

AUTOREFERAT

dr inż. Cezary Kownacki
c.kownacki@pb.edu.pl
Białystok, 2019

Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
Ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok



1. Imię i Nazwisko

Cezary Kownacki

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

- **magistra inżyniera**, 1998 r., specjalność robotyka, kierunek *automatyka i robotyka*, Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka,
- **licencjat**, 1999 r., specjalność zarządzanie i marketing, kierunek *zarządzanie i marketing*, Instytut Zarządzania i Marketingu, Politechnika Białostocka.
- **doktora nauk technicznych**, 2005 r., Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka – dyscyplina naukowa: *budowa i eksploatacja maszyn*; specjalność: *diagnostyka techniczna*.

Temat pracy: *Analiza falkowa sygnału efektu Barkhausena w diagnostyce elementów maszyn*, promotor: prof. dr hab. inż. Józef Błachnio (Politechnika Białostocka).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 07.12.1998 – 31.07.2005 – asystent na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej, Katedra Automatyki i Diagnostyki,
- od 01.08.2005 – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej, Katedra Automatyki i Robotyki,

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego 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. z 2018 r. poz. 1789)

Osiągnięcie naukowe, wnoszące znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej *budowa i eksploatacja maszyn*, zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. (art. 16 ust. 2), stanowi cykl publikacji jednotematycznych pt.:

Budowa, implementacja oraz badania systemów sterowania poprawiających właściwości eksploatacyjne bezzalogowych statków powietrznych

Cykl składa się z następujących sześciu publikacji i jednego patentu:

- A1. **Cezary Kownacki**, Leszek Ambroziak (2019), Adaptation Mechanism of asymmetrical potential field improving precision of position tracking in the case of nonholonomic UAVs, *Robotica*, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574719000286> (IF: 1,177, liczba cytowań WoS Core Collection: 0, punkty MNiSW: 25).

Mój wkład w przygotowaniu publikacji polegał na: opracowaniu mechanizmu rotacji pola wektorów prędkości, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu rotacji asymetrycznego pola potencjalnego, wykonaniu badań symulacyjnych, opracowaniu wyników badań symulacyjnych, napisaniu i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- A2. **Cezary Kownacki**, Leszek Ambroziak (2017), Local and Asymmetrical Potential Field Approach to Leader Tracking Problem in Rigid Formations of Fixed-Wing UAVs, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 41, s. 81-89, (IF: 2,228, liczba cytowań WoS Core Collection: 1, punkty MNiSW: 40).

Mój wkład w przygotowaniu publikacji polegał na: opracowaniu zależności funkcji asymetrycznego pola potencjalowego, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu asymetrycznego pola potencjalnego, wykonaniu badań symulacyjnych, opracowaniu wyników badań symulacyjnych, napisaniu i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- A3. **Cezary Kownacki** (2016), A concept of laser scanner designed to realize 3D obstacle avoidance for a fixed-wing UAV, *Robotica*, Vol. 34, No. 2, s. 243-257, (IF: 1,554, liczba cytowań WoS Core Collection: 3, punkty MNiSW: 20),

- A4. **Cezary Kownacki** (2013), Successful application of miniature laser rangefinders in obstacle avoidance method for fixed wing MAV, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 28, Nr 3, s. 292-298, (IF: 0,658, liczba cytowań WoS Core Collection: 5, punkty MNiSW: 15),

- A5. **Cezary Kownacki** (2015), Design of an adaptive Kalman filter to eliminate measurement faults of a laser rangefinder used in the UAV system, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 41, s. 81-89, (IF: 1,751, liczba cytowań WoS Core Collection: 4, punkty MNiSW: 40),

- A6. **Cezary Kownacki** (2011), Optimization approach to adapt Kalman filters for the real-time application of accelerometer and gyroscope signals' filtering, *Digital Signal Processing*, Vol. 21, Nr 1, s. 131-140, (IF: 1,435, liczba cytowań WoS Core Collection: 31, punkty MNiSW: 27),

- A7. **Cezary Kownacki** (2019), patent pt. *Miniaturowy skaner laserowy o stożkowej płaszczyźnie detekcji przeznaczony do systemów autonomicznego omijania przeszkód bezzałogowych obiektów latających*, nr PL231400 (B1), udzielony dnia 28-02-2019, Politechnika Białostocka, Białystok.

Tabela 1. Zestawienie wskaźników cyklu sześciu publikacji

Nr	Udział w przygotowaniu publikacji [%]	IF	Liczba cytowań (WoS Core Collection) bez autocytowań	Liczba punktów MNiSW
A1	65%	1,177	0	25
A2	65%	2,228	1	40
A3	100%	1,554	3	25
A4	100%	0,658	5	15
A5	100%	1,751	4	40
A6	100%	1,435	31	27
	Suma	8,803	44	172

5. Charakterystyka osiągnięcia naukowego

Nieustanny rozwój technologii spowodował, że w pierwszej dekadzie XXI wieku pojęcie *roboty mobilne* przestało być kojarzone wyłącznie z robotami kołowymi, ale objęło też w dużej mierze roboty latające, powszechnie określane mianem *dronów* (inaczej: bezzałogowe statki powietrzne w skrócie BSP (*Bezzałogowy Statek Powietrzny*)). Powszechność i popularność robotów latających, a zwłaszcza obiektów pionowego startu i lądowania o wielu wirnikach (śmigłowców wielowirnikowych) spowodowała, że są one ogólnie dostępne. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że większość tych obiektów latających jest konstrukcjami posiadającymi jedynie możliwość zdalnego sterowania, przeznaczonymi do rozrywki lub do amatorskiego filmowania i fotografowania otoczenia z perspektywy lotu ptaka. Zatem takie konstrukcje BSP nie są odpowiednio zaprojektowane oraz ani nie zaimplementowano w nich rozwiązań sterowania poprawiających właściwości eksploatacyjne oraz bezpieczeństwo lotu poprzez zdolność do wykonywania samodzielnego, nienadzorowanego lotu, formowania spójnych i stabilnych formacji oraz zdolność do lokalizacji i omijania przeszkód. Stąd zaliczanie ich do klasy robotów posiadających możliwość samodzielnego wykonywania zadań w rzeczywistych aplikacjach nie jest zasadne. Wykorzystywane w BSP pokładowe systemy pomiarowe i układy sterowania wraz z zdalną komunikacją zapewniają jedynie stabilizację ich orientacji i pozycji podczas nawigacji po zadanych punktach drogi, pozwalającą na posługiwanie się tymi obiektami, nawet przez niedoświadczone osoby. Oprócz układów

stabilizacji lotu, często implementuje się również systemy poprawiające osiągi Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP) takie jak [1, 2].

Zaliczenie bezzałogowych statków powietrznych do grupy robotów mobilnych wymaga prac badawczych nad zwiększeniem ich możliwości, efektywności i niezawodności, co jest celem naukowym jednotematycznego cyklu publikacji.

Możliwości BSP zależą w znacznym stopniu od ich umiejętności do samodzielnego poruszania się w nieznanym otoczeniu. Aby to uzyskać należy opracować rozwiązania, pozwalające na wykrywanie i omijanie przeszkód, które mogą być zastosowane do budowy BSP. Skonstruowanie odpowiednich systemów detekcji przeszkód i połączenie ich z odpowiednim schematem sterowania jest trudne ze względu na ograniczenia dotyczące dostępnej technologii, udźwigu czy zasobów energii elektrycznej.

Efektywność BSP mającą odzwierciedlenie w maksymalnym czasie lotu można podnieść poprzez implementację odpowiednich metod sterowania kierunkiem lotu. Znaczenie doboru metody sterowania jest szczególnie widoczne na przykładzie problemu śledzenia pozycji w sztywnej formacji przez BSP w układzie płatowca, które są obiektami nieholonomicznymi. W tym przypadku dobór metody sterowania może zminimalizować zużycie energii w trakcie lotu w formacji, o ile obiekty będą trzymały precyzyjnie swoje pozycje w trakcie lotu w szyku. Dla takich obiektów układy sterowania oparte na minimalizacji różnicy pomiędzy aktualnym a zadaniem kątem drogi są wrażliwe na zakłócenia, powoduje to wydłużenie długości ścieżki lotu, a co za tym idzie zwiększone zużycie ograniczonego zasobu energii elektrycznej.

Niezawodność BSP oraz ich systemów nawigacji i sterowania zależy od jakości sygnałów pomiarowych, takich jak przyspieszenia liniowe, prędkości kątowe czy odległość od wykrytej przeszkody. Sygnały te zakłócone szumem lub błędnymi wskazaniami czujników, takich jak akcelerometry, giroskopy czy dalmierze laserowe, mogą wpływać na poprawne działanie tych układów oraz eksploatację BSP. Konieczne jest zatem zastosowanie odpowiednich metod filtracji.

Jednotematyczny ciąg publikacji, których jestem autorem lub współautorem o największym udziale, stanowi znaczący wkład w obszar badań naukowych związanych z dyscypliną *budowa i eksploatacja maszyn*, poprzez zaproponowanie przeze mnie nowatorskich rozwiązań odnoszących się do przedstawionych wymienionych tez. W szczególności dotyczą one:

1. nowatorskich systemów detekcji i lokalizacji przeszkód w obszarze zurbanizowanym oraz ich implementacji w celu uzyskania przez BSP możliwości omijania przeszkód oraz lotu

w kanionach ulic, co prowadzi do zwiększenia bezpieczeństwa ich eksploatacji (prace [A3, A4] oraz [A7]),

2. opracowania autorskich metod precyzyjnego śledzenia pozycji w formacji nieholonomicznych BSP, które umożliwiają minimalizację długości ścieżki lotu, co w efekcie wpływa na wydajność energetyczną BSP i wydłużenie maksymalnego czasu lotu podczas eksploatacji (prace [A1] i [A2]),
3. implementacji filtrów Kalmana wraz z algorytmami optymalizacji i adaptacji ich parametrów w celu eliminacji szumów i nieprawidłowych wartości w sygnałach pomiarowych, mających znaczenie ze względu na niezawodność działania systemów omijania przeszkód z pkt. 1 i systemu nawigacji inercyjnej w czasie eksploatacji BSP (prace [A5] i [A6]).

Wyniki moich prac badawczych pozwalają stwierdzić, że cel przeprowadzonych badań został osiągnięty, gdyż budowa bezzałogowych statków powietrznych, posiadających możliwość omijania przeszkód, efektywnego wykorzystania energii w locie formacji oraz charakteryzujących się większą niezawodnością stała się możliwa do realizacji. BSP zbudowane z wykorzystaniem opracowanych rozwiązań i metod będą bezpieczniejsze w eksploatacji, efektywniejsze podczas lotu formacji oraz bardziej odporne na zakłócenie sygnałów nawigacyjnych.

1. Systemy detekcji i lokalizacji przeszkód oraz ich budowa i implementacja

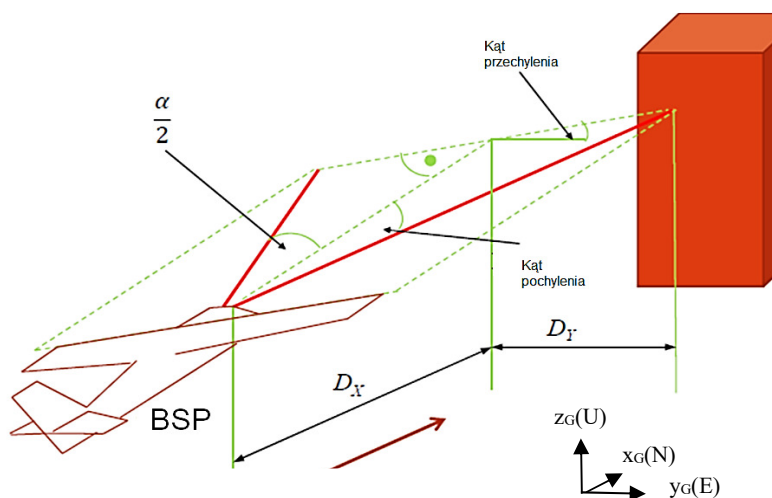
W pracach [A4] i [A3] zaprezentowano wyniki prac badawczych koncentrujących się na nowatorskich rozwiązaniach w zakresie budowy i implementacji systemów wykrywania i omijania przeszkód, tj. na:

- systemie pomiaru odległości od przeszkód wykorzystującym dwa dalmierze laserowe w celu realizacji detekcji i omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic (system autorski) – praca [A4],
- nowatorskim rozwiązaniu skanera laserowego przeznaczonego do implementacji detekcji oraz omijania przeszkód przez BSP w układzie płatownia (rozwiązanie autorskie) – praca [A3] i [A7].

System pomiaru odległości od przeszkód wykorzystujący dwa dalmierze laserowe w celu realizacji detekcji omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic

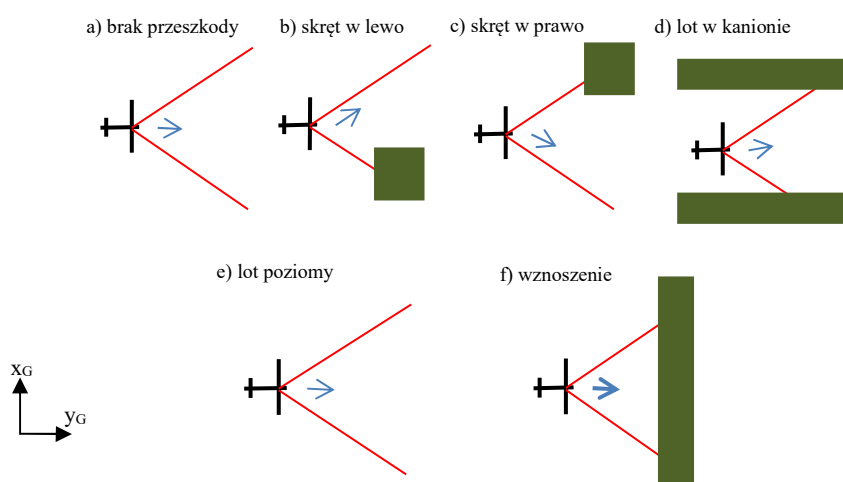
Pierwszy z systemów detekcji przeszkód, będący moim autorskim opracowaniem, bazuje na miniaturowych dalmierzach laserowych. Jest on dedykowany do budowy BSP potrafiących

omijać przeszkody, aby wykonywać lot w tzw. *kanionach ulic*. W terenie zurbanizowanym jest to typowy układ przeszkód. Ze względu na małe rozmiary i masę bezzałogowego statku powietrznego, jaki mógłby poruszać się w takim terenie, wybrano rozwiązanie, które jest możliwe do zrealizowania z wykorzystaniem urządzeń zapewniających niską masę, małe rozmiary i niski pobór energii. Te aspekty są szczególnie istotne dla małych bezzałogowych statków powietrznych zasilanych elektrycznie [5]. System detekcji przeszkód umożliwiający lot w kanionach ulic jest oparty na punktowym pomiarze odległości po obu stronach ścieżki lotu przez dwa miniaturowe dalmierze laserowe MLR100 o rozdzielczości rzędu 20 cm, które są zamontowane na przeciwległych skrzydłach BSP. Istota proponowanego rozwiązania jest zbliżona do rozwiązań opisanych w pracach [6, 7, 16]. W pracach tych do pomiaru odległości zastosowano technikę estymacji odległości przepływem optycznym. W proponowanym przeze mnie rozwiązaniu wykorzystanie dalmierzy laserowych oferuje bardziej wiarygodny pomiar odległości niż metoda przepływu optycznego. W pracach [6, 7, 16] zastosowano niezależne kanały sterowania w płaszczyźnie horyzontalnej i wertykalnej. Ponadto w pracy [6] wykorzystano duży bezzałogowy śmigłowiec, a w pracy [7], oprócz czujników przepływu optycznego zamontowanych po obu stronach samolotu, zastosowano dalmierz laserowy do wykrywania przeszkód znajdujących się na wprost przed BSP. Moje rozwiązanie jest natomiast oparte na tylko dwóch czujnikach, tj. na dalmierzach laserowych. Jest ono zaprojektowane do zastosowania na BSP w układzie płatowca. Proponowane rozwiązanie obejmuje również system sterowania, który przełącza się pomiędzy trybem omijania przeszkód a trybem nawigowania do nakazanego punktu drogi w sposób automatyczny na podstawie oceny wartości mierzonych odległości. Koncepcja rozwiązania systemu detekcji i omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic z wykorzystaniem dwóch dalmierzy laserowych jest przedstawiona na rys. 1, [8, A4].



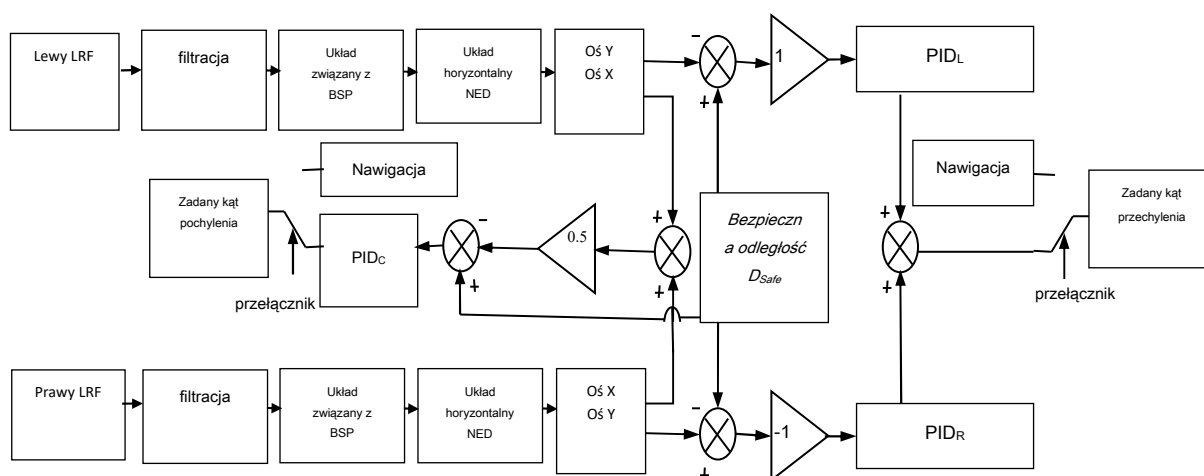
Rys. 1. Koncepcja omijania przeszkód lotu w kanionach ulic z wykorzystaniem dalmierzy laserowych [8, A4]

Wykorzystując zaawansowany układ autopilota (model MP2128^{Heli}) oraz dwa miniaturowe dalmierze MLR100 zbudowano platformę testową BSP, na której implementowano opracowane rozwiązanie. W pracy [A4] przedstawiono badania eksperymentalne z jej wykorzystaniem. Badania podzielono na etapy, które jednoznacznie krok po kroku weryfikowały implementację proponowanego rozwiązania. Scenariusze omijania przeszkód, uwzględnione w rozwiązaniu, są przedstawione na rysunku 2. Rysunki 2.a ÷ 2.d przedstawiają schematy sterowania kątem przechylenia, który generuje manewr skrętu z określonym promieniem. Natomiast rysunki 2.e ÷ 2.f odnoszą się do sterowania kątem pochylenia odpowiedzialnym za wznoszenie.



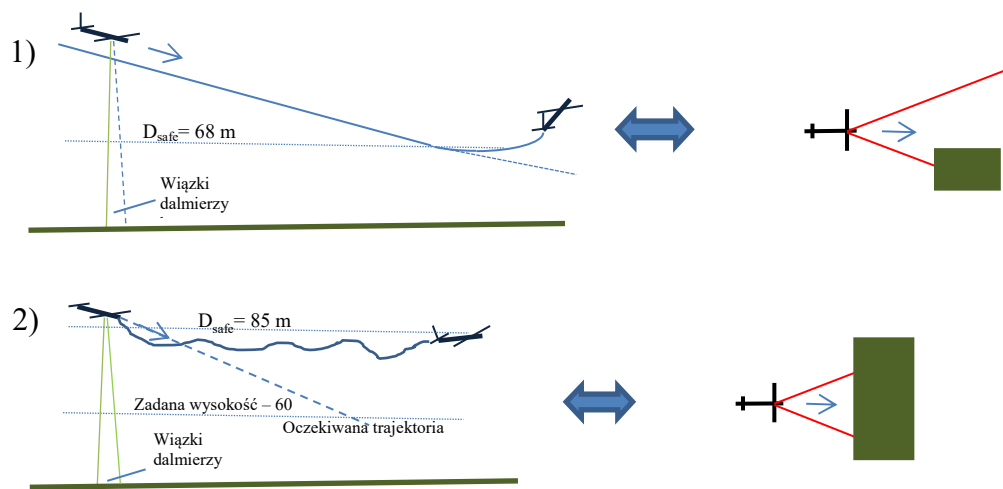
Rys. 2. Scenariusze omijania przeszkód uwzględnione w opracowanym rozwiązaniu sterowania kątem przechylenia a) ÷ d) oraz sterowaniem kątem pochylenia e) ÷ f), [A4]

Z kolei rysunek 3 przedstawia schemat działania zaimplementowanego rozwiązania odpowiedzialnego za sterowanie zadany kąt pochylenia i zadany kąt przechylenia.



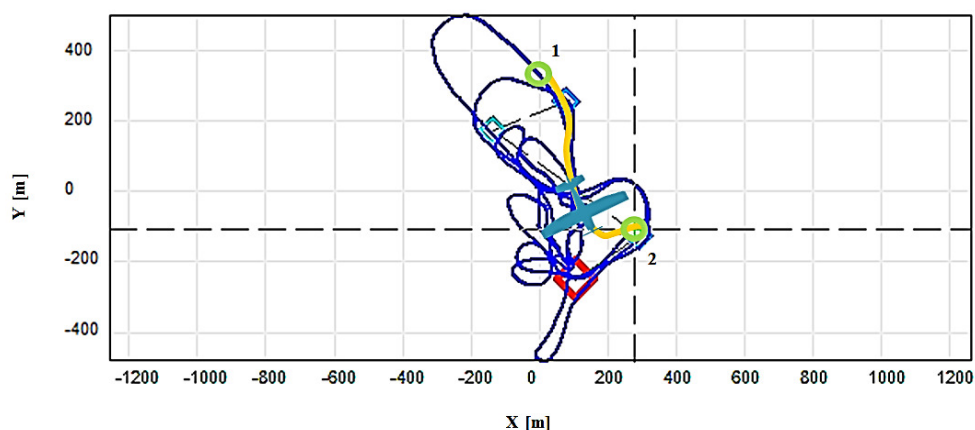
Rys. 3. Schemat działania implementacji rozwiązania w zakresie sterowania zadany kąt pochylenia i kątem przechylenia, [A4]

Opisany w pracy [A4] eksperyment, weryfikujący implementację opracowanego rozwiązania, zaplanowano tak, aby zminimalizować ryzyko przypadkowego rozbicia platformy testowej, którą jest dwusilnikowy model *TwinStar*. Istotnym ograniczeniem badań w zakresie proponowanego rozwiązania sterowania omijaniem przeszkód jest brak odpowiednich lokalizacji miejsc, w których znajdowałyby się przeszkody o odpowiedniej wysokości, a ewentualna kolizja nie spowodowałaby istotnych zniszczeń. Dlatego też postanowiono osie pomiarowe dalmierzy skierować w dół. Wówczas obniżając wysokość lotu można zasymulować wykrycie obecności przeszkody. Do weryfikacji każdego kanału sterowania przygotowano osobny lot testowy według procedury przedstawionej na rysunku 4.



Rys. 4. Scenariusze eksperymentu do weryfikacji rozwiązania w zakresie sterowania: kątem przechylenia (1) oraz kątem pochylenia (2), [A4]

W scenariuszach lotów testowych przedstawionych na rysunku 4 obniżana jest wysokość lotu, zaś nastawy regulatorów PID_L i PID_R (rys. 3) wykorzystanych w zaimplementowanym rozwiązaniu dobierano tak, aby w każdym locie testowym aktywny był inny kanał sterowania, tj. albo kątem przechylenia albo kątem pochylenia. Wynikiem pierwszego lotu testowego dla kanału sterowania kątem przechylenia było wygenerowanie manewru skrętu po obniżeniu wysokości lotu poniżej ustalonego progu 68 m. Zarejestrowany manewr skrętu jest zaznaczony na rysunku 5 jasnym odcinkiem pomiędzy punktami 1 i 2. Czerwony romb na rysunku 5 oznacza aktywny punkt drogi, który powinien być osiągnięty.



Rys. 5. Manewr skrętu generowany obniżeniem wysokości poniżej 68 m podczas lotu po linii prostej, oś y – kierunek północny, oś x – kierunek wschodni, [A4]

Wynikiem testu dla kanału sterowania kątem pochylenia były zaobserwowane skokowe zmiany zadanego kąta pochylenia. Powodowały one oscylacje wysokości jako efekt przełączania się pomiędzy procedurą omijania przeszkód a trybem nawigacji po zadanych punktach drogi. Automatyczne przełączanie się sterowania pomiędzy omijaniem przeszkód a nawigacją po zadanych punktach drogi jest istotną zaletą implementacji opracowanego rozwiązania, gdyż oznacza, że można ją wykorzystać do budowy małych BSP o masie do 2 kg i rozpiętości skrzydeł do 1,5 m., a nie tylko na potrzeby badań.

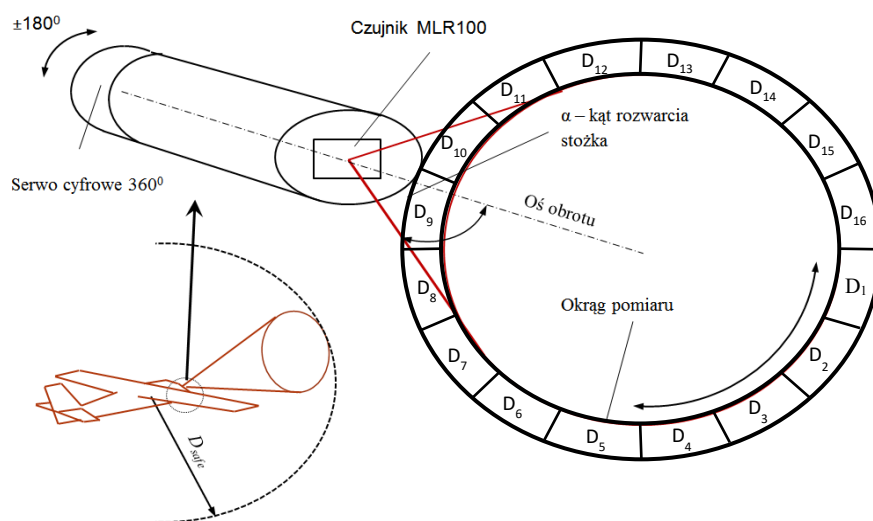
Otrzymane wyniki jasno wskazują, że zaproponowane przez ze mnie rozwiązanie wykorzystujące pomiar odległości w dwóch kierunkach zostało z powodzeniem zaimplementowane w dostępnym układzie autopilota, co więcej w przypadku wykrycia przeszkody w odległości mniejszej niż przyjęty próg bezpieczeństwa umożliwiają one niezależną kontrolę kąta pochylenia oraz kąta przechylenia. Natomiast w przypadku odczytania odległości oznaczającej brak przeszkody uwzględniony w rozwiązaniu system sterowania przełącza się w tryb nawigacji po zadanych punktach drogi. W przeciwieństwie do innych rozwiązań bazujących na systemach wizyjnych, układ dwóch dalmierzy może być użyty w dowolnych warunkach oświetleniowych. Szczegółowy opis opracowanego rozwiązania, badania symulacyjne oraz szczegóły implementacji i wszystkich lotów testowych, które nie zostały ujęte w pracy [A4], są opisane w monografii [8]. Do badań symulacyjnych wykorzystano model opisany w pracach [7] i [17].

Istotnym ograniczeniem proponowanego rozwiązania omijaniem przeszkód oraz lotu w tzw. *kanionach ulic* jest martwe pole widzenia znajdujące się pomiędzy osiami pomiarowymi dalmierzy laserowych. W związku z tym podjęto prace nad innym rozwiązaniem, bazującym na zdobytym doświadczeniu, ale pozbawionym tego ograniczenia. Tym rozwiązaniem jest opracowana również przeze mnie innowacyjna koncepcja skanera laserowego.

Rozwiązanie skanera laserowego przeznaczonego do implementacji detekcji oraz omijania przeszkód przez BSP w układzie płatowca

Motywacją do opracowania rozwiązania skanera laserowego (prace [A3] i [A7]) były doświadczenia związane z wykonywaną wcześniej pracą badawczą opisaną w pracy [A4], a także brak tego typu rozwiązań przeznaczonych do montażu na bezzałogowych statkach powietrznych w układzie płatowca. Większość rozwiązań skanerów laserowych jest stosowanych na BSP w układzie śmigłowca [23] i wykonuje zazwyczaj pomiar odległości w jednej płaskiej płaszczyźnie horyzontalnej [22] lub pionowej [21]. Stosuje się również mechanizm sterowanego zawieszenia kardana, aby uzyskać pomiar trójwymiarowy [24].

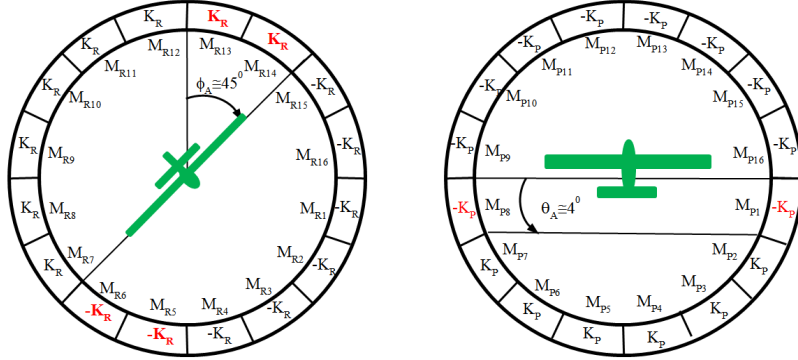
W proponowanym rozwiązaniu skanera laserowego, dedykowanym do BSP w układzie płatowca pomiar odległości wykonywany jest wokół ścieżki lotu. Obrót nachylonej osi pomiarowej głowicy dalmierza wokół osi równoległej do osi wzdłużnej korpusu BSP eliminuje problem martwego pola widzenia, gdyż oś ta zatacza okrąg wokół linii ścieżki lotu. Idea działania proponowanego rozwiązania skanera laserowego jest przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 6. Zasada działania i sposób skanowania otoczenia przez opracowaną koncepcję skanera laserowego, oraz sposób zapisu różnicy pomiędzy pomiarami a odległością D_{safe} do tablicy D , [8, A3]

Schemat działania proponowanej koncepcji skanera laserowego oraz sposób sterowania kątami przechylenia i pochylenia BSP przeznaczonego do realizacji omijania przeszkód jest następujący. W wyniku skanowania otoczenia wokół aktualnej ścieżki lotu tworzona jest tablica D (rys. 6). Jej elementy są różnicami pomiędzy zmierzonymi wartościami odległości a wartością bezpiecznej odległości od przeszkody D_{safe} . Tablica D posiada kształt koła, stąd jej elementy są jednoznacznie powiązane z konkretnym punktem położonym wokół ścieżki lotu w układzie współrzędnych NED (north east down). Aby skompensować wpływ kątów

orientacji przestrzennej BSP na powiązanie elementów tablicy D z tymi punktami, wprowadzono dwie maski w postaci tablic M_R i M_P o takiej samej liczbie elementów co tablica D . Obie maski są przedstawione na rysunku 7, [A3]. Obie maski podzielone na zmienne strefy z dodatnim i ujemnym znakiem wzmocnienia K_R lub K_P .



Rys. 7. Tablice masek M_R (po lewej) i M_P (po prawej) niezbędnych do wyeliminowania wpływu kątów orientacji przestrzennej i wyznaczenia zadanych kątów przechylenia i pochylenia, [8, A3]

W celu kompensacji kąta przechylenia elementy tablicy maski M_R są podzielone linią pionową na elementy z dodatnim i ujemną wartością współczynnika K_R , zaś w przypadku kompensacji kąta pochylenia elementy tablicy maski M_P są analogicznie podzielone linią poziomą. Wówczas elementy tablic masek ze znakiem ujemnym znajdują się odpowiednio po prawej w przypadku M_R i w dolnej stronie w przypadku M_P . Linia podziału elementów tablic obu masek zmienia położenie lub orientację w kierunku przeciwnym do zmiany odpowiadającego kąta orientacji. Oznacza to, że linia podziału obraca się w kierunku przeciwnym do przechylenia BSP dla M_R oraz przesuwają się w kierunku przeciwnym do pochylenia dla M_P (rys. 7). Zatem podział elementów w tablicach masek zależy od kątów ϕ_A i θ_A , tak aby ich powiązanie z punktami w przestrzeni w układzie NED było stałe. Jako sygnały uchybu w zaimplementowanych pętlach PID sterowania kątem przechylenia i pochylenia BSP są wykorzystane parametry W_P i W_R [A3]:

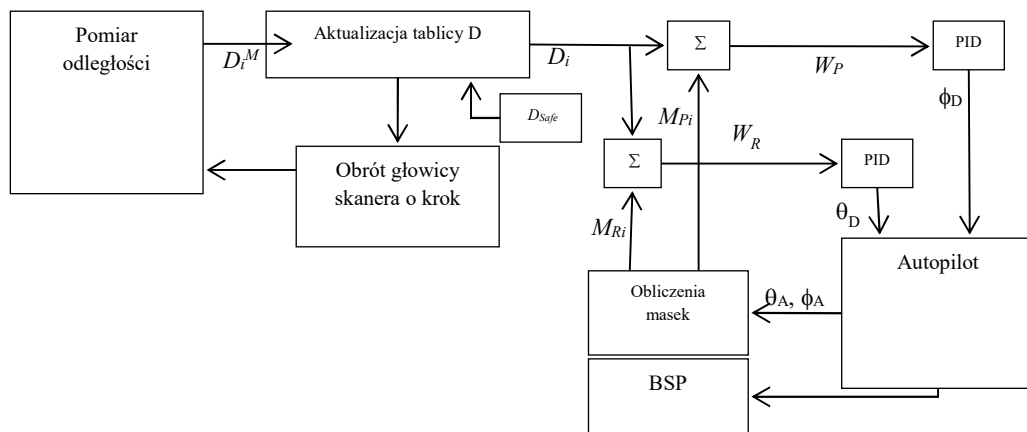
$$W_R = \sum_{i=1}^R D_i \cdot M_{Ri}(\phi_A) \quad (1)$$

$$W_P = \sum_{i=1}^R D_i \cdot M_{Pi}(\theta_A) \quad (2)$$

gdzie: W_R – wartość uchybu dla pętli regulacji PID zadany kąt przechylenia ϕ_D ograniczona do wartości odpowiadających zakresowi $\pm 30^\circ$, W_P – wartość uchybu dla pętli regulacji PID zadany kąt pochylenia θ_D ograniczona do wartości odpowiadających zakresowi $\pm 15^\circ$, N_S – rozdzielczość skanowania, D_i – i-ty element tablicy D , jego wartość wynosi zero lub jest różnicą pomiędzy wartością zmierzoną a D_{safe} , $M_{Pi}(\theta_A)$ – i-ty element

tablicy wzmocnień M_P po uwzględnieniu aktualnego kąta pochylenia θ_A , $M_{Ri}(\phi_A)$ – i-ty element tablicy wzmocnień M_R po uwzględnieniu aktualnego kąta przechylenia ϕ_A , D_{safe} – minimalna bezpieczna odległość od przeszkody.

Kompensacja orientacji przestrzennej BSP powoduje, że wartości W_P i W_R uchybów pętli regulacji PID kątem pochylenia i przechylenia, wyrażonych jako sumy wyników mnożenia Hadamarda tablicy D przez tablice M_R i M_P są niezależne od aktualnych kątów orientacji BSP. Wartości uchybów W_P i W_R są natomiast proporcjonalne do wartości kątów przechylenia i pochylenia niezbędnych do zrealizowania manewru wznoszenia i skrętu, omijającego obszary, dla których zmierzona odległość jest najmniejsza. Przyjęta struktura dedykowanego systemu sterowania, niezbędna do implementacji skanera na BSP jest przedstawiona na rysunku 8, [A3].

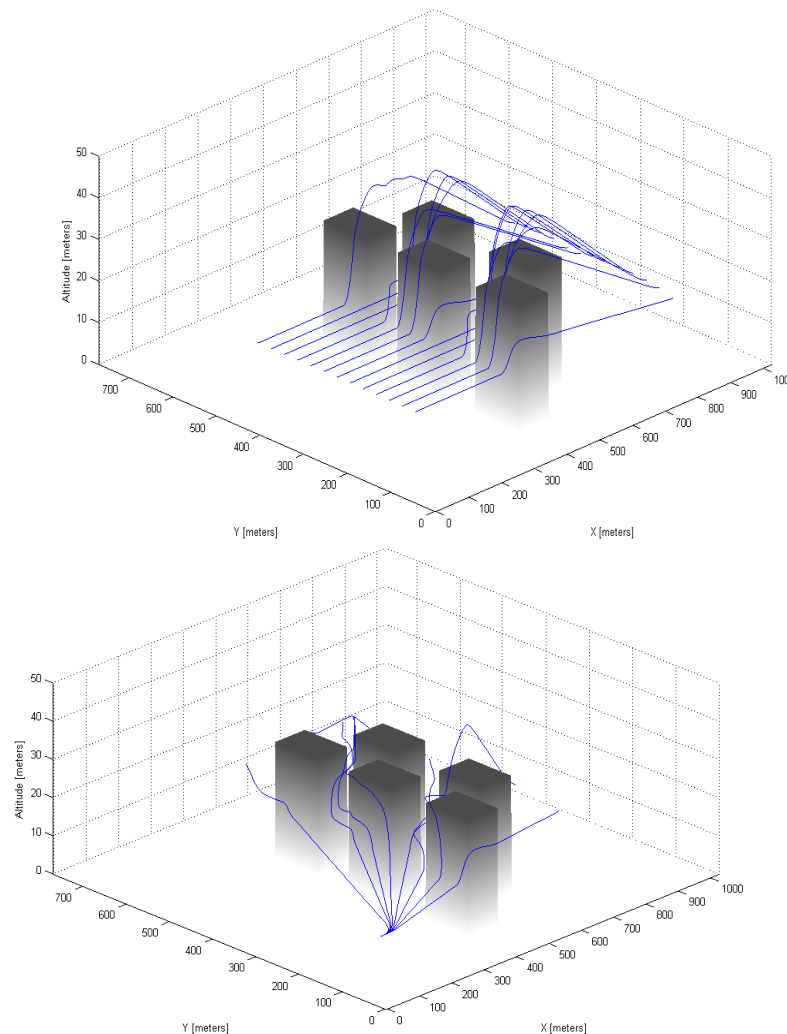


Rys. 8. Struktura sterowania lotem z wykorzystaniem opracowanej koncepcji skanera laserowego, [8, A3]

Zgodnie z rysunkiem 8, w przypadku koncepcji skanera laserowego, sterowanie kątami pochylenia i przechylenia odbywa się w sposób niezależny. Podnosi to manewrowość BSP. Do weryfikacji opracowanej koncepcji skanera laserowego i oceny jego skuteczności w bezpiecznym omijaniu przeszkód przeprowadzono badania symulacyjne w oparciu o model BSP opisany w pracach [7, 17]. Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały skuteczność omijania przeszkód i lotu pomiędzy nimi na podstawie skanowania otoczenia z rozdzielczością 16 pomiarów na 360^0 . Omijanie przeszkód jest skuteczne niezależnie od orientacji BSP względem przeszkody. Dlatego też nalot BSP na jej boczną krawędź jest również zakończony bezpiecznym manewrem skrętu (Rys. 9). Przedstawiono go przy pomocy trójwymiarowych wykresów trajektorii.

Na podstawie pozytywnych wyników badań symulacyjnych zbudowałem demonstrator (również autorski) opracowanego przeze mnie skanera laserowego w celu przeprowadzenia

stosownych badań eksperymentalnych. Samo unikatowe rozwiązanie skanera laserowego jest objęte ochroną patentową - patent nr PL231400 (B1) (pozycja [A7] w osiągnięciu naukowym).

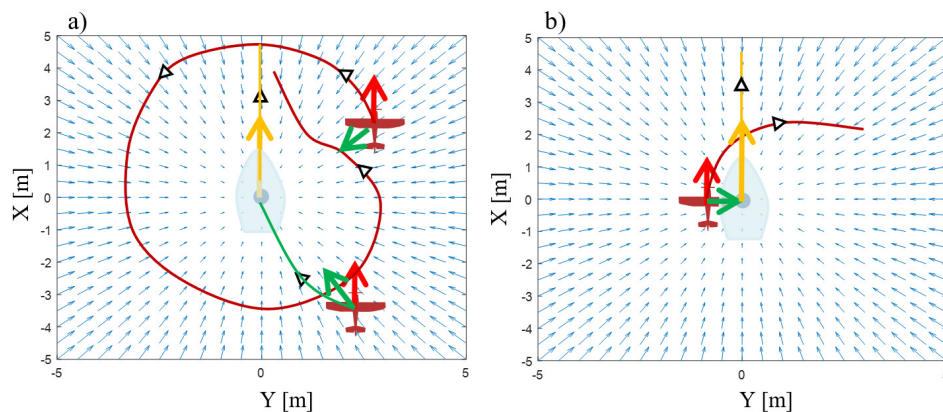


Rys. 9. Trajektorie lotu zarejestrowane podczas badań symulacyjnych opracowanej koncepcji skanera laserowego, [8, A3]

2. Metody precyzyjnego śledzenia pozycji w formacji nieholonomicznych bezzałogowych statków powietrznych (BSP)

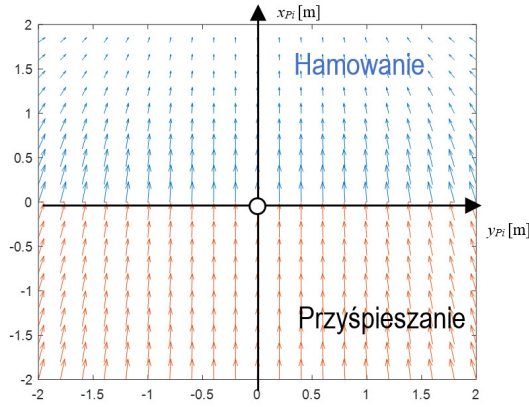
W kolejnych pracach z jednotematycznego cyklu tj. w pracach nr [A1] i [A2], skupiłem się na obszarze badań związanym z precyzyjnym śledzeniem pozycji przez nieholonomiczne bezzałogowe statki powietrzne podczas lotu w sztywnej formacji. Większość prac nad zastosowaniem sztucznych pól potencjałowych do lotów formacji wykorzystuje symetryczne pola potencjałowe [25, 26, 27], które w przypadku śledzenia pozycji w formacji przez obiekty nieholonomiczne mogą prowadzić do niestabilności [18]. Natomiast stabilność i precyzja w podążaniu za zadaną pozycją ma istotny wpływ na wydajność energetyczną nieholonomicznych BSP, gdyż przekłada się na długość ścieżki lotu i zużycie energii, które

w przypadku pojazdów elektrycznych jest ograniczone. Efektywność wykorzystania energii przez BSP z napędem elektrycznym wpływa na długość czasu lotu. Jest to istotny czynnik ich eksploatacji. Podjęto zatem prace nad rozwiązaniem, które poprawi osiągi nieholonomicznych BSP w przypadku aplikacji wymagających podążania za ustalonym punktem, np. w sztywnej formacji BSP. Rozwiązanie to polega na zastosowaniu asymetrycznego sztucznego pola potencjałowego do wyznaczania wektora prędkości w śledzeniu zadanej pozycji w sztywnej formacji BSP-nych w układzie płatownca. Zagadnienie to jest złożone i stanowi wyzwanie, gdyż BSP w układzie płatownca jest obiektem nieholonomicznym, którego manewrowość jest ograniczona przez minimalny promień skrętu. Ponadto, w większości budowanych rozwiązań BSP manewry skrętów są realizowane przez zmianę kąta przechylenia w funkcji błędu kąta drogi. Stąd, nawet niewielka zmiana pozycji BSP względem zadanej pozycji w formacji może skutkować gwałtownym wzrostem uchybu kąta drogi, a zatem i kąta przechylenia, który nie jest proporcjonalny do błędu śledzenia pozycji [18]. Rozwiązanie śledzenia pozycji w oparciu o różnicę pomiędzy aktualnym kątem drogi a kątem drogi wyznaczającym kierunek, w którym musi poruszać się BSP by zminimalizować błąd pozycji, prowadzi do niestabilności. Wykazano to w pracy [A2]. Brak stabilności podążania za pozycją wpływa na wydłużenie drogi jaką musi pokonać BSP. Problem śledzenia pozycji w przypadku nieholonomicznego obiektu, jakim jest BSP w układzie płatownca oraz różnica w długości ścieżki lotu jest przedstawiona na rysunku 10.



Rys. 10. Problem śledzenia pozycji przez obiekty nieholonomiczne: a) różne długości ścieżki lotu w zależności od wzajemnej orientacji pomiędzy BSP a śledzoną ruchomą pozycją (np. lądowiska na statku), b) niewielki błąd w kierunku poprzecznym powoduje skręt niezależnie od wielkości błędu śledzenia pozycji, wydłużający ścieżkę lotu, [A1, A2].

Rozwiązaniem problemu śledzenia pozycji przez obiekty nieholonomiczne jest metoda oparta o asymetryczne pole potencjałowe opisane w pracy [A2]. Pole to z kolei jest wykorzystane do wyznaczenia asymetrycznego pola wektorów prędkości realizujących stabilne śledzenie pozycji przez nieholonomiczny BSP (Rys. 11).



Rys.11. Asymetryczne pole wektorów prędkości V_t^s w przekroju horyzontalnym x_{Pi} - y_{Pi} , [A1, A2]

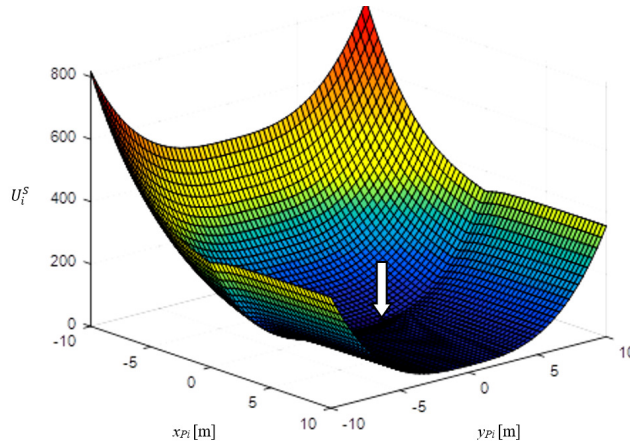
Jeśli asymetryczne pole wektorów prędkości V_t^s zostanie wyrażone w lokalnym układzie współrzędnych, oznaczonym jako $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$ i związanym ze śledzoną pozycją w sztywnej formacji, to wówczas płaszczyzna $y_{Pi} - z_{Pi}$ przechodząca przez tę pozycję i prostopadła do kierunku jej przemieszczania się, podzieli przestrzeń na obszary. W tych obszarach, których długości wektorów prędkości odpowiednio rosną lub maleją wraz ze wzrostem błędu pozycji wzdłuż osi x_{Pi} (Rys. 11). Jednocześnie wszystkie wektory prędkości V_t^s są zorientowane zgodnie z kierunkiem przemieszczania śledzonej pozycji i układu współrzędnych $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$. Związku z tym, wzrost błędu wzdłuż osi x_{Pi} spowoduje, że jeśli BSP znajdzie się za śledzoną pozycją, to prędkość lotu BSP wynikająca z długości wektora prędkości będzie się zwiększać, lub zmniejszać, jeśli BSP wyprzedzi śledzoną pozycję. W ten sposób wzdłuż osi x_{Pi} pole wektorowe z rysunku 11 reguluje wyłącznie prędkość lotu BSP. Natomiast wzdłuż osi y_{Pi} i osi z_{Pi} wraz ze wzrostem błędu pozycji BSP zmienia się orientacja wektorów prędkości względem osi x_{Pi} , tak aby wraz ze wzrostem błędu pozycji BSP jego wektor prędkości V_t^s był coraz bardziej skierowany w jej kierunku, tworząc z nią kąt ostry. Zatem zmiana kierunku lotu BSP zależy jedynie od wartości błędu śledzenia pozycji BSP wzdłuż osi y_{Pi} oraz osi z_{Pi} poprzez zmianę odpowiednio kąta przechylenia i kąta pochylenia BSP. Pole wektorów prędkości z rysunku 11 rozprzega zatem sterowanie pozycją BSP na niezależnie tory sterowania kierunkiem i sterowania prędkością. Takie podejście rozwiązania problemu (śledzenia pozycji) eliminuje możliwość pojawienia się gwałtownych zmian uchybu kąta drogi z rysunku 10.

Pole wektorów prędkości V_t^s jest zbudowane w oparciu o autorską zależność (3) opisującą funkcję sztucznego asymetrycznego pola potencjałowego w zależności od pozycji w układzie $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$.

$$U_i^S(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) = \begin{cases} V_L \cdot \arctan(\alpha \cdot x_{Pi}) + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot |y_{Pi}|^3 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot |z_{Pi}|^3 & \text{gd}y \ x_{Pi} \geq 0 \\ V_L \cdot |x_{Pi}| + \frac{1}{3} \cdot \beta \cdot |x_{Pi}|^3 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot |y_{Pi}|^3 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot |z_{Pi}|^3 & \text{gd}y \ x_{Pi} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: x_{Pi} , y_{Pi} , z_{Pi} – współrzędne BSP w układzie $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$, V_L – prędkość poruszania się śledzonej pozycji w formacji, α , β , γ – współczynniki zmieniające nachylenie powierzchni funkcji potencjałowej U_i^S mające wpływ odpowiednio w kierunku wzdłużnym w przód ($x_{Pi} > 0$) na prędkość hamowania, w kierunku wzdłużnym przeciwnym ($x_{Pi} < 0$) na prędkość przyspieszania, w kierunkach prostopadłych tj. poprzecznym i pionowym (osie y_{Pi} i z_{Pi}) na prędkość zmiany wartości kąta przechylenia i kąta pochylenia.

Wykres tej funkcji jest przedstawiony na rysunku 12 [A1, A2]. Strzałką oznaczone jest minimum tej funkcji znajdujące się w początku lokalnego układu współrzędnych $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$.



Rys.12. Asymetryczna funkcja sztucznego pola potencjałowego, [A1, A2]

Gradient ∇U_i^S funkcji potencjałowej (3) jest opisany zależnością [A1, A2]:

$$\nabla U_i^S(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) = \begin{cases} \left[\frac{V_L}{1+(\alpha \cdot x_{Pi})^2}, \gamma \cdot \text{sgn}(y_{Pi}) \cdot y_{Pi}^2, \gamma \cdot \text{sgn}(z_{Pi}) \cdot z_{Pi}^2 \right] & \text{gd}y \ x_{Pi} \geq 0 \\ [\text{sgn}(x_{Pi}) \cdot (V_L + \beta \cdot x_{Pi}^2), \gamma \cdot \text{sgn}(y_{Pi}) \cdot y_{Pi}^2, \gamma \cdot \text{sgn}(z_{Pi}) \cdot z_{Pi}^2] & \text{gd}y \ x_{Pi} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Na podstawie gradientów (4) można zbudować pole wektorów prędkości [A1, A2]:

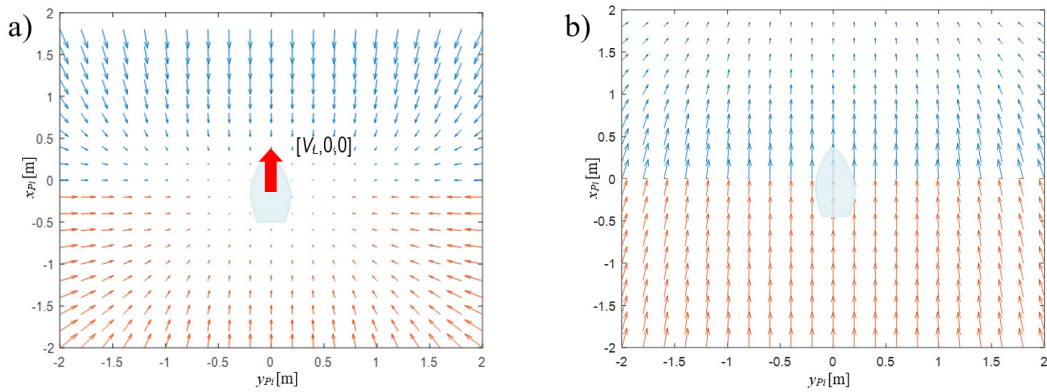
$$V_i^S(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) = \begin{bmatrix} |\nabla U_i^S(x_{Pi})| \\ -\nabla U_i^S(y_{Pi}) \\ -\nabla U_i^S(z_{Pi}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

gdzie: $\nabla U_i^S(x_{Pi})$ - współrzędna osi x_{Pi} , gradientu ∇U_i^S (4) funkcji potencjałowej U_i^S (3), $\nabla U_i^S(y_{Pi})$ - współrzędna osi y_{Pi} , gradientu ∇U_i^S funkcji potencjałowej U_i^S , $\nabla U_i^S(z_{Pi})$ - współrzędna osi z_{Pi} , gradientu ∇U_i^S funkcji potencjałowej U_i^S .

Jeśli założymy, że śladowa pozycja nie zmienia się tj., gdy $V_L=0$, pole wektorów prędkości przyjmie postać E_i [A2]:

$$E_i(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) = V_L - \begin{bmatrix} V_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla U_i^S(x_{Pi}) - V_L \\ -\nabla U_i^S(y_{Pi}) \\ -\nabla U_i^S(z_{Pi}) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

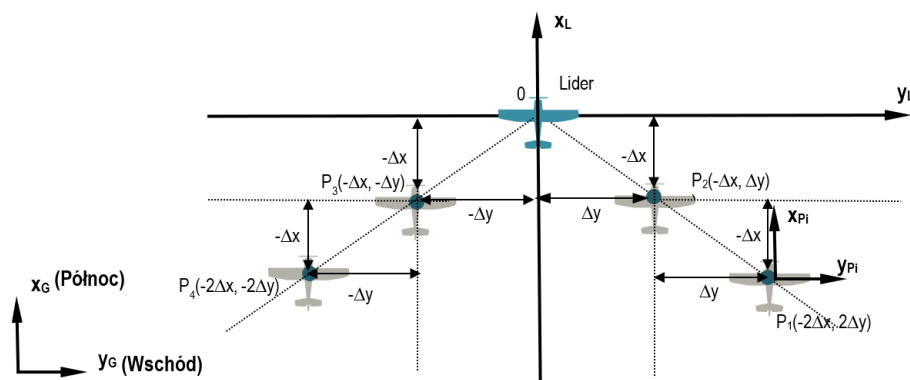
Różnica pomiędzy polem wektorów prędkości V_i^S oraz polem wektorów prędkości E_i z zależności (6) jest przedstawiona na rysunku 13.



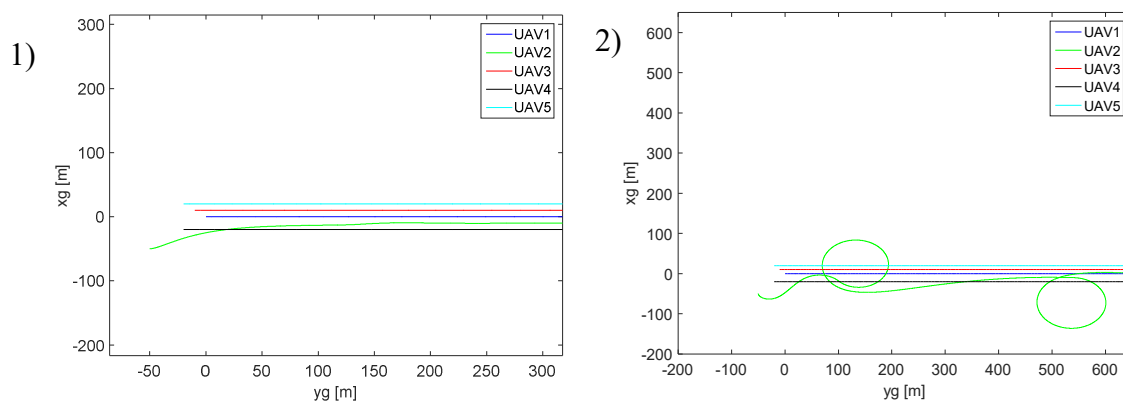
Rys.13. a) Przegląd horyzontalny x_{Pi} - y_{Pi} pola wektorów prędkości E_i , b) Przegląd horyzontalny x_{Pi} - y_{Pi} pola wektorów prędkości V_i^S , jako sumy E_i i $[V_L, 0, 0]$, [A1, A2]

Zgodnie z rysunkiem 13, dla obserwatora znajdującego się w środku układu współrzędnych $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$ i poruszającego się z prędkością V_L , pole wektorów prędkości V_i^S przyjmuje postać pola E_i , które jest symetryczne względem początku układu współrzędnych i początku układu obserwatora. Na podstawie zaobserwowanej właściwości funkcji $U_i^S(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi})$ oraz pola wektorów prędkości E_i , w którym współrzędne wektorów są zawsze ujemne (6), w pracy [A2] udowodniono, że funkcja potencjałowa $U_i^S(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi})$ spełnia lokalnie wymagane stawiane funkcji Lapunowa [19, 20]. Zgodnie z tym, rozwiązanie śledzeniem pozycji oparte na asymetrycznej lokalnej funkcji potencjałowej jest asymptotycznie stabilne.

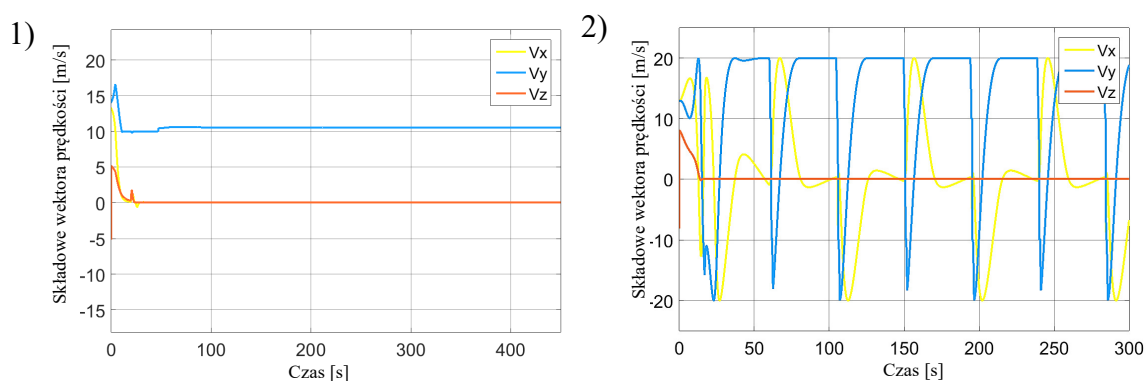
Aby potwierdzić powyższe przeprowadzono symulacyjne badania numeryczne, w których symulowano lot sztywnej formacji pięciu BSP-nych (UAV1-5) o kształcie odwróconej litery „V” (Rys. 14).



Rys. 14. Szttywna formacja 5 BSP o kształcie odwróconej litery „V”, $Ox_Ly_Lz_L$ – układ współrzędnych formacji, $Ox_Gy_Gz_G$ – globalny układ współrzędnych (np. NED). $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$ – układ współrzędnych asymetrycznej funkcji potencjałowej, [A2]

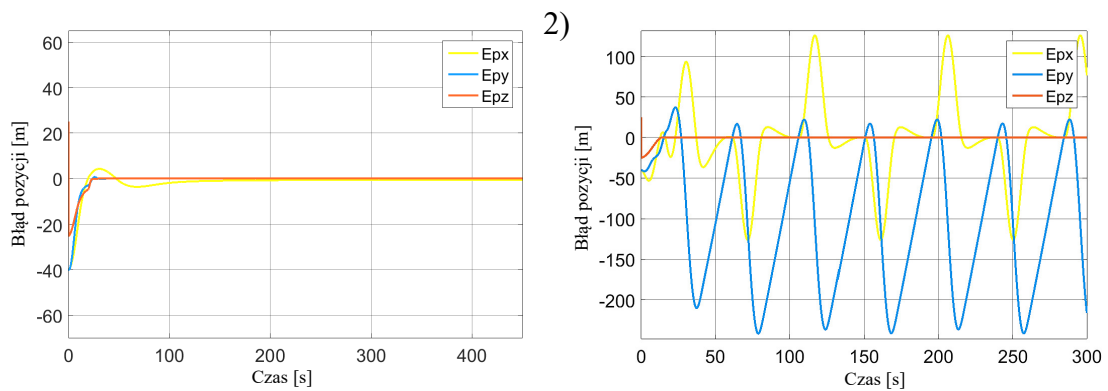


Rys. 15. Rzut horyzontalny trajektorii lotu sztywniej formacji 5 BSP po linii prostej: 1) z wykorzystaniem asymetrycznego pola potencjałowego, 2) z wykorzystaniem symetrycznego sferycznego pola potencjałowego, Trajektoria lidera formacji jest zaznaczona na niebiesko, [A2]



Rys. 16. Wykresy składowych wektora prędkości UAV2 w układzie globalnym $Ox_Gy_Gz_G$ odpowiednio dla metody z wykorzystaniem: 1) asymetrycznego i 2) symetrycznego pola potencjałowego, [A2]

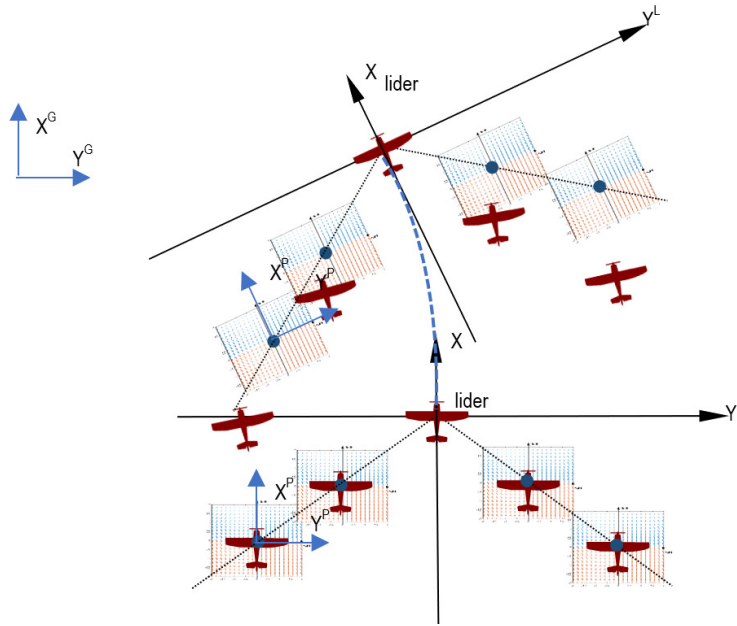
1)



Rys. 17. Wykresy składowych wektora błędów śledzenia pozycji w osiach układu $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$ odpowiednio dla metody z wykorzystaniem: 1) asymetrycznego i 2) symetrycznego pola potencjałowego, [A2]

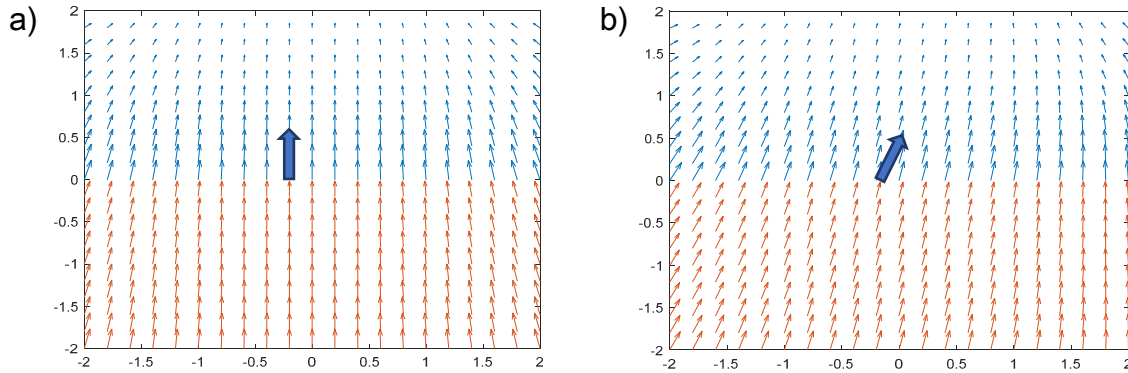
Na podstawie rysunków 15-17 można jednoznacznie stwierdzić, że w przypadku zastosowania symetrycznej funkcji potencjałowej również spełniającej warunki funkcji Lapunowa, punkt równowagi sterowania podążania za pozycją w formacji jest cyklicznie zaburzany przez gwałtowną zmianę uchybu kąta drogi spowodowaną nagłą niewielką zmianą wartości błędów śledzenia pozycji, w momencie są one bliskie zeru. Zatem, zastosowanie funkcji symetrycznej powoduje, że śledzenie pozycji w przypadku nieholonomicznego BSP jest niestabilne i podatne na zakłócenia zewnętrzne zwiększające błąd pozycji.

W pracy [A1], do metody asymetrycznego lokalnego pola potencjałowego wprowadziłem dodatkowy mechanizm obrotu całego pola wektorów prędkości V_i^s w zależności od prędkości zmiany kierunku lotu lidera wyrażonego przez kąt drogi. Zadaniem mechanizmu obrotu polem wektorów prędkości jest zminimalizowanie błędów śledzenia pozycji podczas wykonywania manewru skrętu przez formację. Zakładając, że formacja BSP-nych jest bryłą sztywną, a punktem referencyjnym dla ustalenia pozycji BSP w formacji są współrzędne lidera, to formacja podążając za liderem wykonywującym manewr skrętu obraca się wokół niego w kierunku przeciwnym niż kierunek lotu lidera. Jest to widoczne zwłaszcza w sytuacji, gdy zmiana kierunku lotu jest wykonywana z małym promieniem skrętu. Oznacza to, że w wyniku obrotu zadane pozycje BSP-nych podążających za liderem mogą przemieścić się w kierunku przeciwnym do kierunku lotu lidera (Rys. 18).



Rys. 18. Manewr skrętu wykonywany przez sztywną formację BSP, [A1]

Aby zniwelować wpływ rotacji formacji na wartość błędów śledzenia pozycji podczas wykonywania skrętów opracowano mechanizm rotacji pola wektorów prędkości. Nową metodę z wykorzystaniem tego mechanizmu nazwano *metodą adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego* [A1] (Rys. 19).



Rys. 19. Mechanizm rotacji pola wektorów prędkości w przekroju horyzontalnym, [A1]

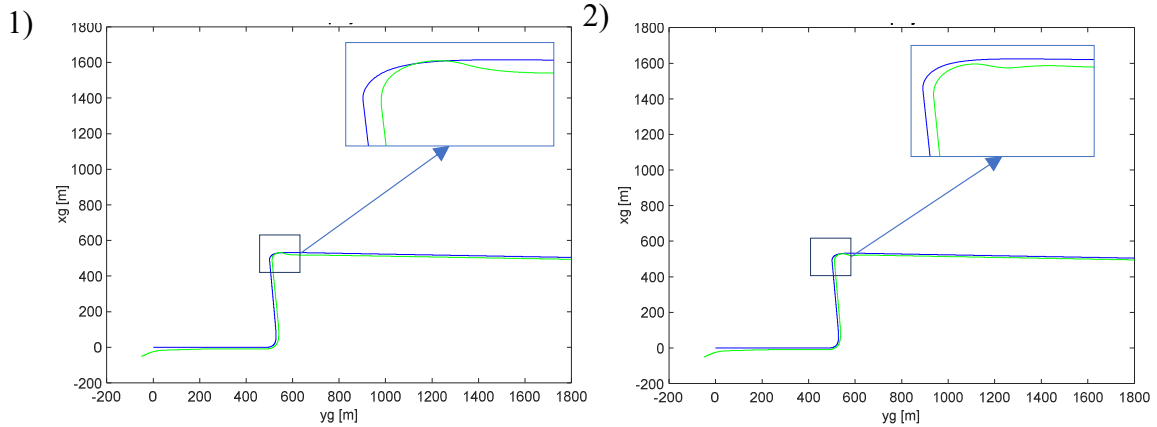
W tej metodzie zgodnie z zależnością (7) wszystkie wektory prędkości V_i^s w układzie $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$ obracają się w kierunku wykonywanego skrętu proporcjonalnie do prędkości zmiany kąta drogi lidera $\dot{\Psi}_L$, [A1]:

$$V_i^{AS}(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) = V_i^s(x_{Pi}, y_{Pi}, z_{Pi}) \cdot D(\dot{\Psi}_L) = \begin{bmatrix} |\nabla U_i^s(x_{Pi})| \\ -\nabla U_i^s(y_{Pi}) \\ -\nabla U_i^s(z_{Pi}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon \cdot \dot{\Psi}_L) & \sin(\varepsilon \cdot \dot{\Psi}_L) & 0 \\ -\sin(\varepsilon \cdot \dot{\Psi}_L) & \cos(\varepsilon \cdot \dot{\Psi}_L) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

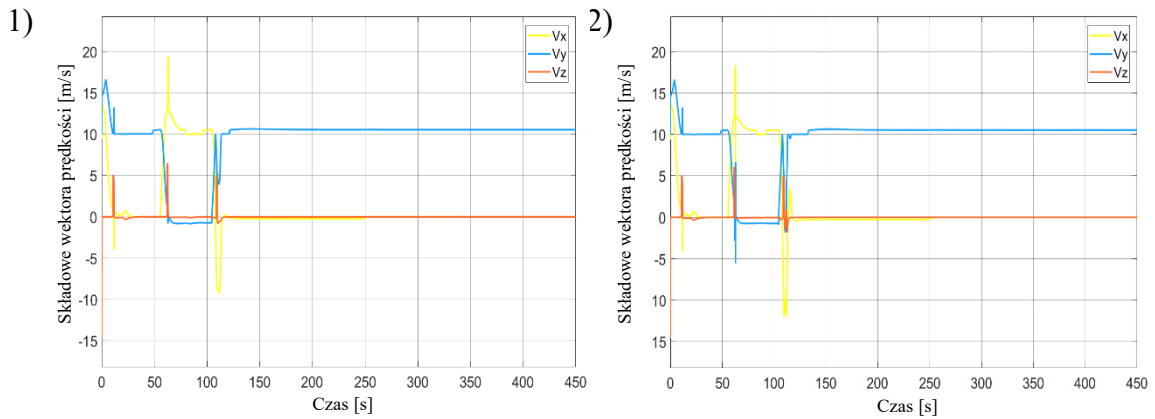
gdzie: V_i^{AS} – pole wektorów prędkości adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego, V_i^s – pole wektorów prędkości asymetrycznego pola potencjałowego opisanego szczegółowo

w pracy [A2], $\dot{\Psi}_L$ – prędkość zmiany kąta drogi lidera. ε – współczynnik wzmocnienia mający znaczenie stałej czasowej związanej z inercją w odpowiedzi formacji na manewr lidera.

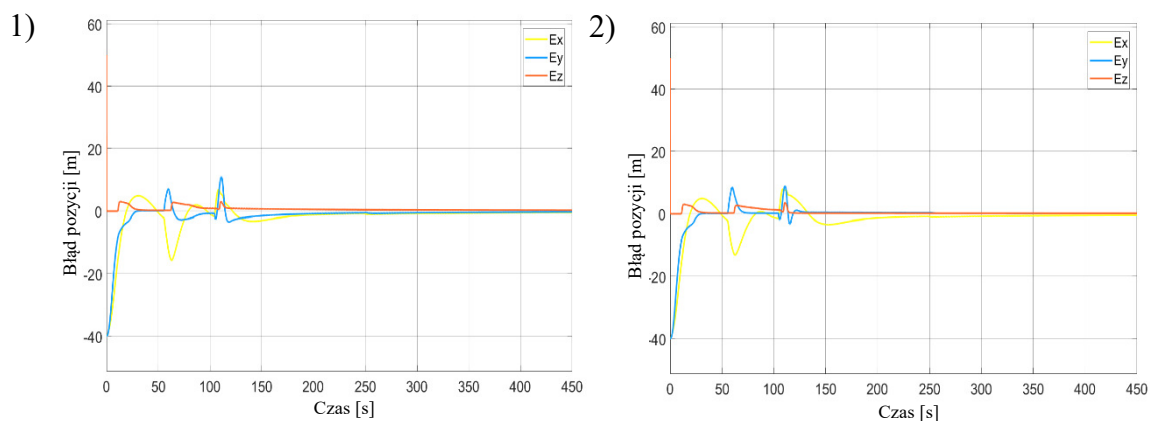
W celu zaobserwowania wpływu mechanizmu adaptacji asymetrycznego pola potencjałowego przeprowadzono porównawcze badania symulacyjne. Ich wyniki są przedstawione na rysunkach 20 - 23.



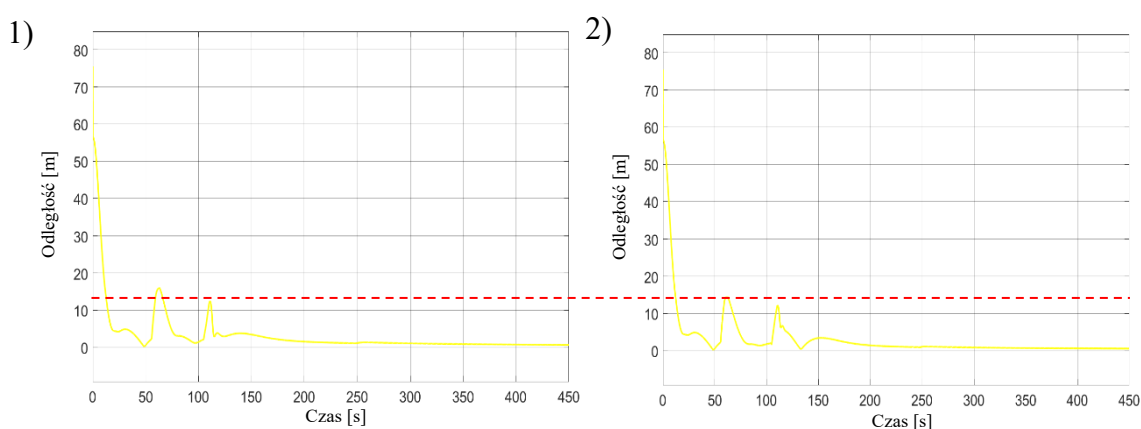
Rys. 20. Horyzontalne rzuty ścieżek śledzonej pozycji (kolorniebieski) oraz BSP (kolor zielony) odpowiednio dla metody: 1) asymetrycznego oraz 2) adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego, [A1]



Rys. 21. Wykresy składowych wektora prędkości V_i w układzie $O_{x_G y_G z_G}$, odpowiednio dla metody: 1) asymetrycznego oraz 2) adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego, [A1]



Rys. 22. Wykresy składowych wektora błędu śledzenia pozycji w układzie $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$, odpowiednio dla metody: 1) asymetrycznego oraz 2) adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego, [A1]



Rys. 23. Wykresy odległości pomiędzy BSP a jego śledzoną pozycją w układzie $Ox_{Pi}y_{Pi}z_{Pi}$, odpowiednio dla metody: 1) asymetrycznego oraz 2) adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego, [A1]

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 20-23 można zauważyć, że wprowadzenie mechanizmu rotacji wektorów prędkości wyznaczonych na podstawie asymetrycznego lokalnego pola potencjałowego pozwala zredukować o kilka metrów błąd śledzenia pozycji podczas wykonywania skrętu (czerwona linia odniesienia). W efekcie następuje redukcja długości ścieżki lotu jaką pokonuje BSP i wydłużenie dostępnego czasu lotu.

Obie metody sterowania śledzeniem pozycji w sztywnej formacji, tj. *metoda asymetrycznego lokalnego pola potencjałowego* oraz *metoda adaptacyjnego asymetrycznego pola potencjałowego*, nadają się doskonale do budowy rzeczywistych BSP w układzie płatowca posiadających możliwość lotu w sztywnej formacji. Stanowią one moje autorskie rozwiązanie problemu podążania przez nieholonomiczne roboty za ich zadaną pozycją w sztywnej formacji.

3. Implementacja filtrów Kalmana z algorytmami optymalizacji i adaptacji ich parametrów w celu eliminacji szumów i nieprawidłowych wartości w sygnałach pomiarowych BSP

W pracach [A5] i [A6] zaprezentowano wyniki koncertujących się na filtracji zakłóceń pomiarowych sygnałów nawigacyjnych BSP z wykorzystaniem:

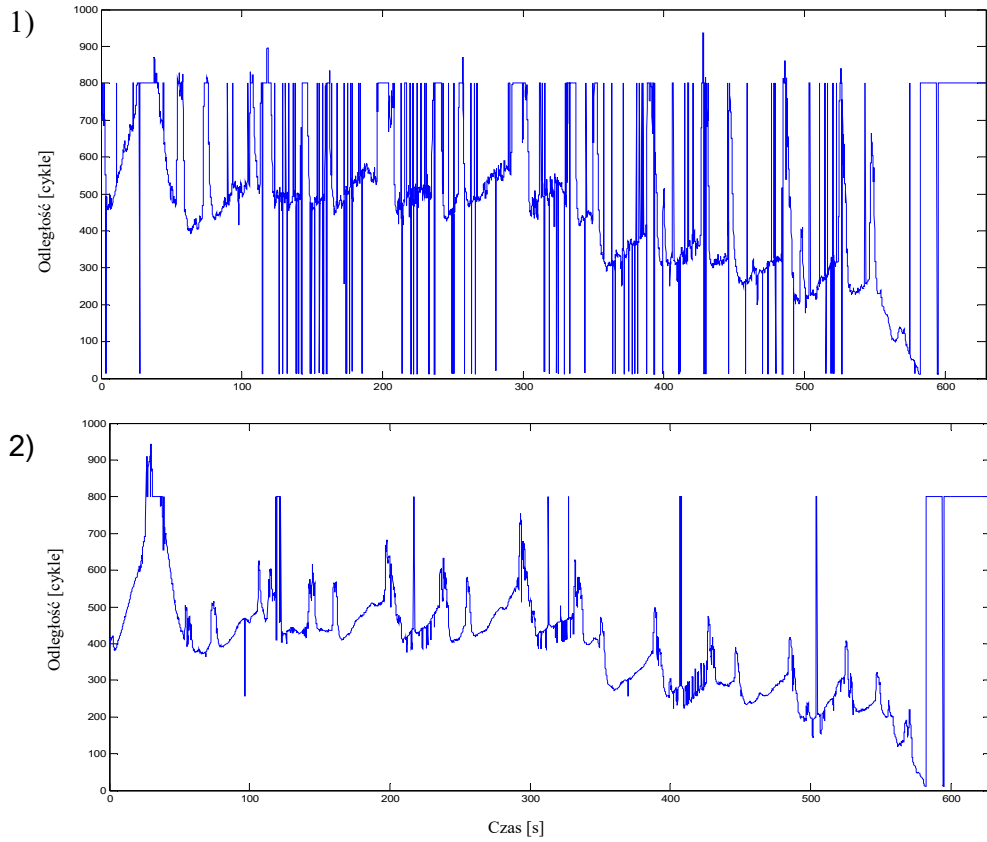
- adaptacyjnego filtru Kalmana do usuwania nieprawidłowych wskazań w sygnale odległości dalmierza laserowego (metoda autorska) – praca [A5],
- optymalizacyjnego podejścia do dostosowania parametrów filtru Kalmana do filtracji sygnałów akcelerometrów i giroskopów w czasie rzeczywistym (metoda autorska) – praca [A6].

Adaptacyjny filtr Kalmana do usuwania nieprawidłowych pomiarów w sygnale odległości dalmierza laserowego

W trakcie eksperymentalnych badań nad algorytmem autonomicznego lotu w kanionach ulic zaobserwowałem, że dane z jednego dalmierza (umieszczonego na lewym skrzydle) są zakłócone losowymi, chwilowymi wartościami odległości, które są znacznie większe niż wynosi faktyczny wynik pomiaru. Wartości te mogą być traktowane jako efekt nieprawidłowego pomiaru lub awarii czujnika. Zjawisko to zaobserwowano podczas badań nad wykorzystaniem dalmierzy laserowych do omijania przeszkód, których wyniki zostały opisane w pracy [A4], i powodowało, że nieprawidłowo wysokie wartości odległości były interpretowane przez algorytm detekcji i omijania przeszkód jako informacja o braku obecności przeszkód, co nie zgadzało się ze stanem faktycznym. Zatem nieprawidłowy pomiar odległości znacząco ograniczał niezawodność opracowanego rozwiązania omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic, uniemożliwiając jego zastosowanie do budowy BSP. Do eliminacji nieprawidłowych wartości odległości można wykorzystać adaptacyjny filtr Kalmana. Niestety znane z literatury adaptacyjne filtry Kalmana w przypadku okazały się nieskuteczne, gdyż do zmiany kowariancji szumów systemowego i pomiarowego jest wykorzystywana informacja o zakłóceniach z dłuższego przedziału czasowego [28, 29, 30]. Stąd uniemożliwia to filtrację pojedynczych wartości.

Wynikiem pomiaru dalmierz laserowego jest wartość odległości proporcjonalna do czasu pomiędzy wysłaniem a odebraniem impulsu laserowego. Na rysunku 24 są przedstawione pomiary odległości z obu dalmierzy laserowych wykorzystywanych podczas badań w pracy [A4]. Widać na nim wyraźne zakłócenia w pomiarze odległości dalmierza zamontowanego na

lewym skrzydle BSP, uniemożliwiające skuteczną detekcję przeszkód. Oba dalmierze rejestrowały wysokość lotu nad terenem.



Rys. 24. Pomiar wysokości lotu nad terenem z wykorzystaniem dwóch dalmierzy laserowych, zamontowanych na:
1) lewym i 2) prawym skrzydle, [A5]

Do wyeliminowania tych zakłóceń wykorzystałem autorski algorytm adaptacyjnego filtra Kalmana, który wykorzystuje aktualną bezwzględną wartość innowacji e_{k+1} w chwili k (8) do wyznaczenia wartości kowariancji szumu pomiarowego.

Wartość innowacji e_{k+1} wzrasta w momencie pojawienia się chwilowego zakłócenia o amplitudzie większej niż prawidłowy pomiar z_k i wartość wynikająca z predykcji $\hat{x}_{k+1|k}$. W związku z tym korekcja wartości pomiarowej z_k w chwili k przez filtr Kalmana wzrośnie wyłącznie w momencie pojawienia się zakłócenia. Współczynnik adaptacyjny Λ_{k+1} modyfikujący wpływ kowariancji R_k w chwili k w równaniu (9) jest opisany następująco [A5]:

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= (z_{k+1} - H \cdot \hat{x}_{k+1|k}) \\ \Lambda_{k+1} &= |e_{k+1}|, \end{aligned} \quad (8)$$

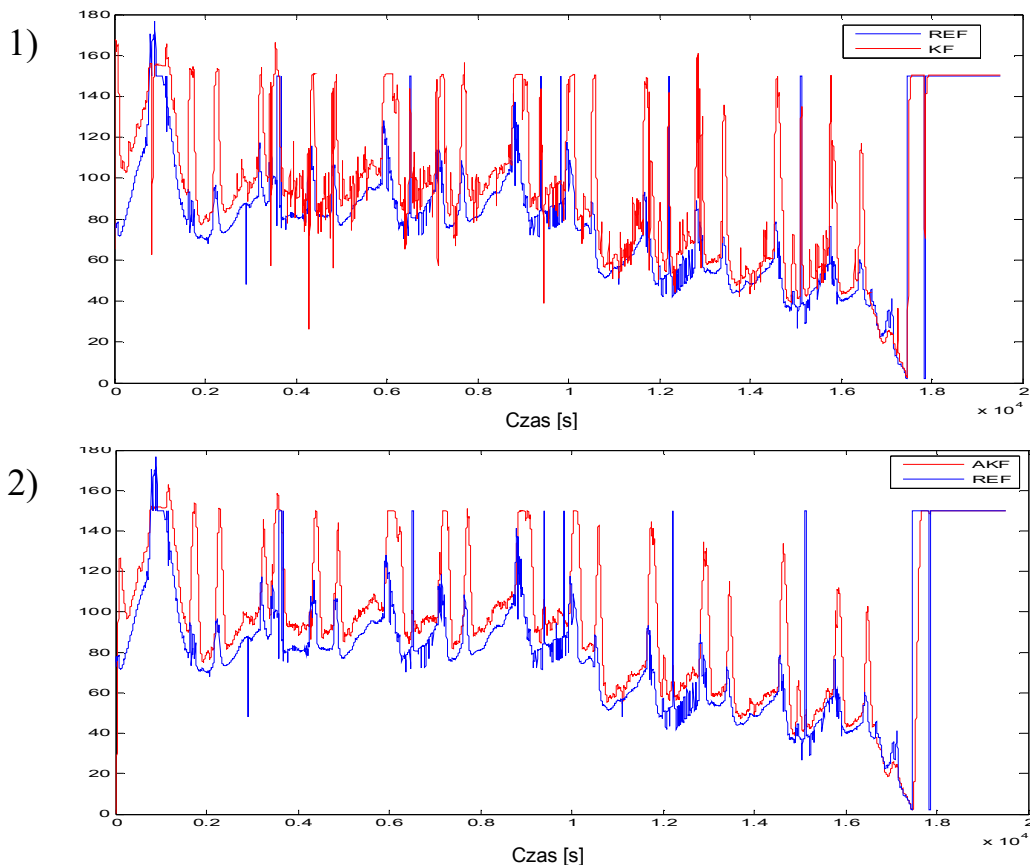
gdzie: e_{k+1} – innowacja w chwili $k+1$, z_{k+1} – pomiar zmiennych stanu w chwili k , $\hat{x}_{k+1|k}$ – predykcja wektora zmiennych stanu w chwili $k+1$,

Aby uwzględnić współczynnik Λ_{k+1} w algorytmie filtracji zmodyfikowano postać wzmacnienia Kalmana [A5]:

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{k+1|k} \cdot H^T + \Lambda_{k+1} \cdot R_k)^{-1}, \quad (9)$$

gdzie: K_{k+1} – wzmacnienie filtra w chwili $k+1$, $P_{k+1|k}$ – predykcja macierzy kowariancji zmiennych stanu w chwili $k+1$, H – macierz wyjść w przestrzeni stanu, R_k – kowariancja szumu pomiarowego w chwili k , Λ_{k+1} – współczynnik adaptacyjny w chwili $k+1$.

Rysunek 24 przedstawia porównanie obu zastosowanych metod (KF - Kalman Filter i AKF - Adaptive Kalman Filter) w stosunku do oryginalnego referencyjnego (REF) sygnału z zakłóceniami. Zgodnie z rysunkiem 25 można stwierdzić, że proponowany algorytm adaptacyjnego filtra Kalmana jest wysoce skuteczny w usuwaniu chwilowych zakłóceń pomiaru odległości o wysokiej amplitudzie, bez znacznego zniekształcania pozostałej części sygnału. Może to być wykorzystane w praktyce w celu zapobiegania błędom systemów pomiarowych o podobnej charakterystyce. Algorytm adaptacyjnego filtra Kalmana stanowi autorski wkład w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów nawigacyjnych BSP.



Rys. 25. Porównanie efektów działania filtra Kalmana z estymowaną wartością kowariancji (KF) oraz opracowanego adaptacyjnego filtra Kalmana (AKF) z sygnałem zakłóconym (REF), [A5]

Optymalizacyjne podejście do dostosowania parametrów filtru Kalmana do filtracji sygnałów akcelerometrów i giroskopów w czasie rzeczywistym

Do sterowania lotem BSP są wykorzystywane układy nawigacji inercyjnej. Na podstawie informacji o przyspieszeniu liniowym i prędkości kątowej wyznaczają one orientację i pozycję BSP. Stąd ważnym problemem jest jakość sygnałów uzyskiwanych z akcelerometrów oraz giroskopów. Zakłócenia w postaci szumów wpływają bowiem na dokładność wyznaczania pozycji i orientacji BSP, co wpływa na niezawodność nawigacji inercyjnej. Do filtracji tych zakłóceń można wykorzystać filtr Kalmana. Problemem do rozwiązania pozostaje wyznaczenie kowariancji szumów: pomiarowego i systemowego, których źródła znajdują się w otoczeniu BSP. W przypadkach implementacji filtrów Kalmana, które są opisane w literaturze [31, 32], parametry te są identyfikowane na podstawie znajomości a priori dokładnego modelu procesu dynamicznego oraz szumu pomiarowego lub stosuje się adaptacyjne filtry [28, 29, 30]. Opracowano zatem metodę wyznaczania tych parametrów, tak aby wyeliminować szum bez zniekształcania samego sygnału i znajomości charakterystyki szumu pomiarowego oraz szumu systemowego.

Filtr Kalmana jest optymalnym estymatorem zmiennych stanu procesu, który skutecznie eliminuje szumy o charakterystyce szumu białego. Jednakże jego dokładność zależy od dokładności wykorzystanego modelu procesu w przestrzeni stanu opisującego proces związany z pomiarem, a także identyfikacji źródła szumów systemowego i pomiarowego oraz wyznaczenia ich kowariancji. Nie zawsze jednak można wyznaczyć dokładny model procesu ani dokładną kowariancję zakłóceń, zarówno systemowych jak i pomiarowych. Przykładem takiej sytuacji jest pomiar przyspieszeń i prędkości kątowych na pokładzie BSP, który jest podatny na podmuchy wiatru. Ponadto pokładowe systemy sterownia nie są w stanie wykonać obliczeń związanych ze złożonym filtrem Kalmana. Dlatego też zaproponowałem filtry Kalmana do filtracji sygnałów przyspieszeń i prędkości kątowych oparte o proste modele dowolnego ruchu opisujące przyspieszenie oraz prędkość kątową, które mogłaby być realizowane w czasie rzeczywistym [A6]. odpowiednio dla przyspieszenia:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot w(t) = F \cdot X(t) + B_A \cdot w(t), \\ Z(t) &= [0 \quad 1] \cdot X(t) + v(t) = C_A \cdot X(t) + v(t) \\ X(t) &= \begin{bmatrix} V \\ a \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{10}$$

gdzie: Z – wyjście modelu, X – wektor zmiennych stanu, V – prędkość, $\dot{V}$ – przyspieszanie (a), $w(t)$ – szum systemowy, $v(t)$ – szum pomiarowy, F – macierz stanu, B_A – macierz wejść, C_A – macierz wyjść, i prędkości kątowej:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot w(t) = F \cdot X(t) + B_G \cdot w(t), \\ Z(t) &= [1 \quad 0] \cdot X(t) + v(t) = C_G \cdot X(t) + v(t) \\ X(t) &= \begin{bmatrix} \omega \\ \varepsilon \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{11}$$

gdzie: Z – wyjście modelu, X – wektor zmiennych stanu, ω – prędkość kątowa, $\dot{\omega}$ – przyspieszanie kątowe (ε), $w(t)$ – szum systemowy, $v(t)$ – szum pomiarowy, F – macierz stanu, B_G – macierz wejść, C_G – macierz wyjść.

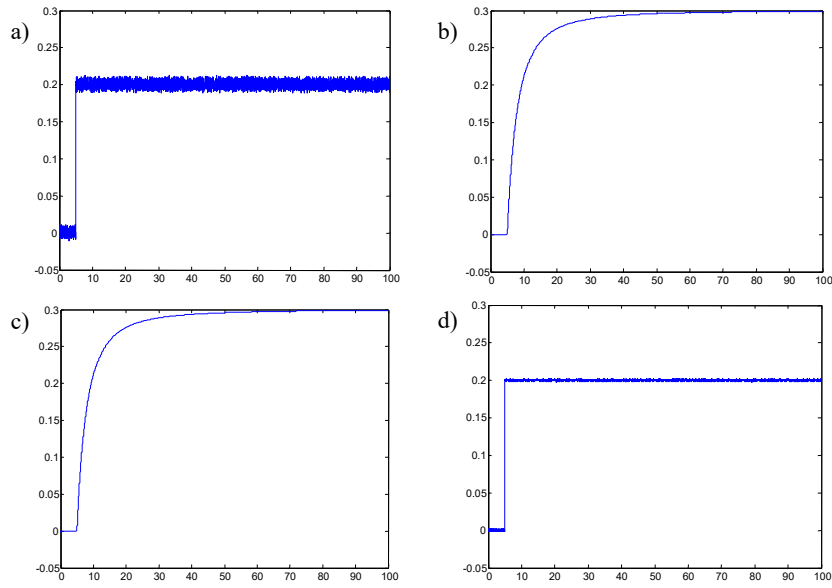
Parametry w postaci kowariancji szumu systemowego Q_k w chwili k oraz kowariancji szumu pomiarowego R_k w chwili k były traktowane jako nieznane. Stąd też zasadniczym problemem, który podjąłem w pracy [A6] była odpowiedź na pytanie czy parametry te można wyznaczyć stosując metody optymalizacji, przyjmując funkcję celu uwzględniającą różnicę pomiędzy sygnałem idealnym a sygnałem otrzymanym na wyjściu filtru. Ponieważ wzmocnienie Kalmana K_{k+1} można traktować jako siłę korekcji predykcji wektora stanu $\hat{x}_{k+1|k}$ o wartość innowacji $e_{k+1} = (z_{k+1} - H \cdot \hat{x}_{k+1|k})$, to przy zbyt dużym wzmocnieniu ($K_{k+1} = 1$) na wyjściu filtru będzie odebrany sygnał z_{k+1} . Przy zbyt małym wzmocnieniu ($K_{k+1} = 0$) na wyjściu będzie to sygnał $\hat{x}_{k+1|k}$. W przypadku rozpatrywanych modeli, małe wzmocnienie K_{k+1} będzie wprowadzało inercję I rzędu. Wynika to z założonego modelu procesu i z równania predykcji filtru Kalmana:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1|k} &= F \cdot \hat{x}_{k|k}, \\ P_{k+1|k} &= F \cdot P_{k|k} \cdot F^T + G \cdot Q_k \cdot G^T,\end{aligned}\tag{12}$$

gdzie: F – macierz stanu, G – macierz wejść, Q_k – macierz kowariancji szumu systemowego w chwili k , $\hat{x}_{k+1|k}$ – predykcja zmiennych stanu w chwili $k+1$, $\hat{x}_{k|k}$ – estymacja zmiennych stanu w chwili k , $P_{k+1|k}$ – predykcja macierzy kowariancji zmiennych stanu w chwili $k+1$, $P_{k|k}$ – estymacja macierzy kowariancji zmiennych stanu w chwili k .

Natomiast zbyt duże K_{k+1} spowoduje, że szum pomiarowy nie zostanie całkowicie wyeliminowany. Zależności pomiędzy poziomem szumu, inercją odpowiedzi skokowej,

wartościami kowariancjami Q_k oraz R_k są przedstawione na rysunku 26 na przykładzie sygnału prędkości kątowej.



Rys. 26. Zachowanie się sygnału na wyjściu KF dla różnych wartości R_k , Q_k . Sygnał wejściowy filtru był sumą skoku o amplitudzie 0,2 oraz zarejestrowanego sygnału prędkości kątowej: a) $R_k = 0$, $Q_k = 2.4907 \cdot 10^{-9}$, $P_0 = [1 \ 1; 1 \ 1]$; b) $R_k = 1$, $Q_k = 2.4907 \cdot 10^{-9}$, $P_0 = [1 \ 1; 1 \ 1]$; c) $R_k = 1.3872 \cdot 10^{-6}$, $Q_k = 0$, $P_0 = [1 \ 1; 1 \ 1]$; d) $R_k = 1.3872 \cdot 10^{-6}$, $Q_k = 1$, $P_0 = [1 \ 1; 1 \ 1]$, [A6]

Wzmocnienie filtru Kalmana K_{k+1} zależy bezpośrednio od kowariancji szumu pomiarowego R_k , dlatego też powinna być ona tak dobrana, aby uzyskać jak najlepszy efekt filtracji przy wprowadzeniu nieznaczącej inercji w zmianie sygnału na wyjściu filtru. Dlatego też sformułowalem funkcję celu będącą łącznym wskaźnikiem poziomu szumu wyznaczonego na podstawie pola powierzchni pod krzywą widma FFT oraz błędu pomiędzy idealnym skokiem jednostkowym a tym samym skokiem z uwzględnieniem szumów [A6]:

$$I(R_k, Q_k) = \int_{t=t_s}^{t_f} (S(\tau) - \hat{x}(\tau, R_k, Q_k))^2 d\tau + \int_{f=0}^{f=\frac{F_s}{2}} |\hat{X}(f, R_k, Q_k)| df \quad (13)$$

gdzie: Q_k – macierz kowariancji szumu systemowego, R_k – macierz kowariancji szumu pomiarowego, F_s – częstotliwość próbkowania, $S(\tau)$ – idealny sygnał referencyjny, $\hat{x}$ – sygnał wyjściowy filtru Kalmana, $\hat{X}$ – widmo FFT sygnału wyjściowego filtru Kalmana.

Jak widać funkcja ta zależy od kowariancji szumu systemowego Q_k i pomiarowego R_k . Minimalizując funkcję celu (13) przybliżamy się do rozwiązania idealnego, czyli do rozwiązania pozbawionego szumów i inercji wynikającej z uproszczonego modelu systemu procesu. Założony cel badań osiągnięto. Wyznaczono optymalne wartości kowariancji Q_k i R_k , zapewniające minimalny poziom szumów przy braku zniekształcenia odpowiedzi skokowej

przez inercję przyjętego modelu. Przedstawioną metodykę wyznaczania optymalnych wartości Q_k i R_k można wykorzystać do opracowania filtrów Kalmana skutecznych przy filtracji sygnałów pokładowych systemów nawigacji inercjalnej bezzałogowych statków powietrznych, podnosząc ich niezawodność.

Podsumowanie

Przedstawiony cykl publikacji obejmuje obszerny zakres problematyki budowy i eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych. Przedstawione zagadnienia opracowano zarówno analitycznie, jak i eksperymentalnie, przeprowadzając loty testowe na zbudowanych BSP z zaimplementowanymi proponowanymi rozwiązaniami. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych jednoznacznie weryfikują skuteczność opracowanych przeze mnie rozwiązań, a przede wszystkim wskazują, że mogą być one wykorzystane do budowy komercyjnych bezzałogowych statków powietrznych posiadających możliwość:

- lotu w kanionach ulic oraz omijania przeszkód,
- implementacji precyzyjnego śledzenia pozycji podczas lotu nieholonomicznych BSP w sztywnej formacji,
- podniesienia niezawodności inercjalnych układów nawigacyjnych oraz systemów detekcji przeszkód.

Całość opisanych rozwiązań stanowi istotny wkład w dziedzinę *budowy i eksploatacji maszyn*, jakimi są BSP. Przeprowadzone badania są również podstawą do dalszych prac szczególnie w zakresie weryfikacji skuteczności działania zbudowanego demonstratora skanera laserowego. Skaner ten stanowi unikalne rozwiązanie objęte ochroną patentową (PL231400 (B1) – pozycja [A7] w osiągnięciu naukowym).

Do moich osiągnięć w dziedzinie *budowa i eksploatacja maszyn* zaliczam:

1. opracowanie nowatorskiego rozwiązania precyzyjnego śledzenia pozycji w sztywnej formacji nieholonomicznych BSP oraz jego udoskonalenie poprzez implementację mechanizmu rotacji wektorów prędkości. Przedstawione rozwiązanie wpływa nie tylko na precyzję śledzenia pozycji, ale również na wydłużenie maksymalnego czasu lotu, co podnosi efektywność eksploatacji BSP,
2. opracowanie oraz implementacja nowatorskiego rozwiązania systemu omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic przeznaczonego do budowy samodzielnych BSP, które mogą być bezpiecznie eksploatowane w obszarze zurbanizowanym,

3. opracowanie i zbudowanie demonstratora skanera laserowego przeznaczonego do budowy BSP o możliwości omijania przeszkód i lotu w nieznanym obszarze podnoszącego bezpieczeństwo wykonywanych lotów,
4. opracowanie nowatorskiego adaptacyjnego filtru Kalmana i zastosowanie go do filtracji rzeczywistych sygnałów pomiarowych dalmierzy laserowych w celu podniesienia niezawodności rozwiązań omijania przeszkód opartych o pomiar odległości dalmierzem laserowym w czasie eksploatacji BSP,
5. opracowanie nowatorskiej optymalizacyjnej metody wyznaczania parametrów filtru Kalmana i zastosowaniu jej w filtracji rzeczywistych sygnałów nawigacyjnych, w celu podniesienia niezawodności nawigacji inercyjnej.

Bibliografia

- [1] A. Tomczyk, Synthesis of the Unmanned Aerial Vehicle Remote Control Augmentation System, w *Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Science Conference*, Narvik, 2014,
- [2] A. Tomczyk, Reaction shaping of the unmanned aerial Vehicle on the operator remote steering signals, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika*, 85 (288), nr 4, 2013, s. 547-555,
- [3] K. Sibilski, Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu obiektów latających, Warszawa: Oficyna Wydawnicza MH, 2004,
- [4] T. Rogalski i A. Tomczyk, Możliwości wykorzystania bezałogowych aparatów latających w polskiej przestrzeni powietrznej, *Journal of Aeronautica Integra*, 2013,
- [5] K. Sibilski, J. Pietrucha i M. Złocka, Comparative Evaluation of Power Requirements for Fixed, Rotary, and Flapping Wings Micro Air Vehicles, w *Conference: AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, Hilton Head, 2007,
- [6] S. Hrabar, G. Sukhatme, P. Corke, K. Usher i J. Roberts, Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV, w *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005,
- [7] J. B. Saunders, A. Curtis, A. W. Beard i T. McLain, Static and dynamic obstacle avoidance in miniature air vehicles, w *AIAA Infotech at Aerospace*, 2005,
- [8] C. Kownacki, Autonomia bezałogowych statków powietrznych – wybrane zagadnienia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2016, s. 240,
- [9] C. W. Reynolds, Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model, w *Proceedings of ACM SIGGRAPH '87*, Anaheim, USA, 1987,
- [10] S. Hauert, S. Leven, M. Varga, F. Ruini, A. Cangelosi, J. C. Zufferey i D. Floreano, Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate, w *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Francisco, 2011,
- [11] G. Vásárhelyi, C. Virágh, G. Somorjai, N. Tarcai, T. Szörényi, T. Nepusz i T. Vicsek, Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots, w *Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, 2014,
- [12] C. Kownacki, D. Ołdziej, Fixed-wing UAVs Flock Control through Cohesion and Repulsion Behaviors Combined with a Leadership, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, 2016, dokument online (DOI: 10.5772/62249),
- [13] C. Kownacki, M. Bogdan, Autonomous flight in the canyons of streets on the basis of information derived from the vision system, *Solid State Phenomena*, Trans-Tech Publications, vol. 198, 2013, s. 176-181,
- [14] C. Kownacki, Multi-UAV flight using virtual structure combined with behavioral approach, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 10, Nr 2, 2016, s. 92-99,
- [15] R. S. Holt, R.W. Beard, Vision-based Read-Following Using Proportional Navigation, *the 2nd International Symposium on UAVs*, Reno, Nevada, U.S.A. June 8–10, 2009,

- [16] A. Beyeler, J.C. Zufferery, D. Florano, OptiPilot: control of take-off and landing using optic flow, https://www.researchgate.net/publication/41939831_optiPilot_control_of_take-off_and_landing_using_optic_flow,
- [17] S. Griffiths J. B. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain i A. W. Beard, Obstacle and Terrain Avoidance for Miniature Aerial Vehicles, *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, 2007, s. 213-244,
- [18] Y. Nagao and K. Uchiyama, Formation flight of fixed-wing UAVs using artificial potential field, *29th Congress of the International Council of the Aerospace Sciences*, St. Petersburg, 2014,
- [19] E. W. Frew, D. A. Lawrence, C. Dixon, J. Elston i W. J. Pisano, Lyapunov Guidance Vector Fields for Unmanned Aircraft Applications, *IEEE American Control Conference*, 2007,
- [20] J. La Salle, S. Lefschetz, Stability by Liapunov's Direct Method: With Applications, New York, Academic Press, 1961,
- [21] Y. Lin, J. Hyypä i A. Jaakola, Mini UAV Borne LIDAR for Fine-Scale Mapping, *IEEE GeoScience and Remote Sensing Letters*, Vol. 8, No 3, 2011, s. 426-430,
- [22] S. Harbar, Reactive Obstacle Avoidance for Rotorcraft UAVs, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Wrzesień 25-30, 2011, San Francisco, USA,
- [23] S. Scherer, S. Singh, L. Chamberlain i M. Elgersma, Flying fast and low among obstacles: Methodology and experiments, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No 5, 2008, s. 549-574,
- [24] M. S. Geyer, E. N. Johnson, 3D Obstacle Avoidance in Adversarial Environments for Unmanned Aerial Vehicles, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006, AIAA, 2006-6542,
- [25] K. Li, X. Han i G. Qi, Formation and Obstacle Avoidance control for Mobile Swarm Robots Based on Artificial Potential Field, *Conference on Robotics and Biomimetics*, 2009,
- [26] T. Paul, T. R. Krogstad i J. T. Gravdahl, UAV formation flight using 3D potential field, *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2008,
- [27] L. Barnes, M. Fields i K. Valavanis, Unmanned Ground Vehicle Swarm Formation Control Using Potential Fields, *Mediterranean Conference on Control and Automation*, Athens, 2007,
- [28] S-T. Zhang, X-Y. Wei, Fuzzy adaptive Kalman filtering for DR/GPS, *the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Xi'an, 2-5 Listopad 2003, s. 2634-2637,
- [29] K. D. Sebesta, N. Boizot, A Real-Time Adaptive High-Gain EKF, Applied to a Quadcopter Inertial Navigation System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, Issue 1, 2014, s. 495-503,
- [30] C. Hajiyeve, H. E. Soken, Robust Adaptive Kalman Filter for estimation of UAV dynamics in the presence of sensor/actuator faults, *Aerospace Science and Technology*, Volume 28, Issue 1, 2013, s. 376-383.
- [31] A.H. Mohamed, K. P. Schwarz, Adaptive Kalman filter for INS/GPS. *Journal of Geodesy*, 1999, Vol. 73, s. 193-203,
- [32] J. Wang, M. P. Stewart, M. Tsakiri, Adaptive Kalman filtering for integration of GPS with GLONASS and INS. *Geodesy Beyond 2000*, Springer, 1999, s. 325-330.

6. Wykaz osiągnięć naukowo-badawczych kandydata-

I. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy

A. Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)

- A1. **Cezary Kownacki**, Leszek Ambroziak (2019), Adaptation Mechanism of asymmetrical potential field improving precision of position tracking in the case of nonholonomic UAVs, *Robotica*, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574719000286> (IF: 1,177, IF 2017: 1,177, liczba cytowań WoS Core Collection: 0, punkty MNiSW: 25).

Mój wkład w przygotowaniu publikacji polegał na: opracowaniu mechanizmu rotacji pola wektorów prędkości, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu rotacji asymetrycznego pola potencjalnego, wykonaniu badań symulacyjnych, opracowaniu wyników badań symulacyjnych, napisaniu i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- A2. **Cezary Kownacki**, Leszek Ambroziak (2017), Local and Asymmetrical Potential Field Approach to Leader Tracking Problem in Rigid Formations of Fixed-Wing UAVs, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 41, s. 81-89, (IF: 2,228, liczba cytowań WoS Core Collection: 1, punkty MNiSW: 40).

Mój wkład w przygotowaniu publikacji polegał na: opracowaniu zależności funkcji asymetrycznego pola potencjalowego, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu asymetrycznego pola potencjalnego, wykonaniu badań symulacyjnych, opracowaniu wyników badań symulacyjnych, napisaniu i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- A3. **Cezary Kownacki** (2016), A concept of laser scanner designed to realize 3D obstacle avoidance for a fixed-wing UAV, *Robotica*, Vol. 34, No. 2, s. 243-257, (IF: 1,554, liczba cytowań WoS Core Collection: 3, punkty MNiSW: 25),

- A4. **Cezary Kownacki** (2013), Successful application of miniature laser rangefinders in obstacle avoidance method for fixed wing MAV, *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 28, Nr 3, s. 292-298, (IF: 0,658, liczba cytowań WoS Core Collection: 5, punkty MNiSW: 15),

- A5. **Cezary Kownacki** (2015), Design of an adaptive Kalman filter to eliminate measurement faults of a laser rangefinder used in the UAV system, *Aerospace*

Science and Technology, Vol. 41, s. 81-89, (IF: 1,751, liczba cytowań WoS Core Collection: 4, punkty MNiSW: 40),

- A6. **Cezary Kownacki** (2011), Optimization approach to adapt Kalman filters for the real-time application of accelerometer and gyroscope signals' filtering, *Digital Signal Processing*, Vol. 21, Nr 1, s. 131-140, (IF: 1,435, liczba cytowań WoS Core Collection: 31, punkty MNiSW: 36).

Tabela 2. Zestawienie wskaźników cyklu publikacji

Nr	Udział w przygotowaniu publikacji [%]	Impact Factor	Liczba cytowań (WoS Core Collection) bez autocytowań	Liczba punktów MNiSW
A1	65%	1,177	0	25
A2	65%	2,228	1	40
A3	100%	1,554	3	25
A4	100%	0,658	5	15
A5	100%	1,751	4	40
A6	100%	1,435	31	27
	Suma	8,803	44	172

II. Wykaz innych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. I opublikowanych prac naukowych

B. Monografia

Cezary Kownacki (2016), Autonomia bezzałogowych statków powietrznych – wybrane zagadnienia, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, monografia, s. 240.

C. Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)

- C1. **Cezary Kownacki**, Daniel Ołdziej (2016), Fixed-wing UAVs Flock Control through Cohesion and Repulsion Behaviours Combined with a Leadership, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, dokument online (DOI: 10.5772/62249), (IF: 0,987, liczba cytowań WoS Core Collection: 5, punkty MNiSW: 15).

Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji sterowania lotem roju, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu sterowania lotem roju BSP, przygotowaniu jego opisu oraz implementacji z wykorzystaniem autopilota, przygotowaniu badań poligonowych, w tym na

opracowaniu programu lotu, udziale w badaniach poligonowych, opracowaniu wyników eksperymentów, napisaniu i redagowaniu tekstu. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- C2. **Cezary Kownacki** (2008), The application of multiparametric analysis of Barkhausen noise using continuous wavelet transform in comparative stress testing, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, Nr 2, s. 99-107, (IF: 0,161, liczba cytowań WoS Core Collection: 0, punkty MNiSW: 13).

Tabela 3. Zestawienie wskaźników publikacji

Nr	Udział w przygotowaniu publikacji [%]	Impact Factor	Liczba cytowań (WoS Core Collection) bez autocytowań	Liczba punktów MNiSW
1	65%	0,987	5	15
2	100%	0,161	0	13
	Suma	1,148	5	28

D. Rozdziały w monografiach

- D1. **Cezary Kownacki**, Daniel Ołdziej (2015), Flocking algorithm for fixed-wing unmanned aerial vehicle, w *Advances in aerospace guidance, navigation and control*, pod red. Joel Bordeneuve-Guibé, Antoine Drouin, Clément Roos, Springer, s. 415-431.

Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji sterowania lotem roju, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu sterowania lotem roju BSP, przygotowaniu jego opisu oraz implementacji z wykorzystaniem autopilota, przygotowaniu badań poligonowych, w tym opracowaniu programu lotu, udziale w badaniach poligonowych, opracowaniu wyników eksperymentów, napisaniu i redagowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 65%,

- D2. **Cezary Kownacki** (2013), Badania symulacyjne HWIL lotu roju dwóch bezzałogowych obiektów z wykorzystaniem zaawansowanych autopilotów, w *Loty grupowe i wyrzutnie bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, s. 271-301,
- D3. **Cezary Kownacki** (2013), Modelowanie i symulacja lotu roju bezzałogowych obiektów latających, w *Loty grupowe i wyrzutnie bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, s. 271-301,

- D4. **Cezary Kownacki**, Jarosław Hajduk (2012), Badania poligonowe algorytmu omijania przeszkód i lotu w kanionach ulic, w *Loty grupowe i wyrzutnie bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, s. 248-282.
- Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu algorytmu omijania przeszkód, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu omijania przeszkód z wykorzystaniem dwóch dalmierzy laserowych, przygotowaniu jego opisu oraz implementacji z wykorzystaniem dostępnego sprzętu, udziale w badaniach poligonowych, opracowaniu wyników eksperymentów, napisaniu i redagowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 65%,*
- D5. **Cezary Kownacki** (2012), Opracowanie prototypu testowego mikrosamolotu do realizacji algorytmu omijania przeszkód i lotu w kanionach ulic, w *Elementy autonomii lotu bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, s. 231-247,
- D6. **Cezary Kownacki** (2012), Projektowanie autopilota mikrosamolotu na potrzeby realizacji algorytmu omijania przeszkód oraz lotu w kanionach ulic, w *Elementy autonomii lotu bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, s. 210-230,
- D7. **Cezary Kownacki** (2012), Analiza i przegląd wybranych algorytmów autonomicznego sterowania lotem mikrosamolotów, w *Elementy autonomii lotu bezzałogowych aparatów*, pod red. Z. Gosiewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, s. 175-209,
- D8. **Cezary Kownacki** (2011), Obstacle avoidance strategy for Micro Aerial Vehicle, w *Advances in aerospace guidance, navigation and control*, pod red. Florian Holzapfel, Stephan Theil, Springer-Verlag, s. 117-135 (liczba cytowań WoS Core Collection: 6),
- D9. Józef Błachnio, **Cezary Kownacki** (2006), Metoda oceny rozkładu naprężeń własnych w funkcji głębokości warstwy wierzchniej łopatek sprężarki, w *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, Tom 6, pod red. Jerzego Lewitowicza, Leszka Lorocho, Jerzego Manerowskiego, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, s. 1-27.
- i. *Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu metody badań diagnostycznych, wykonaniu analizy zarejestrowanych sygnałów szumu*

Barkhausena z wykorzystaniem opracowanego algorytmu opartego na ciągłej transformacie falkowej, opracowaniu wyników, napisaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

E. Publikacje naukowe w recenzowanych czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR)

- E1. **Cezary Kownacki**, Leszek Ambroziak (2017), Flexible Structure Control Scheme of a UAVs Formation to Improve the Formation Stability During Maneuvers, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 11, Nr 3, s. 178-185, (punkty MNiSW: 14, liczba cytowań WoS Core Collection: 1).

Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji sterowania formacją, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu sterowania lotem formacji elastycznej, wykonaniu modelu symulacyjnego oraz przeprowadzeniu badań numerycznych, opracowaniu wyników symulacji, napisaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%,

- E2. **Cezary Kownacki** (2016), Multi-UAV flight using virtual structure combined with behavioral approach, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 10, Nr 2, s. 92-99, (punkty MNiSW: 14, liczba cytowań WoS Core Collection: 3),

- E3. **Cezary Kownacki** (2013), Real Flight Demonstration of Pitch and Roll Control for UAV Canyon Flights, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 7, Nr 3, s. 148-154, (punkty MNiSW: 7),

- E4. **Cezary Kownacki**, Mariusz Bogdan (2013), Autonomous flight in the canyons of streets on the basis of information derived from the vision system, *Solid State Phenomena*, Trans-Tech Publications, vol. 198, s. 176-181, (punkty MNiSW: 10, liczba cytowań WoS Core Collection: 0).

Mój wkład w przygotowanie publikacji polegał na: opracowaniu koncepcji sterowania lotem, wykonaniu przeglądu literatury, opracowaniu algorytmu analizy obrazu z uwidocznionymi krawędziami opisanymi w przestrzeni Hougha na potrzeby lotu w kanionach ulic, wykonaniu modelu symulacyjnego oraz przeprowadzeniu badań numerycznych, opracowaniu wyników symulacji, napisaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%,

- E5. **Cezary Kownacki** (2012), Koncepcja sterowania rojem bezzałogowych obiektów latających, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 58, Nr 8, s. 704-711, (punkty MNiSW: 9),

- E6. **Cezary Kownacki** (2010), Opracowanie algorytmu sterowania lotem mikrosamolotu w nieznanym terenie miejskim, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 4, Nr 3, s. 87-93, (punkty MNiSW: 6),
- E7. **Cezary Kownacki** (2010), Algorytm sterowania lotem mikrosamolotu w kanionie ulic z wykorzystaniem systemu wizyjnego, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 4, Nr 3, s. 76-86, (punkty MNiSW: 6),
- E8. **Cezary Kownacki** (2009), Filtracja sygnałów przyspieszeń i prędkości kątowych z użyciem dyskretnego filtru Kalmana, *Journal of Aeronautica Integra*, Nr 1, s. 45-50, (punkty MNiSW: 2),
- E9. **Cezary Kownacki** (2009), Wavelet analysis of Barkhausen noise in reconstructing distributions of residual stress, *Solid State Phenomena*, Trans-Tech Publication, vol. 144, s. 112-117, (punkty MNiSW: 20),
- E10. **Cezary Kownacki** (2008), Estymacja rozkładu naprężeń w funkcji głębokości warstwy wierzchniej łopatki sprężarki osiowej metodą analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 2, Nr 1, s. 51-56, (punkty MNiSW: 6).

Tabela 4. Zestawienie wskaźników publikacji

Nr	Udział w przygotowaniu publikacji [%]	Liczba punktów MNiSW
1	60%	14
2	100%	14
3	100%	7
4	60%	10
5	100%	9
6	100%	6
7	100%	6
8	100%	2
9	100%	20
10	100%	6
	Suma	94

W tabeli 5 (zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r.) została podana liczba publikacji z podziałem na wyżej wymienione grupy (§ 3. pkt. 4 a, § 4 pkt. 1).

Tabela 5. Zestawienie publikacji po uzyskaniu stopnia doktora

Rodzaj publikacji	Liczba publikacji
Monografia	1
Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	8
Autorstwo lub współautorstwo, rozdziałów w monografiach oraz publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	19

7. Sumaryczny Impact Factor

Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania lub *Impact Factor* w roku poprzednim, jeżeli IF dla roku publikacji jest jeszcze niedostępny (na dzień 22.03.2019):

Sumaryczny Impact Factor: **9,951**

8. Liczba cytowań

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS) (na dzień 22.03.2019):

Ogólna liczba cytowań: **67**

Bez autocytowań: **59**

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science Core Collection (na dzień 22.03.2019):

Ogólna liczba cytowań: **56**

Bez autocytowań: **48**

Liczba cytowań publikacji według bazy SCOPUS (na dzień 22.03.2019):

Ogólna liczba cytowań: **93**

Bez autocytowań: **88**

9. Indeks Hirscha

Indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Web of Science (WoS):

Indeks Hirscha: **4** (na dzień: 22.03.2019)

Indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Scopus:

Indeks Hirscha: **5** (na dzień: 22.03.2019)

10. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

Po uzyskaniu stopnia doktora brałem udział jako wykonawca w **4** pracach statutowych, **4** projektach rozwojowych, przy czym w jednym z nich jako kierownik B+R, **1** zespołowej pracy własnej prowadzonej przez Politechnikę Białostocką. Uczestniczę również w badaniach przemysłowych i rozwojowych realizowanych przez firmę MASTERPRESS S.A. w ramach Działania 1.1 *Projekty B+R przedsiębiorstw*. Informacje na temat projektów zawiera *tabela 6*.

Tabela 6. Zestawienie projektów badawczych wykonywanych w latach od 2005 do 2019

Projekt	Charakter udziału
Praca statutowa S/WM/1/06: <i>Diagnostyka obiektów technicznych i biologicznych</i> – zrealizowany w Politechnice Białostockiej, Wydział Mechaniczny, w latach 2006-2008.	Wykonawca
Praca statutowa S/WM/1/08: <i>Projektowanie i badanie podzespołów mechatronicznych na potrzeby automatyki, robotyki i diagnostyki</i> – zrealizowany w Politechnice Białostockiej, Wydział Mechaniczny, w latach 2008-2009.	Wykonawca
Praca statutowa S/WM/1/2012: <i>Badania elementów pomiarowych i wykonawczych na potrzeby automatyki, robotyki i diagnostyki</i> – zrealizowany w Politechnice Białostockiej, Wydział Mechaniczny, w latach 2012-2015.	Wykonawca
Praca statutowa S/WM/1/2016: <i>Badania podzespołów i algorytmów na potrzeby inteligentnych systemów technicznych</i> – zrealizowany w Politechnice Białostockiej, Wydział Mechaniczny, od 2016.	Wykonawca
Projekt Nr O R00 0059 06: <i>Autonomiczny, zintegrowany system rozpoznania wykorzystujący autonomiczne platformy latające klasy mikro</i> , zrealizowany przez konsorcjum: ITWL, Politechnika Białostocka, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Wrocławska, Bumar Sp. z o. o., finansowany przez <i>Narodowe Centrum Badań i Rozwoju</i> , w latach 2008 – 2012.	Wykonawca

Projekt Nr O R00 0029 11 : <i>Sieciocentryczny system wsparcia rozpoznania i dowodzenia sytuacjami kryzysowymi na terenach zurbanizowanych z autonomicznymi bezzałogowymi aparatami latającymi</i> , zrealizowany przez konsorcjum: ITWL, Politechnika Białostocka, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Wrocławska, Dolam Sp. z o. o. oraz Bumar Sp. z o. o. finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju , w latach 2010 – 2013.	Wykonawca
Zespołowy projekt badawczy Nr W/WM/15/2006 : <i>Aktywne metody sterowania ruchem i drganiami układów mechanicznych i elektromechanicznych</i> , Politechnika Białostocka, w latach 2007 – 2009.	Wykonawca
Projekt badawczo-rozwojowy pt. <i>Kompleksowa linia technologiczna do aplikacji i obkurczania etykiet termokurczliwych w nowatorskiej technologii MASTERPRESS S.A.</i> o numerze POIR.01.01.01-00-0341/15 realizowany w ramach Działania 1.1 <i>Projekty B+R przedsiębiorstw</i> , Poddziałania 1.1.1 <i>Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa</i> Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój, (od 01-12-2015 do 30-11-2019).	Wykonawca - kierownik zespołu
Projekt badawczo-rozwojowy pt. <i>Modularny system obserwacyjno-inspekcyjny oparty na latającej platformie wielowirnikowej zasilanej ze stacji naziemnej</i> o numerze POIR.01.02.00-00-0072/16 realizowany przez firmę Moose Sp. z o. o. (od 01.01.2017 do 31.12.2017).	Wykonawca - kierownik zespołu
Projekt badawczo-rozwojowy pt. <i>Badania aplikacyjne w obszarze technologii nawigacji, sterowania, komunikacji i wymiany danych pomiędzy autonomicznym statkiem pływającym i statkiem powietrznym</i> o numerze POIR.04.01.04-00-0025/16 realizowany przez konsorcjum złożone z Politechniki Białostockiej, firmy UpLogic Sp. z o. o., firmy Sup4nav Sp. z o. o. oraz Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie, wartość przyznanego dofinansowania to 9 272 030,64. Wyniki projektu ze względu na charakter wdrożeniowy nie mogą być upublicznione w formie artykułów naukowych. W ramach projektu opracowano zgłoszenie patentowe. Moją rolą kierownika B+R w projekcie jest merytoryczny nadzór nad wykonywaniem prac związanych z opracowaniem technologii i wykonaniem BSP, która mogłaby być wykorzystana na bezzałogowym statku morskim. Na opracowywaną technologię składają się dwa typy BSP tj. śmigłowca wielowirnikowego zasilanego przewodowo o nieograniczonym czasie lotu oraz pionowzlotu, czyli płatowca z możliwością pionowego startu i lądowania.	Kierownik B+R

Kamery zainstalowane na BSP dostarczają informacji o nieznanych przeszkodach znajdujących się na kursie kolizyjnym BSM, która jest przetwarzana przez system wizyjny do postaci niezbędnej do wykonania autonomicznego manewru omijania przez BSM.	
--	--

11. Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową

- Nagrody zespołowe Rektora Politechniki Białostockiej III-go stopnia za wyróżniającą się działalność naukową oraz za doskonalenie procesu dydaktycznego w latach: 2008, 2009, 2010, 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 (łącznie 9 nagród),
- Nagroda zespołowa II stopnia Rektora Politechniki Białostockiej za uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych, w roku 2005.

12. Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych w latach 2005-2019

Wyniki moich badań były prezentowane na 9 konferencjach naukowych:

- na trzech kolejnych konferencjach CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC w latach 2011, 2013 i 2015,
- na konferencji European Micro Aerial Vehicle Conference and Flight Competition 2009 (EMAV'2009),
- na konferencji 3rd International Conference: Mechatronics Systems and Materials,
- na konferencji 8th International Conference: Mechatronics Systems and Materials,
- na konferencji 10th International Conference: Mechatronics Systems and Materials,
- na 1 konferencji 4th International Conference: Mechatronics Systems and Materials,
- 7th konferencji EASN International Conference on Innovation in European Aeronautics Research.

Spis konferencji wraz z tytułami referatów zamieszczono w *tabeli 7*.

Tabela 7. Aktywne uczestnictwo w konferencjach naukowych w latach 2007-2019

Nr	Autorzy	Tytuł referatu	Nazwa konferencji	Miejsce konferencji
1	Leszek Ambroziak, Mirosław Kondratiuk, Maciej Ciężkowski, Cezary Kownacki	Hardware in the loop tests of the potential field-based algorithm for formation flight control of unmanned aerial vehicles	14th International Conference: Mechatronic systems and materials: MSM 2018	Opole, Polska, 2018
1	Cezary Kownacki, Leszek Ambroziak	Stability of position tracking control in rigid structures of non-holonomic UAVs	7th EASN International Conference on Innovation in European Aeronautics Research.	Warszawa, Polska, 2017
2	Leszek Ambroziak Cezary Kownacki	Hardware in the loop tests of the switching formation flight controller	7th EASN International Conference on Innovation in European Aeronautics Research	Warszawa, Polska, 2017
3	Cezary Kownacki, Leszek Ambroziak	Flight control of a formation of fixed-wing UAVs based on the idea of flexible structure	12 th International Conference: Mechatronics Systems and Materials	Białystok, Polska, 2016
4	Cezary Kownacki, Daniel Ołdziej	Flocking algorithm for fixed-wing unmanned aerial vehicles	3 rd CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2015	Tuluza, Francja, 2015
5	Cezary Kownacki	Experimental verification of UAVs swarm control based on flocking behaviors combined with a leadership	10 th International Conference: Mechatronics Systems and Materials	Opole, Polska, 2014
6	Cezary Kownacki	The experiments with obstacle avoidance controls designed for micro UAV	2 nd CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2013	Delft, Holandia, 2013
7	Cezary Kownacki,	Autonomous flight in the canyons of streets on the basis of information	8 th International Conference: Mechatronics	Białystok, Polska, 2012

	Mariusz Bogdan	derived from vision system	Systems and Materials	
8	Cezary Kownacki	Obstacle avoidance strategy for Micro Aerial Vehicle	1 st CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2011	Monachium, Niemcy, 2011
9	Cezary Kownacki	Guidance and obstacle avoidance of MAV in uncertain urban environment	European Micro Aerial Vehicle Conference and Flight Competition 2009: EMAV'2009	Delft, Holandia, 2009
10	Cezary Kownacki	Wavelet analysis of Barkhausen noise in reconstructing distributions of residual stress	3 rd International Conference: Mechatronics Systems and Materials	Kowno, Litwa, 2007

13. Wykaz dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej

13.1. Uczestnictwo w programach europejskich, międzynarodowych i krajowych

Projekty finansowane ze środków Unii Europejskiej:

1. Projekt badawczo-rozwojowy pt. *Kompleksowa linia technologiczna do aplikacji i obkurczania etykiet termokurczliwych w nowatorskiej technologii MASTERPRESS S.A.* o numerze POIR.01.01.01-00-0341/15 realizowany w ramach Działania 1.1 *Projekty B+R przedsiębiorstw*, Poddziałania 1.1.1 *Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa* Programu Operacyjnego Innowacyjny Rozwój, 01-12-2015 – 31-05-2019.
2. Projekt badawczo-rozwojowy pt. *Modularny system obserwacyjno-inspekcyjny oparty na latającej platformie wielowirnikowej zasilanej ze stacji naziemnej* o numerze POIR.01.02.00-00-0072/16 realizowany przez firmę Moose Sp. z o.o. od 01.01.2017,
3. Projekt badawczo-rozwojowy pt. *Badania aplikacyjne w obszarze technologii nawigacji, sterowania, komunikacji i wymiany danych pomiędzy autonomicznym statkiem pływającym i statkiem powietrznym* o numerze POIR.04.01.04-00-0025/16 realizowany przez konsorcjum złożone z Politechniki Białostockiej, firmy UpLogic Sp. z o. o., firmy Sup4nav Sp. z o. o. oraz Fundacji

Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Łławie, wartość przyznanego dofinansowania to **9 272 030,64**.

13.2. Aktywny udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych

Lista referatów wygłoszonych na konferencjach krajowych i zagranicznych jest podana w tabeli 7. Wykaz konferencji, w których brałem aktywny udział po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych jest następujący:

1. 14th International Conference: Mechatronic systems and materials: MSM 2018, Opole, 2018 r.,
2. 7th EASN International Conference on Innovation in European Aeronautics Research, Warszawa, 2017 r.,
3. 12th International Conference: Mechatronics Systems and Materials, Białystok, Polska, 2016 r.,
4. 3rd CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2015, Tuluza, Francja, 2015 r.,
5. 10th International Conference: Mechatronics Systems and Materials, Opole, Polska, 2014 r.,
6. 2nd CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2013, Delft, Holandia, 2013 r.,
7. 8th International Conference: Mechatronics Systems and Materials, Białystok, Polska, 2012 r.,
8. 1st CEAS Specialist Conference on Guidance Navigation and Control, EuroGNC 2011, Monachium, Niemcy, 2011 r.,
9. European Micro Aerial Vehicle Conference and Flight Competition 2009: EMAV'2009, Delft, Holandia, 2009 r.,
10. 3rd International Conference: Mechatronics Systems and Materials, Kowno, Litwa, 2007 r.

13.3. Nagrody i wyróżnienia inne niż w pkt. 11

- Brązowy Medal za Długoletnią Służbę nadany w 2014 r,
- Medal Komisji Edukacji Narodowej nadany w 2018 r.

13.4. Udział w konsorcjach i sieciach badawczych

1. Udział w konsorcjum ośrodków naukowych i przedsiębiorstw utworzonego przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechniki: Białostocką, Rzeszowską i Wrocławską oraz przedsiębiorstwa: Bumar Sp. z o. o. i Przedsiębiorstwo Produkcyjne Podzespołów Elektronicznych DOLAM, które zostało zawiązane do realizacji projektu O R00 0029 11 (2010 – 2013) pt. *Sieciocentryczny system wsparcia rozpoznania i dowodzenia sytuacjami kryzysowymi na terenach zurbanizowanych z autonomicznymi bezzałogowymi aparatami latającymi*,
2. Udział w konsorcjum ośrodków naukowych i przedsiębiorstw utworzonego przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechniki: Białostocką, Rzeszowską i Wrocławską oraz przedsiębiorstwo Bumar Sp. z o. o., które zostało zawiązane do realizacji projektu O R00 0059 06 (2008 – 2012) pt. *Autonomiczny, zintegrowany system rozpoznania wykorzystujący autonomiczne platformy latające klasy mikro*,
3. Udział w konsorcjum ośrodków naukowych i przedsiębiorstw utworzonego przez Politechnikę Białostocką, firmy UpLogic Sp. z o. o., firmy Sup4nav Sp. z o. o. oraz Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie, które zostało zawiązane do realizacji projektu pt. *Badania aplikacyjne w obszarze technologii nawigacji, sterowania, komunikacji i wymiany danych pomiędzy autonomicznym statkiem pływającym i statkiem powietrznym* o numerze POIR.04.01.04-00-0025/16 (2017-2020),

13.5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach

- Od 2010 roku członek Polskiego Towarzystwa Aeronautyki i Astronautyki (PSAA). Towarzystwo to jest jednocześnie członkiem *Council of European Aerospace Societies*.

13.6. Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki

Działalność dydaktyczna po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych była związana z opracowaniem programów i materiałów dydaktycznych oraz prowadzeniem zajęć wykładowych, projektowych i laboratoryjnych dla studentów kierunku *automatyka i robotyka* (studia I-go i II-go stopnia) i kierunku: *edukacja techniczno-informatyczna* (studia I-go stopnia), z następujących przedmiotów: *programowalne systemy sterowania, programowanie zorientowane obiektowo, technika cyfrowa i mikroprocesorowa, urządzenia automatyki, nawigacja obiektów*

ruchomych, systemy pomiarowe w robotyce, komputerowe systemy pomiarowe, sterowniki cyfrowe, sterowniki czasu rzeczywistego.

Jestem autorem zaakceptowanych do realizacji przez Radę Wydziału Mechanicznego PB programów nauczania z przedmiotów (w tym wykładów, stanowisk oraz instrukcji z zajęć laboratoryjnych):

1. *systemy pomiarowe w robotyce* – opracowanie programu przedmiotu, materiałów do wykładów i instrukcji laboratoryjnych,
2. *komputerowe systemy pomiarowe* – opracowanie programu oraz wykładów,
3. *programowanie zorientowane obiektowo* – opracowanie programu przedmiotu, materiałów do wykładów i zadań projektowych,
4. *nawigacja obiektów ruchomych* – opracowanie programu przedmiotu, materiałów do wykładów i instrukcji laboratoryjnych,
5. *sterowniki cyfrowe* – opracowanie programu przedmiotu, materiałów do wykładów i instrukcji laboratoryjnych,
6. *sterowniki czasu rzeczywistego* – opracowanie programu przedmiotu, materiałów wykładów i instrukcji laboratoryjnych.

Zaangażowanie w popularyzację nauki:

1. prezentowanie kandydatom na studentów PB oferty kierunków studiów prowadzonych na Wydziale Mechanicznym, a w szczególności kierunku *automatyka i robotyka*. XIV edycja Prezentacji Edukacyjno-Doradczych pod hasłem *Uczelnie w powiecie*, która odbyła się w dniu 22.02.2016 r.,
2. Przedstawienie dorobku naukowego kół studenckich Wydziału Mechanicznego PB oraz organizacja wyjazdu i udział w 7 Nocy w Instytucie Lotnictwa – ogólnokrajowej imprezie popularyzującej naukę, która odbyła się w dniu 14.10.2016.

Promotorstwo i recenzowanie prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich:

- od 2005 r., promotor 18 obronionych prac inżynierskich oraz 7 obronionych prac magisterskich na kierunku *automatyka i robotyka* (Wydział Mechaniczny PB),
- od 2005 r., recenzent 20 prac inżynierskich oraz 5 prac magisterskich na kierunku *automatyka i robotyka* (Wydział Mechaniczny PB).

Pełnione funkcje:

1. opiekun Laboratorium Awioniki i Nawigacji na Wydziale Mechanicznym PB,
2. opiekun roku na kierunku *edukacja techniczno – informatyczna* w latach 2006/2007, 2009/2010, 2011-2014,
3. opiekun roku na kierunku *automatyka i robotyka* w latach 2000-2005,
4. opiekun praktyk studenckich (programowa i dyplomowa) w latach 2003-2005,
5. członek powołanego przez Uchwałę Rady Wydziału 659/2012-2016 zespołu ds. nadzorowania programów kształcenia na kierunku *automatyka i robotyka* prowadzonym na Wydział Mechanicznym (od listopada 2015),
6. członek zespołu opracowującego raport samooceny dla Państwowej Komisji Akredytacyjnej w ramach okresowej oceny kierunku studiów *automatyka i robotyka* (2010/2011).

Prowadzenie zajęć dla studentów zagranicznych:

1. Prowadzenie zajęć dla studentów zagranicznych w języku angielskim w ramach programu **ERASMUS** - projekt semestralny pt. Stabilization algorithm of quadrotor flight, studentów z UNIVERSITE DE PICARDIE JULES VERNE AMIENS, 2008/2009, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,
2. Prowadzenie zajęć dla studentów zagranicznych w języku angielskim w ramach programu **ERASMUS** – laboratorium *Microcontroller programming*, 2012/2013, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,
3. Prowadzenie zajęć dla studentów zagranicznych w języku angielskim w ramach programu **ERASMUS** – *Computer measurement systems*, 2016/2017, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.
4. Prowadzenie zajęć dla studentów zagranicznych w języku angielskim w ramach programu **ERASMUS** – *Real-time operating systems for microcontrollers*, 2017/2018, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

13.7. Staże i doświadczenie praktyczne zdobyte w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

- Staż naukowy w **Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych** w Warszawie (2 miesiące na przełomie 2001/2002 r.),

- Staż przemysłowy w **MASTERPRESS S.A.** na stanowisku technologa automatyka w okresie: 1.02.2006-31.07.2006 (w wymiarze ½ etatu),
- 31.07.2006 - 28.02.2010 – praca na stanowisku technolog automatyk w Dziale Badań i Rozwoju firmie **MASTERPRESS S.A.** w Białymstoku (w wymiarze ½ etatu),
- od 01.03.2010 – praca na stanowisku specjalista ds. badań i rozwoju w firmie **MASTERPRESS S.A.** w Białymstoku (w wymiarze ½ etatu).

13.8. Patenty i wdrożenia

Zgłoszenia patentowe:

- Mirosław Kondratiuk, Leszek Ambroziak, **Cezary Kownacki**, 2018, zgłoszenie patentowe pt. *Pasywne adaptujące się usterzenie nośne zwiększające efektywność energetyczną wielowirnikowego bezzałogowego statku powietrznego*, nr P.425865, Politechnika Białostocka, Białystok (**Mój udział procentowy szacuję na 33%** - opracowanie pomysłu rozwiązania technicznego),
- Mirosław Kondratiuk, Kamil Domysławski, Leszek Ambroziak, **Cezary Kownacki**, 2018, zgłoszenie patentowe pt. *Aktywne usterzenie nośne zwiększające efektywność energetyczną wielowirnikowego bezzałogowego statku powietrznego podczas lotu poziomego*, nr P.425644, Politechnika Białostocka, Białystok (**Mój udział procentowy szacuję na 25%** - opracowanie pomysłu rozwiązania technicznego).

Przyznane patenty:

- **Cezary Kownacki**, 2019, patent pt. *Miniaturowy skaner laserowy o stożkowej płaszczyźnie detekcji przeznaczony do systemów autonomicznego omijania przeszkód bezzałogowych obiektów latających*, nr PL231400 (B1), udzielony w dniu 28-02-2019, Politechnika Białostocka, Białystok (pozycja [A7] w osiągnięciu naukowym).

Wdrożenia przemysłowe (8):

1. **Cezary Kownacki** (2007-2009), Projekt oraz wdrożenie do użytkowania 3 przewijarek poziomych z automatyczną kontrolą naciągu, w tym 2 ze możliwością zmiany kierunku przewijania, wykonanych na potrzeby produkcyjne firmy **MASTERPRESS S.A.**

Zadaniem przewijarek jest przewijanie rolek na tuleje o różnej średnicy w płaszczyźnie poziomej. Dla wąskich rolek jest to korzystne ze względu na ułożenie rolki z etykietami na płaskim talerzu. Innowacyjnym elementem systemu sterowania przewijarek jest możliwości płynnej regulacji naciągu nawijania z wykorzystaniem sprzęgła proszkowego lub drugiego silnika.

Moja praca polegała na zaprojektowaniu systemu sterowania wraz z doбором elementów wykonawczych oraz sterowników, zaprogramowaniu sterownika PLC, konfiguracji falowników, opracowaniu schematu elektrycznego, montażu oraz wykonaniu rozdzielnic sterującej, uruchomieniu oraz testach, wykonaniu instrukcji i przeprowadzeniu szkoleń,

2. **Cezary Kownacki (2011)**, Projekt systemu sterownia oraz wdrożenie do użytku maszyny wykrawającej etykiety moletowane oraz zawieszki z systemem automatycznego pasowania położenia wykrojnika etykiety względem nadruku z wykorzystaniem 5 osiego systemu (fazowania) ruchu Mitsubishi Q-Motion, zbudowana na potrzeby produkcyjne firmy MASTERPRESS S.A.

Rolą maszyny w zakładzie produkcyjnym firmy MASTERPRESS jest wykrawanie wstęg z zawieszkami do herbat w torebkach z jednolitej wstęgi zadrukowanego materiału przy jednoczesnym nadaniem odpowiedniego kształtu zawieszce. Dlatego też pozycja wykrojnika musi być synchronizowana z nadrukiem. Jest to trudne do uzyskania w sytuacji, gdy zadrukowany materiał podlega rozciąganiu. Maszyna automatycznie koryguje położenie wykrojnika dzięki detekcji markera i wykorzystaniu serwonapędów. Innowacją w zbudowanej maszynie są trzy niezależne stacje, każda z nich może wykonywać inną operację i każda z nich oferuje proces automatycznego pasowania pozycji noży tnących (fazowania).

Moja praca polegała na: wykonaniu projektu systemu sterowania, w tym schematów elektrycznych, doborze elementów automatyki, opracowaniu kodów sterujących sterownik PLC i panelu operatorskiego, zaprojektowaniu rozdzielnic, skonfigurowaniu falowników oraz czujników, testach uruchomieniowych, opracowaniu instrukcji oraz przeprowadzeniu szkoleń,

3. **Cezary Kownacki (2010)**, Projekt doposażenia maszyny sklejkarki KARVILLE SEAM 300 o wdrożenie do użytku systemu inspekcji szerokości klejenia rękawa sleeve z wykorzystaniem kamery liniowej Sensopart LZS1024 zbudowany na własne potrzeby produkcyjne firmy MASTERPRESS S.A.

Sklejarka jest maszyną wykonującą proces sklejania wstęgi zadrukowanej folii w rękaw o określonej szerokości. Szerokość prawidłowego klejenia ma wpływ na proces aplikacji. Opracowany system mierzy szerokość sklejanego rękawa z dokładnością do 0,3 mm, co pozwala operatorowi kontrolować proces produkcyjny. Innowacją systemu jest ciągły bezkontaktowy pomiar szerokości rękawa z możliwością zadania progów alarmowych i archiwizacją pomiarów.

Moja praca polegała na opracowaniu koncepcji systemu pomiarowego, doborze elementów automatyki, zaprojektowaniu obwodów elektrycznych, konfiguracji elementów programowalnych, przeprowadzeniu procesu kalibracji, opracowaniu oprogramowania na komputer rejestrujący wyniki pomiaru, wykonaniu instrukcji i przeprowadzeniu szkoleń,

4. **Cezary Kownacki** (2015), zaprojektowanie i wdrożenie do użytku wizyjnego systemu inspekcji poprawności (6 kamer OMRON FQ2-S z rozpoznawaniem OCR) nadruku przemysłową drukarką atramentową kodów promocyjnych na etykietach produkowanych przez firmę MASTERPRESS S.A. dla producenta jogurtów Bakoma Sp. z o.o. Zadaniem systemu jest weryfikacji poprawności nadruku kodu promocyjnego tak aby był on czytelny dla klienta. Innowacją systemu kontroli jest możliwość kontroli poprawności kodów poprzez rozpoznawanie znaków jednocześnie na sześciu torach zadruku.

Moja praca polegała na: wybraniu odpowiedniego rozwiązania systemu wizyjnego, doborze pozostałych elementów do wyzwania migawki oraz wizualnej sygnalizacji nieprawidłowego druku kodów, konfiguracji kamer systemu wizyjnego poprzez dedykowanego oprogramowania – tak aby kamery wykrywały niewyraźnie wydrukowane litery oraz przeszkoleniu operatorów,

5. **Cezary Kownacki** (2016), zaprojektowanie wdrożenie do użytku systemu inspekcji poprawności aplikacji etykiety shrink sleeve na pojemniku szklanym współpracującego z dyskryminatorem E2M wykonanym przez firmę MASTERPRESS S.A. na zlecenie Herbapol S.A.

Podczas aplikacji etykiet termokurczliwych zdarzają się przypadki, gdy etykieta nie do końca się obsunie na pojemniku lub jej nie będzie w ogóle. Aby wyeliminować taki pojemnik z dalszej produkcji należy automatycznie go wykryć i przez dyskryminator usunąć z linii produkcyjnej. Opracowany system wykrywa brak etykiety, etykiety ze sklejką oraz źle założoną. Innowacją systemu inspekcji pojemnika z etykietą termokurczliwą jest szybka detekcja każdego z możliwych

błędów aplikacji i pozycji etykiety bez konieczności stosowania kosztownego systemu wizyjnego.

Moja praca polegała na zaprojektowaniu sposobu detekcji nieprawidłowo nałożonej etykiety termokurczliwej, doborze elementów pomiarowych w postaci czujników optycznych barierowych, doborze sterownika PLC oraz opracowaniu kodu sterującego, wykonaniu schematu elektrycznego oraz wykonaniu rozdzielnic, podłączeniu systemu z dyskryminatorem E2M, wykonaniu testów i uruchomieniu systemu w lokalizacji zamawiającego,

6. **Cezary Kownacki** (2014-2015), zaprojektowanie oraz wdrożenie do użytku systemu obkurczania etykiet shrink sleeve tj. parowego tunelu obkurczającego z system automatyki uwzględniającym pomiar ciśnienia i temperatury pary oraz regulację prędkości wentylatorów wyciągu, wykonanych przez firmę MASTERPRESS S.A. na zlecenie firmy Herbapol S.A. oraz Lactalis Polska Sp. z o.o. Zadaniem tunelu obkurczającego jest dostarczenie wokół pojemnika energii cieplnej w postaci pary, tak aby etykieta termokurczliwa obkurczyła się na pojemniku. Aby proces przebiegał prawidłowo należy monitorować temperaturę oraz regulować odbiór pary przez wyciąg. Innowacyjną cechą tunelu obkurczającego jest pomiar ciśnienia i temperatury w postaci sygnałów, które mogą być odczytane przez miernik elektroniczny lub sterownik PLC.

Moja praca polegała na zaprojektowaniu systemu automatyki wraz z doбором elementów, wykonaniu schematu elektrycznego, zaprojektowaniu rozdzielnic elektrycznej oraz uruchomieniu wraz z testami,

7. **Cezary Kownacki** (od 2016), zaprojektowanie i opracowanie centralnego systemu sterowania dla aplikatora etykiet shrink sleeve oraz tunelu obkurczającego dla MASTERPRESS S.A. w ramach projektu pt. Kompleksowa linia technologiczna do aplikacji i obkurczania etykiet termokurczliwych w nowatorskiej technologii MASTERPRESS S.A. o numerze **POIR.01.01.01-00-0341/15** – w toku. Celem projektu jest opracowanie produktu w postaci kompleksowej linii składającej się z aplikatora, tunelu obkurczającego oraz systemów inspekcyjnych, który mógłby być oferowany odbiorcom etykiet firmy MASTERPRESS.

Innowacyjnymi elementami aplikatora jest zastosowanie serwonapędu do napędzania rolek zrzutowych, możliwość automatycznej detekcji wysokości etykiety termokurczliwej, odczytywanie informacji o temperaturze w tunelu obkurczającym, oraz automatyczne obliczenie nastawy prędkości serwonapędów

z podaniem orientacyjnej wydajności aplikatora na podstawie czasów ramp serwonapędów, skrócenie czasu aplikacji etykiety poprzez minimalizację opóźnień w pracy napędu rolek mandreli w stosunku do napędu stacji nożowej.

Mój praca polegała na zaprojektowaniu systemu sterowania z obwodem bezpieczeństwa, dobór elementów sterujących, wykonawczych i pomiarowych, opracowaniu kodu dla sterowników PLC i panelu operatora, opracowaniu schematu elektrycznego, zaprojektowaniu rozdzielnic, skonfigurowaniu falowników, uruchomieniu maszyny oraz udziale w procedurach testowych. Moja rola w projekcie specjalista ds. automatyki przemysłowej,

8. **Cezary Kownacki** (2017-2018), zaprojektowanie systemu sterowania oraz wdrożenie do użytku aplikatorów etykiet termokurczliwych o wydajności do 300 szt./min wyprodukowanych przez firmę MASTERPRESS S.A. dla następujących firm: Bakoma Sp. z o. o., Lactalis Polska Sp. z o. o. oraz Farmec Rumunia. Aplikator etykiet termokurczliwych jest maszyną, które podczas procesu produkcji tnie rękaw sleeve na pojedyncze etykiety i nakłada je na pojemniki poruszające się na transporterze z określoną prędkością. Aplikatory wykorzystują technologię i wiedzę zdobytą podczas pracy w projekcie o numerze POIR.01.01.01-00-0341/15.

Mój praca polegała na zaprojektowaniu systemu sterowania z obwodem bezpieczeństwa, doborze elementów sterujących, wykonawczych i pomiarowych, opracowaniu kodu dla sterowników PLC i panelu operatora, opracowaniu schematu elektrycznego, zaprojektowaniu rozdzielnic, skonfigurowaniu falowników, uruchomieniu maszyny oraz udziale w procedurach testowych.

13.9. Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

- Recenzent wniosku o finansowanie projektu z konkursu nr 1/P/2016. *Młodzi Naukowcy 2016*. Wniosek został złożony w obszarze: technologie raketowe obrony powietrznej (październik 2016),
- Recenzent w czasopismach naukowych znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) (w nawiasach aktualna wartość IF):
 1. *Journal of Field Robotics* – (2 recenzje) wydawnictwo Wiley Online Library (IF: 3,460),
 2. *IEEE Sensors Journal* - (1 recenzja) wydawnictwo IEEE Sensor Council (IF: 2,617),

3. **Robotica** - (1 recenzja) wydawnictwo Cambridge University Press (IF: 1,177),
4. **Mechatronics** – (1 recenzja) wydawnictwo Elsevier (IF: 2,423),
5. **Sensors** – (1 recenzja) wydawnictwo MDPI (IF: 2,475),
6. **Measurement Science Review** – (1 recenzja) Gruyter (IF: 1,345).

22-03-2019

.....
Data



.....
Podpis kandydata