dydaktyczne prowadzą osoby skupione wokół grupy badawczej Unmanned Aerial Vehicles Research Group (UAV_RG), którą habilitant kieruje. Detale na stronie: <http://www.uav.put.poznan.pl> opracowanej w celach informacyjnych oraz publikacji i promocji wyników badań.

regulatora opartej na uczeniu maszynowym, w której zaproponowany algorytm redukcji przedziału wykorzystujący ciąg liczb Fibonacciego oraz mechanizm sznurowania (ang. *bootstrap*) pozwalają naprzemiennie eksplorować przestrzeń nastaw regulatora w poszukiwaniu tych najlepszych w myśl predefiniowanej funkcji celu. Uzyskany w efekcie model regulatora przy wykorzystaniu aproksymacji Ostaloupa może w jego dyskretnej postaci zostać następnie zaimplementowany np. w systemach wbudowanych wielowarstwowej architektury sterowania BSP. W pracy [A6] skuteczność proponowanej metody została odniesiona do rezultatów prac wcześniejszych.

Poprawa stabilizacji kątowej w module orientacji BSP

W ramach kolejnych zadań badawczych habilitant chciałby wyszczególnić wyniki z publikacji [A7]-[A9], w których za wspólny cel naukowy przyjęto opracować nowe metody poprawy jakości sterowania i estymacji w module orientacji BSP.

W monografii [A7], w kolejnych rozdziałach, traktujących o technikach modelowania dynamiki BSP oraz metodach estymacji i sterowania, znajdują się liczne wyniki badań w tym zakresie. W Rozdziale 11 można wyszczególnić główny wkład habilitanta polegający na opracowaniu oryginalnego, autorskiego podejścia do syntezy układu symultanicznej stabilizacji orientacji BSP w przestrzeni za pomocą proporcjonalno-kwadratowego kwaternionowego regulatora P^2 z wykorzystaniem heurystycznego algorytmu optymalizacji rojem cząstek. Regulator ten stanowi istotną część opracowanej przez Habilitanta i zweryfikowanej w warunkach symulacyjnych architektury sterowania autonomicznego modelem BSP (X-4 Flyer) z regulatorem rozmytym PD (w pętli śledzenia zmian wysokości referencyjnej) oraz regulatorami typu PID (w pętlach sterowania pozycyjnego w osiach X i Y). Główna zaleta stałowartościowego regulatora P^2 , który pozwala jednocześnie śledzić referencyjne zmiany kątów *roll* (przechylenia), *pitch* (pochylenia) i *yaw* (odchylenia) dzięki opisowi orientacji robota za pomocą notacji kwaternionowej, uwidacznia się w jego pracy dla dużych uchybów kątowych, np. w sytuacjach takich jak awaria napędu czy silny podmuch wiatru. Dzięki reprezentacji kwaternionowej, regulator P^2 jest wówczas niewrażliwy na problem utraty stopnia swobody (ang. *gimbal lock*) występujący w zapisie kątów Eulera (przy pochyleniu ~ 90 stopni). Regulator jest zatem predefiniowany do lotów akrobatycznych – szczególnie jeśli spojrzeć na aktualnie dostarczane przez producentów jednostki AHRS (ang. *Attitude and Heading Reference System*), w których informacje o orientacji sensorów wyrażone są również kwaternionowo. W porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami (klasyczną regulacją typu PD lub PID dla kątów *roll*, *pitch* i *yaw*) liczba regulatorów w module orientacji w przypadku regulacji P^2 zmniejsza się z trzech do jednego, a liczba strojonych parametrów maleje z dziewięciu (PID) lub sześciu (PD) do dwóch (P_q oraz P_ω), co znacznie redukuje złożoność obliczeniową. Nastawy P_q i P_ω oznaczają wzmocnienia, odpowiednio, w wewnętrznej (prędkościowej) i zewnętrznej pętli regulacji kaskadowej. Pętla zewnętrzna służy do zapewnienia śledzenia zmian wartości referencyjnych prędkości kątowych. W monografii [A7] habilitant proponuje wykorzystać prostotę budowy oraz skuteczność regulatora P^2 w problemie sterowania nie tylko orientacją robota, lecz również pośrednio jego przemieszczeniami osiowymi w układzie globalnym. Habilitant opracował w tym celu odpowiednik architektury sterowania dla struktury z rysunku 1, gdzie w połączeniu z klasyczną i rozmytą regulacją PD w pozostałych pętlach sterowa-

nia, regulator P^2 zapewnia skuteczne śledzenie ścieżek referencyjnych w locie autonomicznym BSP (redukując o dwa liczbę regulatorów w architekturze sterowania robotem).

Koncepcja wykorzystania notacji kwaternionowej w kontekście metod modelowania, sterowania i estymacji została zastosowana przez habilitanta również w kolejnych pracach, w tym pracach oczekujących na publikację. Jedną z opublikowanych, a wpisującą się w cykl publikacji, jest praca [A9] zlokalizowana badawczo wokół problemu opracowania nieliniowego obserwatora stanu w module orientacji BSP zapewniającego poprawną estymację wektora stanu w sytuacjach błędów, awarii, a nawet uszkodzeń elementów układu sensorycznego – tak, aby układ sterowania na podstawie danych z modelu mógł zapewnić bezpieczny autonomiczny lot BSP. W pracy [A9] zaproponowano i zweryfikowano na zarejestrowanych danych sensorycznych z BSP Crazyflie 2.0 nową metodę filtracji, nazwaną SRUCKF (Square Root Unscented Complementary Kalman Filter) bazującą na przypadku szczególnym nieliniowej wersji filtru Kalmana SRUKF (Square Root Unscented Kalman Filter). W metodzie do obserwacji wektora stanu jest wykorzystywana fuzja danych z nieliniowego modelu czterowirnikowego BSP oraz układu AHRS, gdzie dane z modelu używane są w pierwszej fazie algorytmu, po czym następuje aktualizacja w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe. Na podstawie symulowanych uszkodzeń systemu AHRS, obszar zainteresowania stanowiła weryfikacja z jak dużą skutecznością proponowany obserwator będzie w stanie w warunkach mocno ograniczonej informacji sensorycznej zapewnić poprawność danych niezbędnych do bezpiecznego sterowania BSP. Do opracowania modelu wiernie oddającego dynamikę BSP wykorzystano zaprezentowany wcześniej w rozdziale 8 monografii [A7] model matematyczny dynamiki czterowirnikowego BSP w koaksjalnym układzie napędów uwzględniający zależności opisujące wpływ szeregu efektów aerodynamicznych na robota w trakcie jego lotu. Zależności te, odnoszące się bezpośrednio do opisu modułu orientacji robota przekształcono do ich odpowiedników w notacji kwaternionowej, włączając model dynamiki BSP wraz z filtrem SRUCKF w opracowaną architekturę układu sterowania, co stanowi wkład habilitanta. Dzięki takiej strukturze układu sterowania oraz wyznaczeniu precyzyjnych parametrów robota za pomocą algorytmu PSO powstał finalnie system skutecznie pracujący w obliczu ograniczonej informacji sensorycznej.

W pracy [A9], habilitant przedstawił wyniki uzyskane w drodze kompleksowych badań porównawczych w warunkach lotów stałopłatowego BSP dla różnych typów liniowych i nieliniowych regulatorów, by usystematyzować wiedzę w zakresie ich efektywności pracy w problemie śledzenia referencyjnych zmian kątów i wysokości lotu BSP oraz dalszej optymalizacji nastaw tych regulatorów w kolejnych pracach. Regulatory typu PD, PID oraz LQR i jego zmodyfikowaną wersję z dyskretnym filtrem Kalmana, a także regulator oparty na metodzie *backstepping*, poddano ocenie jakości śledzenia referencyjnych wartości kątów przechylenia, odchylenia, jak i wysokości BSP, korzystając z zaproponowanej miary oceny dla sygnałów uchybu i sterującego.

Wartość dodaną w przypadku pracy [A9] stanowi analiza porównawcza, w której pięć znanych, powszechnie używanych typów regulatorów zostało zestawionych w kontekście generowanego wydatku energetycznego (wyrażonego sygnałem sterującym) oraz jakości śledzenia (wyrażonej uchybem), na podstawie danych pomiarowych z lotów BSP.

Praca [A9] jest o tyle istotna w przedłożonym cyklu, że habilitant poszukując rozwiązań w zakresie poprawy jakości sterowania w poszczególnych warstwach architektury wielowirnikowych BSP, analizował również prace z zakresu stałopłatowych BSP – szczególnie te, które dotyczyły skuteczności stałowartościowych regulatorów o małej liczbie nastaw. Okazało się, że takich prac syntezujących wyniki z lotów jest niewiele – głównie były to studenckie prace dyplomowe. Habilitant korzystając z uprzejmości zespołu w którym pracował wówczas dr Tadeo Espinoza uzyskał dostęp do w pełni rekonfigurowalnego stałopłatowego BSP dla którego przeprowadzono eksperyment identyfikacji wyznaczając parametry modelu. W oparciu o wcześniejsze wyniki eksperymentów symulacyjnych nakreślony przez habilitanta plan badawczy włączono w prace prowadzone w ramach grantu (*TecNM, SEMARNAT-CONACYT nr 263080*), zapewniając niezbędne środki, w tym na publikację artykułu [A9] w otwartym dostępie. Uzyskane wyniki badań z lotów eksperymentalnych utwierdziły habilitanta w przekonaniu, by przyjrzeć się bliżej problemowi poprawy jakości śledzenia i stabilizacji wysokości lotu BSP w oparciu o powszechnie stosowane typy regulatorów, których poprawa jakości pracy oraz zmniejszenie wydatku energetycznego, może nastąpić w oparciu o odpowiednie techniki optymalnego dostrajania regulatorów – prezentowane w pracach [A10]-[A13].

Poprawa jakości lotu wertykalnego oraz stabilizacji zawisu bezzałogowego statku powietrznego

Publikacje [A7] (Podrozdział 11.1) oraz [A10]-[A13] traktują o problemach obserwowanych w locie autonomicznym BSP z zadawaną wysokością referencyjną. Habilitant przyjął za cel naukowy dostarczyć wiedzy i rozwiązań, by móc odpowiedzieć na pytanie: jak skutecznie kształtować przebiegi przejściowe w wertykalnym locie BSP oraz stabilizować go w zadanej koordynacie wysokości, korzystając z powszechnie stosowanych regulatorów, ich modyfikacji oraz zaproponowanych metod optymalizacji nastaw – tak, aby zapewnić oczekiwaną dynamikę i precyzję, a docelowo – minimalizować wydatek energetyczny?

W pracy [A7] zaproponowano podejście z wykorzystaniem mechanizmów logiki rozmytej do budowy regulatora rozmytego (operującego na bazie 25 reguł) o dwóch wejściach (uchyby oraz pochodna uchybu wysokości) oraz jednym wyjściu, z którego sygnał sterujący jest poddawany następnie dodatkowej operacji całkowania. Skuteczność regulatora rozmytego zestawiono z regulatorem typu PD (powszechnie używanym typem regulatora wysokości w BSP) w zadaniu śledzenia referencyjnych zmian wysokości lotu modelu BSP (robota X-4 Flyer) wykorzystując za miarę oceny całkowity wskaźnik jakości J_1 opisujący jakość śledzenia w fazie początkowej (wznoszenia), definiowany jako

$$J_1(t) = \int_0^{t_h/3} (Z_{ref}(\tau) - Z_{out}(\tau))^2 d\tau, \quad (2)$$

gdzie: t_h – horyzont sterowania (symulacji), $Z_{ref}(t)$ – wysokość referencyjna w osi Z w chwili t , $Z_{out}(t)$ – mierzona wysokość BSP.

Habilitant po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych był jednocześnie zainteresowany zaproponowaniem użycia w tym kontekście możliwości regulatorów ułamkowego rzędu, adaptując mechanizmy optymalizacyjne. Dlatego też **zaproponował przeprowadzenie syntezy układu śledzenia referencyjnych zmian wysokości lotu dla modelu BSP oraz modelu regulatora w strukturze FOPD (ang. *Fractional-Order Proportional-Derivative*), którego parametry wyznacza się, stosując optymalizację metodą cząstek roju w nakreślonym problemie:**

$$\begin{aligned} \min_{K_p, K_D, \mu} J_1(t) &= \int_0^{t_h} (Z_{\text{ref}}(\tau) - Z_{\text{out}}(\tau))^2 d\tau \\ \text{p.o.} \quad & 0 \leq K_p \leq K_p^{\text{max}} \\ & 0 \leq K_D \leq K_D^{\text{max}} \\ & 0 \leq \mu \leq \mu^{\text{max}} \end{aligned} \quad (3)$$

Po licznych lotach testowych (w ramach badań wstępnych) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych Crazyflie 2.0 oraz AR.Drone 2.0, a także analizie licznych eksperymentów symulacyjnych dla modelu robota X-4 Flyer z różnymi typami stałowartościowych regulatorów, tj. m.in. CDM, PID, PD, PI, FOPI, FOPD, FOPID, habilitant skłonił się w kierunku rozumowania, w którym powszechnie stosowane w BSP regulatory stałowartościowe o małej liczbie parametrów stanowią „rozsądną bazę” do zwiększenia ich efektywności pracy poprzez opracowanie mechanizmów optymalnego samostrojenia dla zaproponowanych funkcji celu. Tematyce tej poświęcono uwagę w pracach [A10]-[A13].

Za główne osiągnięcie habilitanta w pracy [A10] w powyżej scharakteryzowanym obszarze poprawy jakości autonomicznego śledzenia referencyjnych zmian wysokości BSP, zaliczyć można zaproponowanie oryginalnego, autorskiego podejścia do samostrojenia parametrów regulatora wysokości (w strukturze PID z równań (4)-(5)) w oparciu o wsadowy algorytm mątwy (ang. *Cuttlefish Optimization Algorithm*), za pomocą którego jest rozwiązywany nakreślony problem optymalizacyjny.

Równanie na siłę ciągu (T) w funkcji uchybu (e) można zapisać:

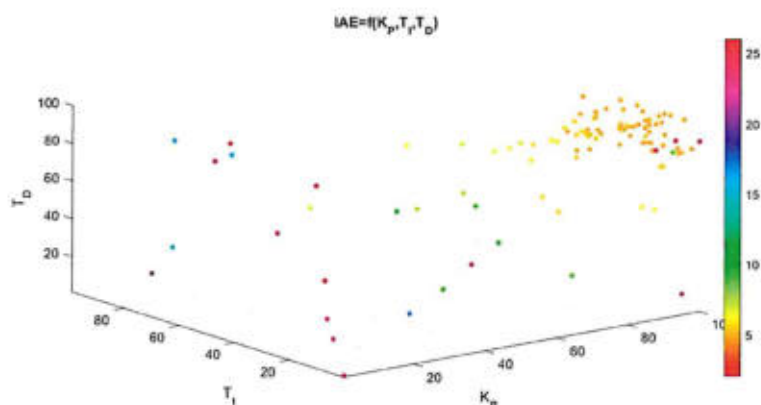
$$T = K_p e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t) + \omega_0, \quad (4)$$

gdzie prędkość obrotowa (niezbędna do wygenerowania siły ciągu równoważącej ciężar BSP) określa się zależnością:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mg}{4b}}, \quad (5)$$

K_p – wzmacnienie członu proporcjonalnego, T_I – stała zdwojenia, T_D – stała różniczkowania, m – masa czterowirnikowego BSP, g – przyspieszenie grawitacyjne, b – stała wznoszenia ($b > 0$).

Habilitant w badaniach był przede wszystkim zainteresowany przeprowadzeniem (dla 60 różnych konfiguracji algorytmu CFA) kompleksowych eksperymentów symulacyjnych w celu oceny relacji dokładności śledzenia sygnału referencyjnego wyrażonego całkowym wskaźnikiem jakości IAE (ang. *Integral of the Absolute Error*) do iloczynu rozmiaru populacji i liczby iteracji algorytmu. Takie **ukierunkowanie badań miało dostarczyć wiedzy, czy zaproponowane podejście może zostać użyte w kontekście samostrojenia regulatora wysokości w trakcie lotu BSP.**

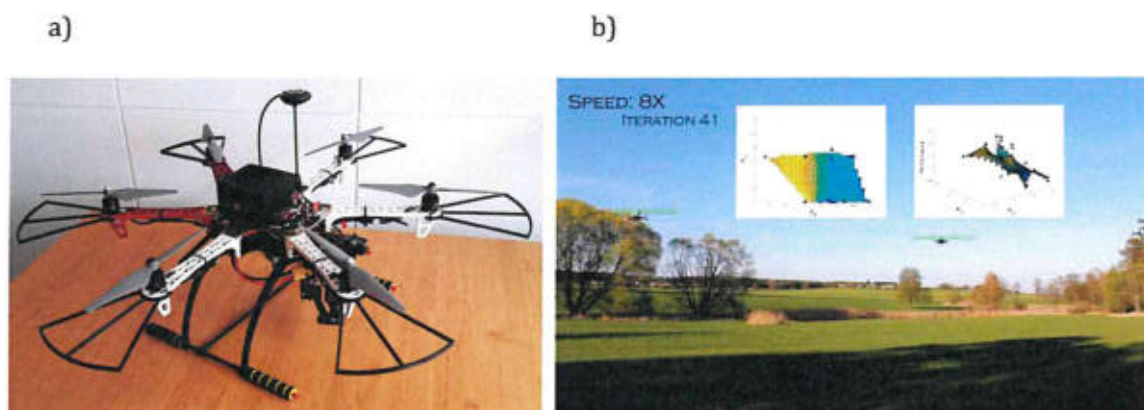


Rys. 7. Reprezentacja graficzna $IAE=f(K_p, T_i, T_d)$ dla wyników eksperymentu nr 38 (źródło: [A10])

Po analizie rezultatów badań z CFA (Rys. 7) habilitant zastanawiał się czy korzystając z powszechnie znanych mechanizmów uczenia iteracyjnego, w jednym locie BSP można byłoby w sposób efektywny, a najlepiej zbliżony do optymalnego lub optymalny dostroić samoczynnie nastawy regulatora po zdefiniowaniu nowych oczekiwań, skoro algorytm CFA uzyskuje zbieżność w obszar zbliżony do wartości optymalnej już po kilkudziesięciu zebranych wartościach funkcji celu. Być może inne, niekoniecznie wsadowe algorytmy (uznawane za wolne) byłyby w stanie poradzić sobie z tak nakreślonym problemem lepiej? W zamyśle, efektywny algorytm lub metoda samostrojenia pozwoliłyby stworzyć system przestrajalny, w którym różne zestawy nastaw regulatora wysokości BSP mogą służyć różnym misjom (lot z ładunkiem, precyzyjne, powolne kręcenie ujęć wideo, dynamiczne przeloty, lot z minimalizacją wydatku energetycznego, bezpieczny lot przy uszkodzeniu jednego z napędów, etc.). Koncepcja takiej metody wydała się habilitantowi niezwykle praktyczna i jednocześnie stanowiła wyzwanie badawcze, którego w tym czasie żaden z ośrodków naukowych jeszcze nie podjął. Obecnie po 3,5 roku nadal nie odnotowuje się w literaturze naukowej opublikowanych wyników badań w zakresie samostrojenia regulatorów wysokości w locie BSP (i bez użycia jego modelu) poza pracami habilitanta.

W pracy [A11] habilitant powrócił do deterministycznej metody optymalizacji bazującej na liczbach Fibonacciego z [A6] i użył jej w zaproponowanej metodzie jako środka do rozwiązania problemu automatycznego, iteracyjnego poszukiwania optymalnych nastaw stałowartościowego, dwuparametrowego regulatora wysokości w trakcie symulowanego lotu BSP, co stanowi główną wartość dodaną w rozwój dyscypliny. Pobodnie jak w klasycznych metodach sterowania z uczeniem iteracyjnym, w opracowanej metodzie, rejestruje się cyklicznie w trakcie lotu BSP wybraną wartość

funkcji celu (tutaj: całkowitego wskaźnika jakości ISE⁶) dla kolejnych powtarzanych trajektorii referencyjnych, tzw. prymitywów (tutaj: identycznych przemieszczeń pionowych BSP), by na podstawie tych wartości zmodyfikowany algorytm optymalizacji zerowego rzędu zwracał w kolejnych iteracjach (prymitywach) nową nastawę regulatora w poszukiwaniu tej najlepszej. Chcąc użyć rozwiązania dla pary nastaw, algorytm redukcji przedziału bazujący na metodzie liczb Fibonacciego stosowany jest naprzemiennie, tworząc kolejne tzw. sznurowania. **Wyniki eksperymentów symulacyjnych z pracy [A11] potwierdziły przede wszystkim wysoki potencjał aplikacyjny metody w kontekście jej dalszego użycia w rzeczywistych bezzałogowych statkach powietrznych operujących w środowisku stochastycznym narażonym na szereg zakłóceń, w którym samostrojenie parametrów regulatora jest prowadzone wyłącznie na podstawie cyklicznych pomiarów wysokości.**



Rys. 8. Sześciowirnikowy BSP: a) rozwijany w Instytucie Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej, b) w locie podczas obozu badawczego w Kraju Południowoczeskim w kwietniu 2018 r. (zdjęcie z eksperymentu ze zrównoleżonym uczeniem maszynowym [B1])

W 2016 roku zawiązana została współpraca badawcza z zespołem dr Martina Saski z Politechniki Czeskiej w Pradze, który odniósł spektakularny sukces w prestiżowej, grantowej rywalizacji zespołów naukowych parających się tematyką rozwoju badań nad sterowaniem BSP, tj. w MBZIRC'17 (*The Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge 2017*). Na mocy zainicjowanej przez habilitanta umowy partnerskiej pomiędzy Instytutem Automatyki i Inżynierii Informatycznej Politechniki Poznańskiej, a grupą badawczą dr. Saski, przeprowadzono szereg prac badawczych nad rozwojem metody z [A11] z wykorzystaniem technik prototypowania dla sześciowirnikowego robota latającego z rysunku 8. Warto wzmiankować, że sama konstrukcja robota i jego oprogramowanie są aktualnie rozwijane na Politechnice Poznańskiej. Na kanwie tak doskonałej motywacji badawczej jaką stanowiły w tym czasie poszczególne, nakreślone zadania MBZIRC'17 w postaci precyzyjnego autolądowania BSP na poruszającym się pojeździe oraz autonomicznej lokalizacji i transportu metalowych krążków przez współpracującą grupę robotów latających, jak i kolejnych zbieranych doświadczeń w trakcie 1,5 rocznego projektu, powstała publikacja [A12], w której prezentowanym największym osiągnięciem i wartością dodaną w rozwój dyscypliny jest opracowana udoskonalona, nowa wersja metody raportowanej w pracy [A11], a także jej gruntowna weryfikacja w warunkach eksperymentów symulacyjnych oraz lotów BSP na zewnątrz pomieszczeń w oparciu o wyłącznie podstawową sensorykę pokładową.

⁶ ISE (ang. *Integral Square Error*) – całka w kwadracie wartości sygnału uchybu

Jest to pierwsza w świecie praca, w której w czasie rzeczywistym, bez użycia modelu dynamiki BSP (tym samym redukując nakład środków obliczeniowych), w warunkach rzeczywistej, autonomicznej misji robota, przeprowadzono samostrojenie dwuparametrowego stałowartościowego regulatora wysokości z wykorzystaniem mechanizmów optymalizacji jego nastaw oraz zaproponowanej filtracji dolnoprzepustowej zakłóceń środowiskowych. Zaproponowany algorytm optymalizacji dzięki mechanizmowi sznurowania (wyzwalającego kilkakrotnie algorytm redukcji przedziału oparty na metodzie liczb Fibonacciego) nie jest silnie narażony na „utknięcie” w lokalnym minimum.

Eksperymenty z lotami sześciowirnikowym BSP habilitant poprzedził przeprowadzeniem ponad kilkuset eksperymentów symulacyjnych, z czego 60 zamieszczonych w pracy [A12] dotyczy trzech unikalnych wersji metody dla różnorodnych jej konfiguracji i dla trzech różnych zadawanych profili dynamicznych sygnału referencyjnego. Eksperymenty przeprowadzone zostały na znanej i cenionej przez środowisko naukowe (szczególnie osób parających się robotyką) platformie programistycznej ROS (Robot Operating System), przyjmując za miarę oceny rozwiązań całkowity wskaźnik jakości IAE. Współprzewodzona przez habilitanta analiza statystyczna wyników pozwoliła wytypować najsukcesowniejszy wariant opracowanej metody dla którego przykładowe, reprezentatywne wyniki z weryfikacji w locie zostały zamieszczone w publikacji [A12], ukazując obszar do dalszych prac badawczych, których wyniki zostały opublikowane w pracy [A13], gdzie wartość dodaną stanowią przede wszystkim zaproponowane rozwiązania dla trzech nakreślonych przez habilitanta problemów badawczych – odpowiednio:

- a) zwiększenia efektywności metody samostrojenia nastaw regulatora wysokości BSP w czasie jego lotu poprzez użycie algorytmu złotego podziału w module optymalizacji,
- b) zapewnienia maksymalnego, możliwego bezpieczeństwa w trakcie procedury samostrojenia poszczególnych regulatorów BSP poprzez użycie nakreślonej przez habilitanta procedury strojenia,
- c) zaproponowania w procedurze uczenia maszynowego takiej funkcji celu, która pozwala kształtować stosunek: uzyskiwana dynamika śledzenia/wydatek energetyczny – szczególnie w warunkach analizowanego wpływu zmiennej masy całkowitej BSP oraz zakłóceniach środowiskowych typu podmuchy wiatru.

W pracy [A13], w nowej metodzie samostrojenia pojawia się koncepcja zmiany metody redukcji przedziału z użyciem liczb Fibonacciego na rozwiązanie wykorzystujące podział w złotym stosunku. Algorytm dzięki temu szybko eksploruje przestrzeń nastaw z uwagi na fakt, że do porównania wartości funkcji celu w każdym kroku obliczeniowym wykorzystuje jedynie wartość dla nastawy z kroku poprzedniego i bieżącego. Do oceny efektywności działania metody oraz porównania z metodą z pracy [A12] habilitant posłużył się komercyjnym, niskokosztowym BSP Bebop 2 z firmy Parrot, dla którego powstała architektura sterowania autonomicznego oraz modele w środowisku ROS. We wstępnych eksperymentach symulacyjnych przeprowadzono ponad 33 godzinną akwizycję danych, tj. wartości funkcji celu dla kolejnych par nastaw regulatora celem aproksymacji kształtu funkcji $J=f(k_P, k_D)$, co zostało następnie wykorzystane do zaprezentowania mechanizmów działania obu metod z publikacji [A12]-[A13]. W eksperymentach symulacyjnych, nie zanotowano przypadku utraty stabilności, natomiast chcąc zastosować me-

toż w warunkach lotów BSP w laboratorium – szczególnie pod kątem oceny jakości jej pracy w trzecim powyżej nakreślonym zadaniu, pomocnym było użycie procedury minimalizującej zagrożenia dla otoczenia w trakcie lotu autonomicznego. W badaniach tych metoda wykazała swoje uniwersalne walory, natomiast w kontekście pracy [A13] habilitant skupił uwagę na akcentowanym we wstępie Autoreferatu problemie wydatku energetycznego, który skorelowany jest z oczekiwaną dynamiką i precyzją lotu. Dlatego też do funkcji celu z równania (6):

$$J(t) = \int_0^{t_2} (\alpha |e(t)| + \beta |u(t)|) dt, \quad (6)$$

habilitant wprowadził informacje z dwóch najważniejszych sygnałów, tj. uchybu określającego odchyłkę sygnału wyjściowego od referencyjnego oraz informację z sygnału sterującego. Wprowadzając współczynniki wagowe α i β można wówczas karać za zbyt duży sygnał sterujący przekładający się na wyższy wydatek energetyczny w układzie zasilania, a w konsekwencji krótszy lot BSP. W pracy [A13] habilitant przeprowadził kompleksową analizę i ocenę porównawczą w tym zakresie w oparciu o dane z eksperymentów symulacyjnych i laboratoryjnych. Z analizy tej wynika jednoznacznie, że opracowana metoda pozwala w różnorodnych warunkach środowiskowych, skutecznie eksplorować przestrzeń nastaw regulatora i zwracać w najgorszym przypadku – nastawy najlepsze lokalnie.

Podsumowanie

Prace badawcze zaprezentowane w cyklu habilitant ukierunkował na opracowanie rozwiązań, które przyczyniają się do poprawy jakości i bezpieczeństwa lotów bezałogowych statków powietrznych. Habilitant koncentrował się na poszukiwaniu takich rozwiązań w każdej z warstw architektury sterowania BSP, by proponowane metody syntezy układów sterowania odznaczały się bezpieczeństwem pracy oraz zapewniały szybkie śledzenie sygnałów referencyjnych, przy zapewnieniu dużej szybkości działania, minimalizując wydatek energetyczny poprzez np. użycie technik optymalizacji oraz algorytmów inteligencji maszynowej – takich jak uczenie iteracyjne.

Przeważająca większość badań habilitanta wymagała udoskonalenia istniejących lub opracowania autorskich sposobów, procedur, algorytmów i metod w obszarze sterowania, estymacji oraz modelowania dynamiki lotu BSP. **W efekcie prac, habilitant wniósł wartość dodaną w rozwój dyscypliny:**

- a) w warstwach sterowania niskiego poziomu (z Rys. 2):
 - opracowując system fotowoltaiczny z algorytmem poszukiwania punktu mocy maksymalnej MPPT użytym w układzie sterowania przekształtnika w celu wydłużenia czasu lotu BSP [A1],
 - opracowując wyszczególnione w Autoreferacie – kolejne, skuteczne metody i procedury syntezy układów regulacji prędkości i siły ciągu jednostek napędowych BSP oraz metody i procedury strojenia zaproponowanych regulatorów (głównie rzędu ułamkowego) przy określonych warunkach i zakresach ich stosowalności [A2]-[A6],

- poprzez oryginalne, autorskie podejście do syntezy układu symultanicznej stabilizacji orientacji BSP w przestrzeni za pomocą proporcjonalno-kwadratowego kwaternionowego regulatora P^2 z wykorzystaniem heurystycznego algorytmu optymalizacji rojem cząstek [A7],
- opracowując architekturę układu sterowania z obserwatorem stanu (SRUCKF) oraz modelem matematycznym dynamiki BSP w zapisie kwaternionowym – celem poprawy stabilizacji kątowej w module orientacji BSP w warunkach ograniczonej informacji sensorycznej [A8],
- usystematyzowanie wiedzy w zakresie jakości śledzenia i generowanego wydatku energetycznego dla liniowych i nieliniowych regulatorów kątowych i wysokości stałopłatowego BSP, poprzez kompleksowe badania porównawcze w warunkach lotów [A9],

b) w warstwie sterowania wysokiego poziomu:

- opracowując architekturę sterowania autonomicznego BSP z regulatorem rozmytym PD (w pętli śledzenia zmian wysokości referencyjnej), regulatorami typu PID (w pętlach sterowania pozycyjnego w osiach X i Y) oraz regulatorem P^2 (do sterowania modulem orientacji) [A7],
- prowadząc syntezę układu śledzenia referencyjnych zmian wysokości lotu BSP z regulatorem ułamkowego rzędu strojonym metodą cząstek roju [A7],
- zaproponowanie oryginalnego, autorskiego podejścia do samostrojenia parametrów regulatora wysokości w oparciu o wsadowy algorytm mątwy [A11],
- opracowanie metody iteracyjnego poszukiwania optymalnych nastaw stałowartościowego regulatora wysokości w trakcie lotu symulowanego [A11] oraz rzeczywistego [A12] (z filtracją zakłóceń) – wyłącznie na podstawie cyklicznych pomiarów wysokości (bez użycia modelu dynamiki BSP),
- udoskonalenie metody samostrojenia nastaw regulatora wysokości BSP w trakcie jego lotu poprzez użycie algorytmu złotego podziału w miejsce algorytmu liczb Fibonacciego [A13] w celu maksymalizacji stosunku: uzyskiwana dynamika śledzenia/wydatek energetyczny,
- opracowanie procedury zwiększającej bezpieczeństwo samostrojenia poszczególnych regulatorów BSP w wielowarstwowej strukturze sterowania [A13].

Omówiony cykl publikacji nie wyczerpuje tematyki badawczej osadzonej w nurcie poprawy jakości sterowania i bezpieczeństwa lotów BSP. Uzyskane, dotychczasowe wyniki badań pozwoliły habilitantowi ocenić zasadność i celowość kolejnej podejmowanej problematyki badawczej. Odpowiednio, w najbliższym czasie habilitant zamierza kontynuować badania nad samostrojeniem parametrów regulatorów BSP w trakcie ich lotów. Szczególnie interesujące są dwa obszary:

- zapewnienie odporności działania metod w sytuacjach błędów i awarii systemu sensorycznego,
- współdzielenia informacji sensorycznej z pary lub kilku jednostek BSP celem zwiększenia odporności metod na zakłócenia stochastyczne lub/i zwiększenia szybkości eksploracji przestrzeni nastaw regulatora.

Zaprezentowane dotychczas metody samostrojzenia mogą zostać także uogólnione dla innych regulatorów i obiektów regulacji. Habilitant jest szczególnie zainteresowany rozwijaniem współpracy w tym obszarze badawczym z Uniwersytetem w Szanghaju (zespół prof. Jinjuna Rao, bezzałogowe pojazdy nawodne) oraz Politechniką w Madrycie (zespół prof. Pascuala Campoya, BSP i bezzałogowe statki podwodne).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. 4b habilitant zalicza publikacje związane z realizacją następujących prac badawczych:

a) samostrojzenie regulatorów bezzałogowych statków powietrznych w trakcie lotu z użyciem pary lub kilku BSP

[B1] W. Giernacki, D. Horla

Układ do iteracyjnego samostrojzenia parametrów regulatora wysokości bezzałogowego statku powietrznego w trakcie lotu

Zgłoszenie z dnia 2018-03-14 do Urzędu Patentowego PR o udzielenie patentu na wynalazek nr P.424886 [WIPO ST 10/C PL424886]

Zgłoszenie patentowe jest rezultatem przeprowadzonych prac badawczych w zakresie iteracyjnego samostrojzenia regulatorów wysokości BSP w trakcie lotu i z wykorzystaniem nie jednego BSP, a pary lub kilku identycznych jednostek. Z uwagi na charakter osiągnięcia (zgłoszenie patentowe), habilitant postanowił wyszczególnić je jako pozostałe osiągnięcie. W pracy [B1] środek uwagi skierowany został na sprzętowo-programowe aspekty, z których korzysta zaproponowana metoda samostrojzenia. Najistotniejszym osiągnięciem naukowym jest tutaj zaproponowanie architektury zbliżonej do rozwiązania master-slave, w którym dwie lub więcej jednostek BSP eksploruje przestrzeń nastaw regulatora wykorzystując zaproponowany algorytm redukcji przedziału, tj. BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), zaliczany do metod optymalizacji drugiego rzędu.

b) analiza wydajności jednostek napędowych BSP

[B2] P. Aszkowski, K. Błoszyk, A. Bondyra, P. Gąsior, W. Giernacki

UAV Propulsion Analysis System with Reconfigurable Controller Feature Measurement Automation Monitoring, 63(5), 2017, str. 171-173.

Praca przedstawia wybrane wyniki badań uzyskane w trakcie opracowywania układu pomiarowego dla jednostek napędowych stosowanych w wielowirnikowych BSP. Projekt stanowiska badawczego z rysunku 6 został przearanżowany pod kątem możliwości pracy z pojedynczymi jednostkami, jak i jednostkami koaksjalnymi, co pozwala prowadzić próby dynamiczne na wzór opisanych w [B3]. Jednocześnie użycie 6-osiowego czujnika siła/moment i zaproponowanej bezczujnikowej metody pomiaru prędkości obrotowej umożliwia prowadzenie badań porównawczych nad wydajnością jednostek napędowych przy zdalnej rekonfiguracji programowych regulatorów prędkości i siły ciągu śmigieł. Zaproponowane rozwiązania sprzętowe pozwalają w najbliższej przyszłości rozwinąć badania z prac [A2]-[A6].

[B3] A. Bondyra, S. Gardecki, P. Gąsior, **W. Giernacki**

Performance of coaxial propulsion in design of multi-rotor UAVs

In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques. ICA 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 440. Springer, 2016, str. 523-531.

DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_46

W pracy uwagę poświęcono strukturze układu napędowego ośmiowirnikowego BSP w tzw. układzie X8, a więc czterowirnikowego BSP z podwójnymi jednostkami napędowymi. Jest to powszechne rozwiązanie, w którym redukując rozmiary robota względem klasycznego ośmiowirnikowego odpowiednika uzyskuje się kompaktowe wymiary, a w stosunku do klasycznego czterowirnikowego BSP – zwiększenie siły ciągu (a tym samym nośności). W pracy podjęto problem wydajności takiego rozwiązania, analizując pojedyncze jednostki napędowe w układzie koaksjalnym. W oparciu o wyniki serii eksperymentów przeprowadzonych na tzw. hamowni (jak w [B2]) dla trzech wybranych struktur jednostek napędowych (różne rozmiary i moce), zademonstrowano analizy porównawcze w kontekście ich efektywności.

c) opracowanie metod, narzędzi i symulatorów do szybkiego prototypowania algorytmów modelowania, sterowania, estymacji i optymalizacji

[B4] J. P. Coelho, **W. Giernacki**, J. Boaventura Cunha, P. de Moura Oliveira

Experimental setup for turbocharger control

10th Portuguese Conference on Automatic Control (CONTROLO'12),
16-18.06.2012, Funchal, Portugalia, str. 280-285

[B5] **W. Giernacki**, M. Skwierczyński, W. Witwicki, P. Wroński, P. Kozierski

Crazyflie 2.0 Quadrotor as a Platform for Research and Education in Robotics and Control Engineering

2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR),

28-31.08.2017, Międzyzdroje, Polska, str. 37-42

DOI: 10.1109/MMAR.2017.8046794

Spośród licznych prac poświęconych zagadnieniu opracowania narzędzi badawczych, które zapewniają możliwie wysoki poziom adekwatności pomiędzy rzeczywistym układem sterowania, a jego modelem habilitant postanowił wyszczególnić dwa. W obu pracach przedstawiono rozwiązania dzięki którym można było skutecznie prototypować metody i algorytmy prezentowane w cyklu. Praca [B4] jest wynikiem współpracy nawiązanej w 2011 roku przez habilitanta z zespołem dr. Joao Paulo Coelho i okresu poprzedzającego dwumiesięczny staż w Polytechnic Institute of Bragança w Portugalii w roku 2012. Na potrzeby prowadzenia wspólnych prac badawczych wykorzystano technikę HIL (ang. hardware-in-the-loop), w wyniku której opracowano stanowisko badawcze z rzeczywistą turbosprężarką samochodową o zmiennej geometrii i silnikiem emulowanym przez komputer. Prezentowane stanowisko posłużyło w latach kolejnych m.in. do wstępnej weryfikacji skuteczności metody CDM zaproponowanej dla BSP.

Druga z wybranych prac przedstawia wyniki badań oraz narzędzia badawczo-dydaktyczne opracowane w projektach własnych oraz koordynowanych przez habilitanta, a związanych z wykorzystaniem otwartego oprogramowania dla miniaturowych rozmiarów BSP Crazyflie 2.0. Przedstawione w pracy narzędzia dostrzeżone zostały przez producentów tego robota oraz środowisko osób skupionych wokół jego rozwoju – szczególnie symulator 4FLY Simulator (umożliwiający m.in. prototypowanie układów sterowania autonomicznego) oraz rejestrator lotu Crazyflie Python Client. W pracy przedstawiono ponadto wybrane wyniki dla problemu autonomicznego śledzenia trajektorii referencyjnej z użyciem tzw. pozycjonera – wskaźnika, którego pozycja jest estymowana z wykorzystaniem technik wizyjnych.

d) inne projekty prowadzone w ramach współpracy różnych dyscyplin

[B6] D. Horla, R. Lewandowski, A. Schmidt, M. Kraft, **W. Giernacki**

Active Vibration Reduction System Optimal Control Using Linear Matrix Inequalities with no Directional Change in Controls

Asian Journal of Control, 15(6), 2013, str. 1571-1578

DOI: 10.1002/asjc.666

W pracy zaprezentowano wyniki badań prowadzonych w latach 2012-2013 we współpracy z zespołem badawczym prof. Romana Lewandowskiego z Instytutu Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej. Habilitant w nakreślonym problemie redukcji wibracji budynków (przemieszczeń ram ich konstrukcji), był ze współautorami zainteresowany opracowaniem skutecznych metod sterowania dla modeli budynków w oparciu dane historyczne z zapisu trzęsienia ziemi El Centro. W pracy [B6] zaprezentowano syntezę optymalnego regulatora wykorzystującego optymalizację wypukłą i liniowe nierówności macierzowe z zachowaniem kierunku wektora sterowań.

6. Podsumowanie

Dorobek habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych obejmuje **51** artykułów (w tym **10** samodzielnych), **1** monografię naukową, **1** skrypt akademicki oraz **2** współautorskie zgłoszenia patentowe. W czasopismach z listy *Journal Citation Report* zostało opublikowanych **9** artykułów. **13** prac opublikowano w czasopismach specjalistycznych z zakresu automatyki i robotyki nieposiadających współczynnika wpływu (*Impact Factor*), m.in. *Asian Journal of Control*, *JAMRIS (Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems)*, *Pomiary Automatyka Kontrola*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, *Studia z Automatyki i Informatyki*. Pozostałe publikacje zostały opublikowane w materiałach renomowanych konferencji międzynarodowych, tj.: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, *Asian Control Conference (ASCC)*, *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, *IEEE International Conference Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, *CONTROL*, *AUTOMATION*.

Baza **Web of Science** Core Collection (WoS) indeksuje **28** publikacji cytowanych **58** razy (w tym **33** bez autocytowań); **H-index** równy **5**. Ponadto baza zawiera **30** publikacji nieindeksowanych w bazie (w zakładce „*Cited Reference Search*”) cytowanych **37** razy (w tym **6** cytowań bez autocytowań). Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy Web of Science Core Collection jest **95 cytowań** (w tym **39** bez autocytowań).

Baza **Scopus** indeksuje **31** publikacji cytowanych **79** razy (w tym **42** bez autocytowań); **H-index** równy **6**. Dodatkowo **23** publikacje nieindeksowane w bazie Scopus (pobrane z pola *References* artykułów cytujących – *secondary documents*) jest cytowanych **27** razy (w tym **7** cytowań bez autocytowań). Sumarycznie wynikiem przeszukania bazy Scopus jest **106** cytowań (w tym **49** bez autocytowań).

Sumaryczna liczba punktów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla publikacji habilitanta wynosi **620** (na dn. 25.02.2019 r.). Sumaryczny Impact Factor dla wszystkich publikacji w czasopismach z listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **13,792**.

Szczegółowy wynik analizy bibliometrycznej sporządzonej przez Oddział Informacji Naukowej Biblioteki Politechniki Poznańskiej został zamieszczony w Załączniku nr 6.

Aktywność habilitanta w środowisku naukowym związana jest m.in. z aktywnym uczestnictwem w międzynarodowych konferencjach naukowych i pełnioną od 2015 roku funkcją Sekretarza Naukowego czasopisma *Studia z Automatyki i Informatyki (Studies in Automation and Information Technology, ISSN: 0867-3977)* wydawanego przez Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk. Habilitant jest członkiem grona eksperckiego ogólnopolskiego, branżowego czasopisma *Służby Utrzymania Ruchu* od stycznia 2016 r.

Habilitant jest zapraszany do przygotowywania recenzji artykułów do czasopism indeksowanych w bazie JCR, tj.: *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Sensors, Energies, Asian Journal of Control, Transactions of the Institute of Measurement and Control* oraz renomowanych czasopism spoza tej bazy, np.: *Electronics, IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems (JAMRIS), Mathematics, Archives of Electrical Engineering, Control and Intelligent Systems*. Cyklicznie recenzuje prace zgłaszane na najlepsze światowe konferencje naukowe takie jak *IEEE Conference on Decision and Control* czy *American Control Conference*.

Habilitant uczestniczył jako główny specjalista ds. podsystemu informatycznego w projekcie systemowym „Czas zawodowców” współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego. Projekt ten został wyróżniony przez Ministra Infrastruktury i Rozwoju tytułem „Najlepsza inwestycja w człowieka” w ramach konkursu „Dobre praktyki EFS 2014”. Habilitant był ponadto wykonawcą w projekcie badawczym na mocy umowy partnerskiej z Politechniką Czeską w Pradze w latach 2017-2018 (współfinansowanym ze środków grantowych partnerów). Kierował także pracami badawczymi w ramach projektów pt. „Poprawa jakości pomiarów i sterowania wielowirnikowym robotem latającym” oraz „Nowoczesne techniki pomiarowe i algorytmy sterowania w robotyce i automatyce” finansowanych z dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców (lata 2013-2015).

Poza działalnością naukową habilitant prowadzi aktywnie działalność popularyzatorską i dydaktyczną. W 2012 roku, uczestniczył w projekcie „Era Inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej” współfinansowanym z Europejskiego Funduszu Społecznego. Kilukrotnie, na zaproszenie oraz w ramach programu *STA Erasmus+* prowadził wykłady i warsztaty dla studentów i doktorantów w Czechach, Hiszpanii i Chinach. Od 2018 roku habilitant pełni funkcję Koordynatora Narodowego Europejskiego Tygodnia Robotyki. W latach 2011-2015 był członkiem grupy badawczej PART (*Polish Aerial Robotics Team*) w Instytucie Automatyki i Inżynierii Informatycznej, którą współzałożył. Od roku 2016 jest liderem własnej grupy badawczej UAV_RG (*Unmanned Aerial Vehicles Research Group*), gdzie koordynuje prace badawczo-rozwojowe oraz działania dydaktyczne i promocyjne w obszarze bezzałogowych statków powietrznych.

Habilitant wypromował dotychczas **15** magistrów, **36** inżynierów, **1** doktora (jako promotor pomocniczy). Od 2017 roku pełni funkcję promotora pomocniczego w otwartym przewodzie doktorskim mgra inż. Talara Sadalli nt. "*Application of selected optimization algorithms for anti-windup compensation and synthesis of fractional-order controllers*" na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Habilitant otrzymał 4 nagrody indywidualne przyznane przez Rektora Politechniki Poznańskiej za działalność naukową (2012) i organizacyjną (2016, 2017, 2018) oraz 1 specjalną nagrodę zespołową II stopnia za wybitne osiągnięcia dydaktyczne w 2017 r.

Wybrane, najważniejsze osiągnięcia i aktywności habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych wyszczególniono i scharakteryzowano w Załączniku nr 3 oraz zestawieniu na kolejnej stronie Autoreferatu.


/Wojciech Giernacki/

Zestawienie osiągnięć po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych:			Razem
Opublikowane prace naukowe			
Monografie		1	52
Czasopisma	z listy JCR	9	
	międzynarodowe	10	
	krajowe	3	
Materiały konferencji międzynarodowych		29	
Skrypty akademickie			1
Artykuły w czasopismach branżowych			1
Zgłoszenia patentowe			2
Kierowanie lub udział w projektach badawczych (wliczając statutowe)			9
Udział w konferencjach naukowych międzynarodowych			12
Uczestnictwo w programach europejskich, międzynarodowych i krajowych			7
Udział w komitetach programowych lub organizacyjnych konferencji międzynarodowych			9
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych			2
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism			1
Promotor/promotor pomocniczy (liczba osób)	prace inżynierskie	24 (36)	37 (53)
	prace magisterskie	11 (15)	
	przewody doktorskie	2 (2)	
Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych			3
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie			1
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych			1
Recenzowanie projektów			4
Recenzowanie artykułów dla czasopism	z listy JCR	10	18
	międzynarodowe	8	
Recenzowanie artykułów konferencji międzynarodowych			46
Zestawienie wskaźników bibliometrycznych			
Sumaryczny Impact Factor (IF) opublikowanych publikacji według listy JCR			13,792
Liczba cytowań publikacji według bazy WoS (bez autocytowań)			95 (39)
Indeks Hirscha według bazy WoS			5