

## OCENA PARAMETRÓW RUCHU BEZZAŁOGOWYCH PLATFORM LATAJĄCYCH

KRZYSZTOF FALKOWSKI, MARIUSZ WAŻNY, MACIEJ HENZEL

*Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa*

*e-mail: krzysztof.falkowski@wat.edu.pl; mariusz.wazny@wat.edu.pl; maciej.henzel@wat.edu.pl*

W artykule przedstawione zostały wyniki badań weryfikacyjnych bezzałogowych statków powietrznych klasy micro opracowanych w Zakładzie Awioniki Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). Opracowane statki powietrzne posiadają masę około 1 kg i są przeznaczone do wykorzystania przez służby porządkowe i ratownicze. Małe BSP muszą charakteryzować się podwyższonymi poziomami autonomii, ponieważ mogą operować nad skupiskami ludzi i infrastrukturą miejską. W artykule przedstawiona jest ocena stopnia automatyzacji, który decyduje o poziomie autonomii BSP.

### 1. Wstęp

Dynamiczny rozwój małych bezzałogowych statków powietrznych (BSP) jest wymuszony zapotrzebowaniem ze strony różnych służb cywilnych. Mały BSP może być z łatwością wprowadzony na wyposażenie straży miejskiej, policji i służb ratownictwa pożarowego [2], [3]. Przykładem zastosowania tego typu BSP mogą być służby miejskie, które nie posiadają sprzętu do wykrywania zanieczyszczeń emitowanych przy ogrzewaniu domów niezgodnie z prawem. Patrol straży miejskiej wyposażony w BSP o masie około 1 kg może wykonać przelot nad podejrzanym terenem i jednocześnie zebrać materiał dowodowy o naruszeniu przepisów. Ponieważ BSP posiada system nawigacyjny, to można taki przelot udokumentować i wykorzystać jako materiał dowodowy.

Przeszkodą w użytkowaniu takich BSP są przepisy Urzędu Lotnictwa Cywilnego, które ograniczają możliwość użytkowania BSP o masie do 250 g bez uprawnień pilota. Dodatkowo każda organizacja powinna stać się operatorem lotniczym. Stan prawny spowodowany jest masowym użytkowaniem małych statków powietrznych, które stanowią poważne zagrożenie dla osób i mienia. Urząd Lotnictwa Cywilnego [4] objął nadzorem wszystkie latające statki powietrzne, niezależnie od ich przeznaczenia i wykonania, a jedynym kryterium jest masa (kategoria otwarta). Działania legislacyjne są uzasadnione, ale jednocześnie utrudniają prace nad rozwojem nowych konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych.

W Zakładzie Awioniki WAT prowadzone są prace badawcze związane z rozwojem autonomicznych statków powietrznych. Proces ten wymaga opracowania modeli matematycznych opisujących właściwości BSP klasy mikro. Weryfikacja modeli wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych, których celem jest przygotowanie materiału do ich weryfikacji. W artykule zostaną zaprezentowane wyniki przeprowadzanych badań podczas wykonywania w pełni automatycznego lotu, który trwał kilkanaście minut. Podczas badań wykorzystywano platformy o masie około 1 kg. Względny bezpieczeństwa podczas testów wymagały zastosowania pakietów baterii o większej pojemności, dlatego platformy maksymalnie ważyły około 1,2 kg.

## 2. Autonomiczny bezzałogowy statek powietrzny

Autonomiczny bezzałogowy statek powietrzny jest robotem mobilnym, którego zadaniem jest wyręczanie człowieka w wykonywaniu zadań, które polegają na uciążliwym wykonywaniu monotonicznych czynności lub są niebezpieczne. Jednocześnie umożliwiają pozyskanie zdolności, które wykraczają poza zakres kompetencji człowieka. Cechą charakterystyczną autonomicznych statków powietrznych jest poziom autonomii, czyli przekazywanie odpowiedzialności za wykonywane zadanie i podtrzymywanie funkcjonowania robota, w tym przypadku bezzałogowego statku powietrznego. Robot taki powinien nie tylko wykonywać postawione zadanie, ale również zadbać o własne funkcjonowanie w trakcie wykonywania zadania oraz zasoby energii konieczne do prawidłowego działania. Dlatego autonomiczny bezzałogowy statek powietrzny powinien:

- nadzorować zapotrzebowanie na energię konieczną do prawidłowego funkcjonowania robota oraz wykonania zadania,
- nadzorować wszelkie zmiany w integralności struktury własnej, które mogą powodować utratę zdolności do wykonywania zadania/zadań przez robota (Health Monitoring System),
- stabilizować parametry funkcjonalne,
- realizować postawione zadanie,
- rozstrzygać konflikty,
- współpracować z innymi bezzałogowymi i załogowymi systemami,
- zmieniać/modyfikować zadania cząstkowe w celu optymalnego wykonania zadania głównego,
- adaptować/modyfikować działanie względem zmiennych warunków środowiskowych (oddziaływanie otoczenia).

Ze względu na stopień autonomii BSP dzieli się na poziomy od 0 do 5 (tabela 1) [1], [5]. Poziom zerowy oznacza brak autonomii i dotyczy bezzałogowych statków powietrznych Remote Control/Radio Control (RC) – sterowanie radiowe/bezprzewodowe. Wzrost poziomu stopnia autonomii oznacza przenoszenie odpowiedzialności z pilota (człowieka) na robota (BSP) za poszczególne funkcjonalności i wykonywanie zadania przez robota mobilnego, jakim jest BSP. Przejęcie odpowiedzialności za wykonanie zadania występuje na poziomie 5. Uzyskanie tego poziomu wiąże się z rozbudowanymi zawansowanymi funkcjami nawigacji oraz elementami sztucznej inteligencji, które umożliwiają podejmowanie decyzji o formie realizacji zadania. Rola człowieka sprowadza się do zdefiniowania zadania i przekazania zadania autonomicznemu bezzałogowemu statkowi powietrznemu.

Poziomy 1 i 2 określają zdolność autonomicznego BSP do przejmowania odpowiedzialności za utrzymanie parametrów ruchu BSP oraz reagowanie na kolizje z przeszkodami. Zaprojektowany BSP spełniający poziom pierwszy powinien utrzymywać wybrane parametry ruchu. Pod pojęciem parametry ruchu rozumie się:

- utrzymanie położenia w przestrzeni – stabilizacja kątów pochylenia i przechylenia,
- stabilizację wysokości lotu,
- stabilizację prędkości lotu,
- stabilizację kursu,
- utrzymanie punktu (utrzymanie współrzędnych – długość i szerokość geograficzna),
- stabilizację toru lotu.

Przejęcie odpowiedzialności nad ważną funkcją może oznaczać automatyczne wykonanie ważnego ze względów funkcjonalnych manewru przez BSP. Takim manewrem może być automatyczny start, lądowanie i powrót do miejsca startu. W automatyzacji na poziomie 1 i 2 należy uwzględnić zdolność BSP do utrzymania zadanej trajektorii i profilu lotu.

**Tabela 1.** Stopnie autonomii [1], [5]

| Poziom | Stopień automatyzacji          | Opis                                                                                                                                              | Wykrywanie przeszkód     |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 0      | Brak automatyzacji             | Dron jest w 100% kontrolowany przez pilota                                                                                                        | Brak zdolności           |
| 1      | Niski poziom automatyzacji     | Pilot posiada kontrolę nad BSP. BSP przejmuje pojedynczą ważną funkcję                                                                            | Wykrywa i generuje alarm |
| 2      | Częściowy poziom automatyzacji | Pilot odpowiada za realizację operacji/zadania. BSP przejmuje odpowiedzialność za utrzymanie podstawowych parametrów ruchu, pod pewnymi warunkami | Wykrywa i generuje alarm |
| 3      | Warunkowy poziom automatyzacji | Pilot reaguje w sytuacjach zagrożenia/awarii. BSP odpowiada za wszystkie parametry ruchu w określonych warunkach                                  | Wykrywa i unika          |
| 4      | Wysoki poziom automatyzacji    | Pilot jest poza pętlą sterowania. BSP posiada systemy odpowiedzialne za przejmowanie zadań w przypadku wystąpienia awarii niektórych układów      | Wykrywanie i nawigacja   |
| 5      | Pełna automatyzacja            | BSP jest zdolny do planowania lotu oraz posiada zdolność uczenia się                                                                              | Wykrywanie i nawigacja   |

Ponieważ małe bezzałogowe statki powietrzne operują na niedużych wysokościach, to autonomiczny BSP powinien posiadać zdolność wykrycia takiej przeszkody i zasygnalizowanie niebezpieczeństwa wystąpienia kolizji. Przeszkodą mogą być obiekty naturalne (np. drzewa, wzgórza), obiekty będące wytworem człowieka (np. budynki, wiadukty) oraz inne bezzałogowe statki powietrzne. Ponieważ BSP o masie około 1 kg mogą mieć ograniczone zdolności przenoszenia zawansowanych układów wykrywania przeszkód, dlatego powinny być wprowadzane dodatkowe ograniczenia, np. na wysokość i prędkość lotu z układem wykrywania przeszkód. Dlatego na poziomie autonomii 1 i 2 występują dodatkowe wymagania, które dopuszczają przejmowanie odpowiedzialności przez autonomiczny BSP, ale po spełnieniu określonych warunków. Ograniczenia mogą wynikać z warunków atmosferycznych oraz wzajemnych relacji między parametrami lotu. Występowanie silnych podmuchów wiatru mogą uniemożliwić uzyskanie i stabilizację parametrów ruchu przez BSP. Innym przykładem może być wzajemne powiązanie parametrów, np. podczas lotu na małej wysokości mogą wystąpić ograniczenia prędkości BSP. Przykładowo BSP wykorzystywane do inspekcji torów kolejowych musi uwzględniać ograniczenia wynikające z operowania w obszarze infrastruktury kolejowej (np. występowanie trakcji elektrycznej).

Poziom 3 i 4 podnosi stopień automatyzacji procesów sterowania i obejmuje sterowanie poziomem bezpieczeństwa i niezawodności. Rola pilota sprowadzona zostaje do reagowania w sytuacjach awaryjnych i stanach zagrożenia. Z tym że na poziomie 4 pilot zostaje umieszczony poza pętlą sterowania, a BSP jest wyposażony w układy do przejmowania zadań w przypadku uszkodzenia istotnych ze względu na bezpieczeństwo techniczne BSP. Na poziomie 4 pojawiają się elementy sterowania strukturą BSP, tym samym BSP stają się układami samodzielnymi zdolnymi do wykonywania poleceń pilota, który staje się raczej dowódcą lub kierownikiem.

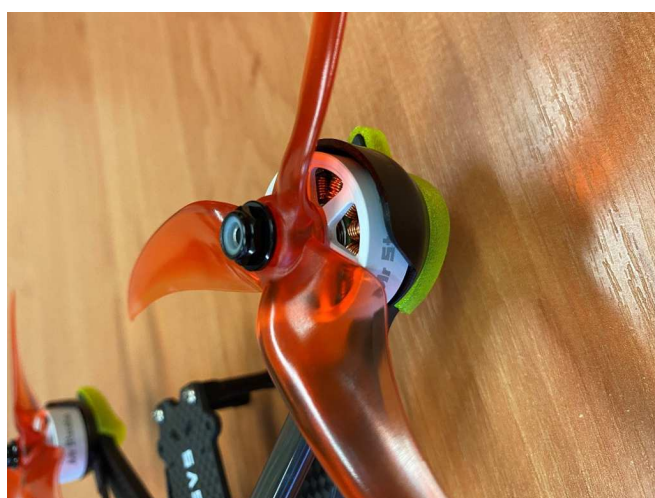
Jak zaznaczono powyżej, najwyższy jest poziom 5. BSP na tym poziomie potrafi się uczyć. Zakres samouczenia i podejmowania decyzji dotyczy spełniania funkcji, do których został zaprojektowany. Taki robot mobilny potrafi wykonać manewry w zakresie unikania przeszkód, uchylania się przed wykryciem wroga, optymalizuje trajektorię ruchu, zgodnie z zasadą najmniejszego

działania itp. Latający robot mobilny staje się strukturą, która umie się zorganizować i zaplanować swoje działania.

Wyda się, że osiągnięcie poziomu 4 jest wystarczające, by wprowadzić małe BSP na wyposażenie służb bezpieczeństwa publicznego. BSP zbudowane na takim poziomie powinno zapewnić bezpieczne wykonywanie zadań bezpośrednio nad skupiskami ludzi i infrastrukturą.

### 3. Konstrukcja małego bezzałogowego statku powietrznego

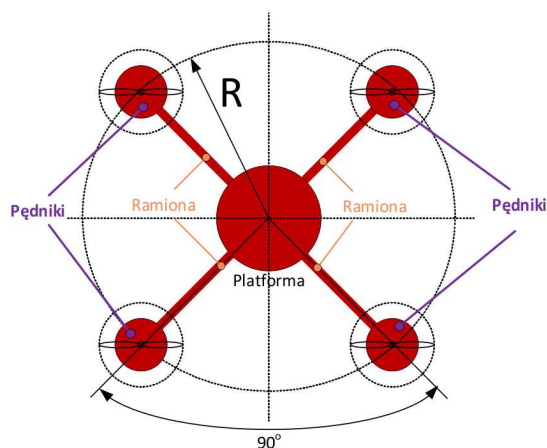
Małe bezzałogowe statki powietrzne BSP należą do grupy wielowirnikowych wiroplątów, w których siła nośna generowana jest przez pędniki. Pędnik obejmuje zespół: silnik i śmigło (rys. 1).



Rys. 1. Zespół napędowy silnik z trójłopatowym śmigłem - pędnik

Zależnie od liczby pędników można wyróżnić konfigurację: trójwirnikową, czterowirnikową, sześciowirnikową, ośmiowirnikową itd. Pędniki rozmieszczone są równomiernie na obwodzie koła, którego środek pokrywa się z środkiem geometrycznym wielowirnikowej platformy latającej (rys. 2).

(a)



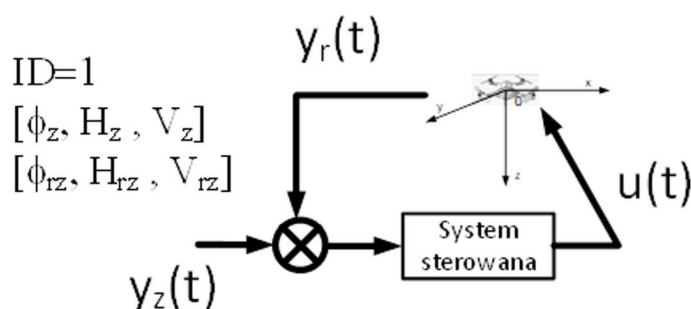
(b)



Rys. 2. Czterowirnikowa platforma latająca

W konfiguracji czterowirnikowej występują cztery zespoły napędowe (silnik ze śmigłem), które rozmieszczone są w stałej odległości od środka geometrycznego BSP (rys. 2a). Zespoły napędowe umieszczone są na końcach ramion zapewniających odpowiednią sztywność konstrukcji. Poszczególne ramiona wychodzą z centralnej części BSP, w której znajduje się platforma do zamocowania wyposażenia i przenoszenia ładunku.

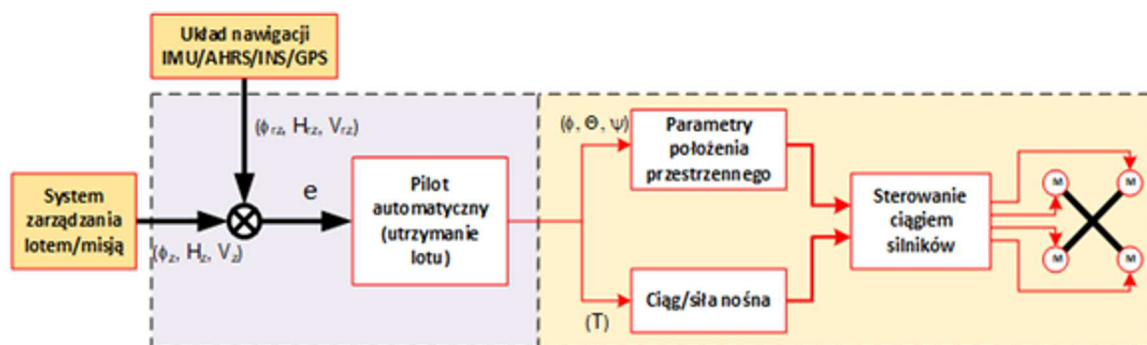
BSP tego typu charakteryzują się strukturalną niestabilnością. Zapewnienie stałej wartości ciągu dla poszczególnych pędników nie gwarantuje utrzymania stabilnego położenia platformy w przestrzeni. Dlatego warunkiem niezbędnym do wykonania stabilnego lotu jest układ zapewniający stabilne położenie przestrzenne BSP (stabilizacja kątów pochylenia i przechylenia). Ponadto konieczne jest również zastosowanie układów odpowiedzialnych za utrzymanie pułapu/wysokości  $H$ , prędkości  $V$  i kierunku lotu/kurs  $\phi$  (rys. 3).



Rys. 3. Poglądowy układ przedstawiający zasadę sterowanie BSP

Doprowadzenie i utrzymanie zadanej wysokości lotu realizuje się przez sterowanie wartością wypadkowego ciągu generowanego przez poszczególne pędniki. Natomiast prędkość BSP sterowana jest przez zmianę jego położenia katowego. Pochylenie/przechylenie BSP powoduje zmianę położenia wypadkowego wektora ciągu. Wraz z pochyleniem platformy zostanie wygenerowana składowa horyzontalna siły ciągu, która powoduje ruch BSP. W układzie platformy wielowirnikowej jest możliwy ruch podłużny i boczny. Jednak są to pojęcia umowne i wiążą się z przyjętymi układami współrzędnych.

Doprowadzenie i utrzymanie zadanego kursu odbywa się „zgrubnie” przez wykonanie obrotu platformy. Obrót ten powodowany jest przez zmianę wartości momentu obrotowego poszczególnych pędników, natomiast „dokładne” korekty wykonywane są przez ruch boczny. Za sterowanie ruchem BSP odpowiada kontroler lotu, który przetwarza informację o uchybie zadanych parametrów ruchu  $e$  i zadaje odpowiednie wartości kątów pochylenia, przechylenia i odchylenia oraz wartości wypadkowego ciągu  $T$  (rys. 4).



Rys. 4. Struktura układu sterowania

BSP oparty na tego typu platformie może wykonywać złożony ruch. W przypadku obiektów tej klasy można sterować wszystkimi sześcioma stopniami swobody. Jak już zaznaczono powyżej,



platforma może wykonać ruch boczny i podłużny. Ze względu na symetrię platformy rozróżnienie ruchu bocznego od podłużnego jest bardzo trudne. Dlatego też, ze względów praktycznych, wskazane jest wprowadzenie umownych kierunków.

#### 4. Badania małego bezzałogowego statku powietrznego

Opracowane konstrukcje poddano badaniom weryfikacyjnym. Ocenie poddano loty i manewry wykonywane w trybie automatycznym. Badany BSP zapewniał automatyzację:

- startu,
- lądowania,
- lotu do punktu,
- wykonania manewru w punkcie.

Wykonanie powyższych manewrów wiąże się z koniecznością stabilizacji:

- wysokości lotu,
- prędkości pionowej,
- prędkości liniowej,
- stabilizacji kierunku/kursu,
- stabilizacji pozycji w punkcie.

Uzyskanie tych parametrów wymaga zapewnienia odpowiednich parametrów:

- położenia kąтового BSP w przestrzeni (kąty pochylenia, przechylenia i odchylenia),
- siły ciągu zespołów napędowych,
- napięcie baterii,
- poboru prądu z baterii.

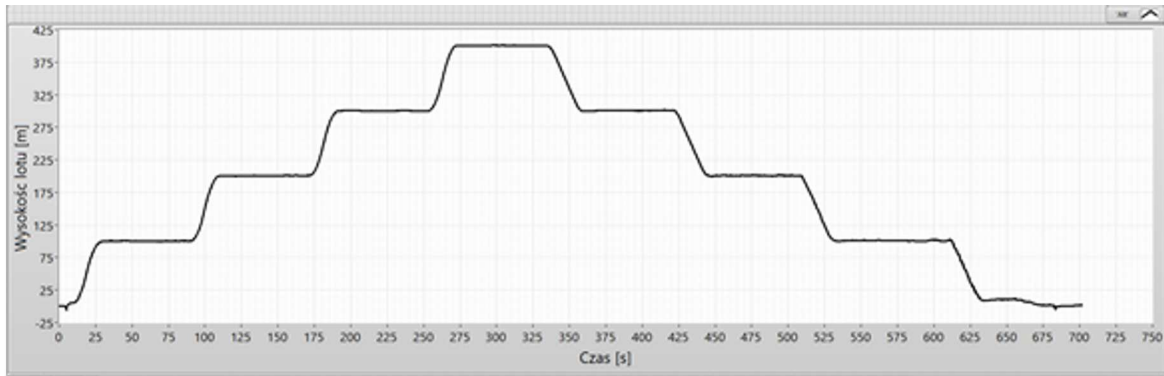
Badania podzielone zostały na dwie fazy. Pierwsza realizowana jest w punkcie przy założeniu, że BSP wykonuje tylko ruch pionowy, natomiast druga wiąże się z wykonywaniem ruchu liniowego. W drugiej fazie badań wprowadzano również zmiany kierunku lotu. Każda faza zawierała elementy ruchu pionowego, z tym że w fazie drugiej był to zakres automatycznego startu i lądowania. Podczas tej fazy nie występowały zmiany wysokości lotu.

Analizy dotyczyły oceny charakterystyk czasowych oraz związku między parametrami ruchu BSP. Poszczególne parametry próbkowane były w częstotliwością 100 Hz, natomiast informacje pozyskiwane z odbiornika GPS z częstotliwością 50 Hz.

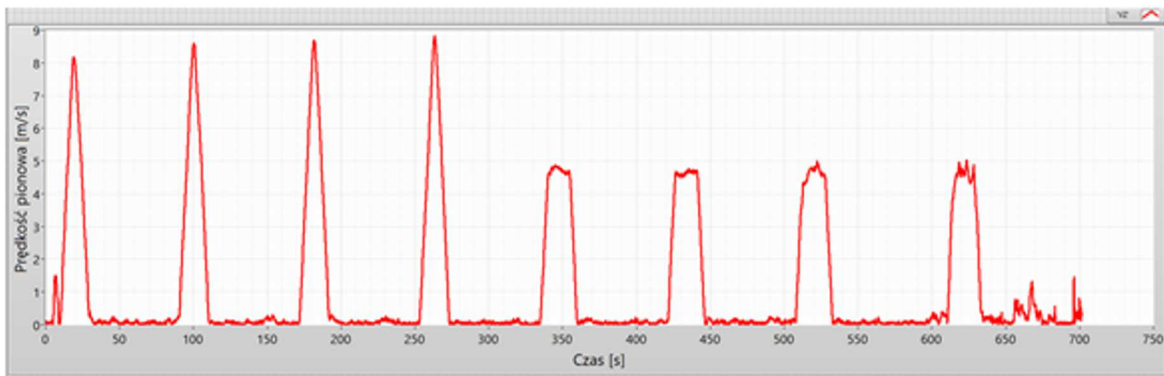
##### 4.1. Badania fazy I – stabilizacji wysokości

Badanie polegało na automatycznym starcie i locie do punktu. Po dotarciu do punktu na wysokości 100 m wykonywany był zawis nad punktem. Po ustabilizowaniu wysokości wykonywany był manewr skokowej zmiany wysokości, tzn. BSP osiąga pułap 200 m, 300 m i 400 m. Po osiągnięciu pułapu 400 m następowało sukcesywne wytracanie wysokości z gradacją co 100 m. BSP zatrzymywał się na tych samych pułapach, a po osiągnięciu 100 m BSP lądował. Proces wznoszenia odbywał się z prędkością pionową 10 m/s, natomiast w zakresie lądowania BSP poruszał się z prędkością pionową 5 m/s. Zmiana wysokości lotu przedstawiona jest na rys. 5. Zmiana prędkości pionowej przedstawiona jest na rys. 6.

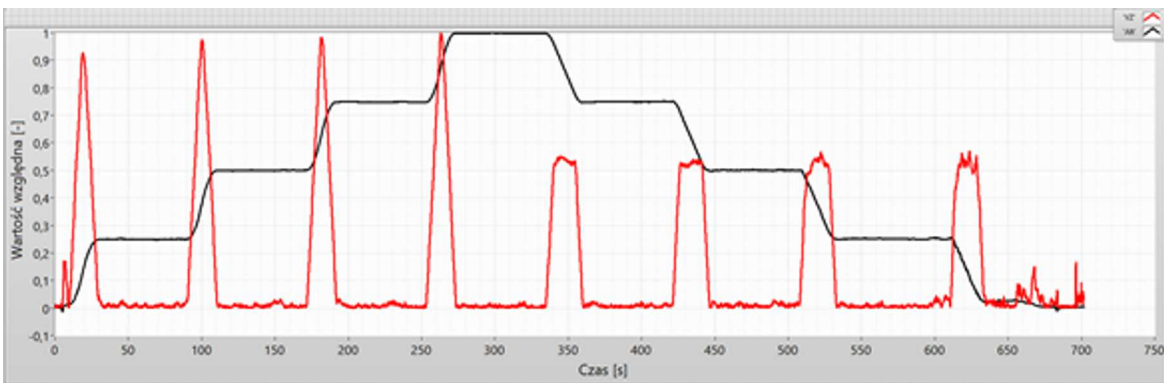
Zmiana wysokości wymaga wykonania ruchu pionowego, co wiąże się z ruchem pionowym platformy (rys. 7). Prędkości pionowa 10 m/s jest na tyle duża, że BSP uzyskuje zadaną wysokość przed uzyskaniem maksymalnej prędkości pionowej (10 m/s). Podczas lądowania zadaną prędkość pionową wynosiła 5 m/s i taką prędkość BSP uzyskiwał podczas lądowania. Można zaobserwować uchyb wartości prędkości, jednak zbyt sztywne ustawienie regulatora prowadziło do silnych przeregulowań (rys. 2).



Rys. 5. Wykres zmian wysokości lotu BSP



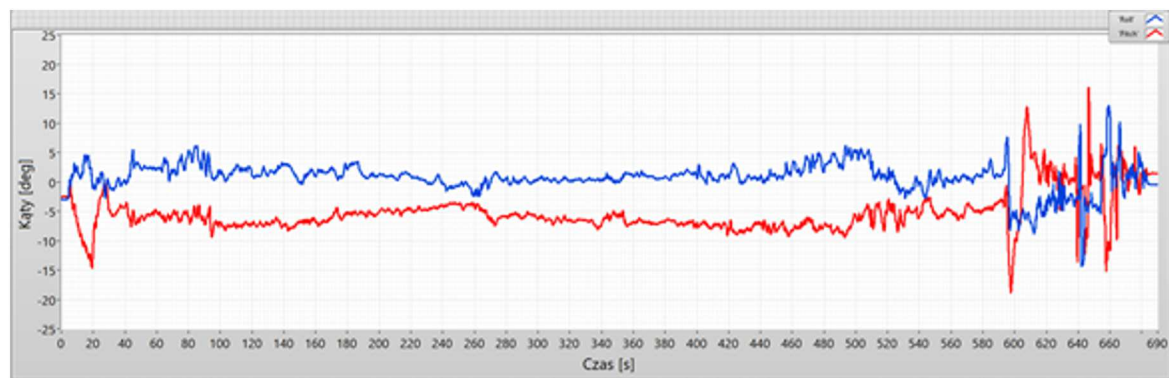
Rys. 6. Wykres zmian prędkości pionowej BSP



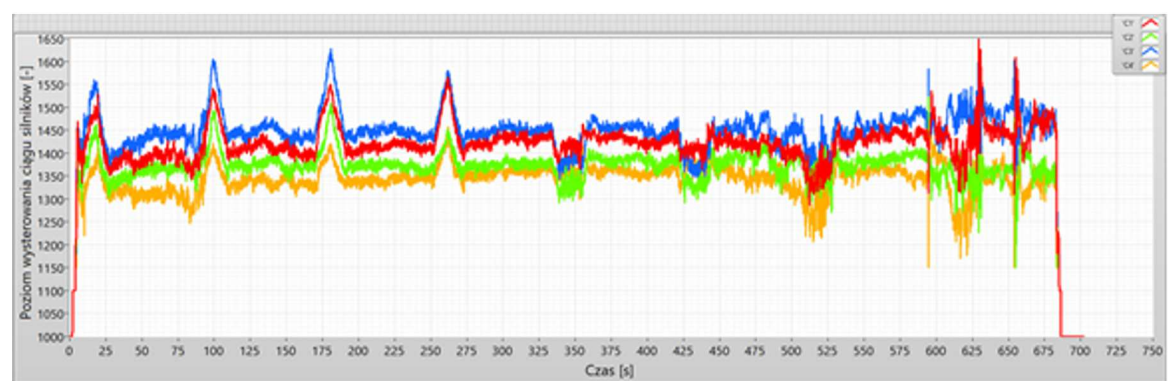
Rys. 7. Wykres porównujący zmiany wysokości lotu i prędkości pionowej w wartościach bezwzględnych

BSP podczas lotu stabilizuje swoją pozycję, utrzymując wartości kątów pochylenia (pitch) i przechylenia (roll). Wartości kątów podczas stabilizacji wysokości i prędkości utrzymują się na stałym poziomie (rys. 8). Pewne wartości składowych stałych (około  $-5^\circ$  dla kąta pitch i  $5^\circ$  dla kąta roll) oznaczają, że BSP do utrzymania swojej pozycji generował składowe siły, które równoważyły oddziaływanie atmosfery.

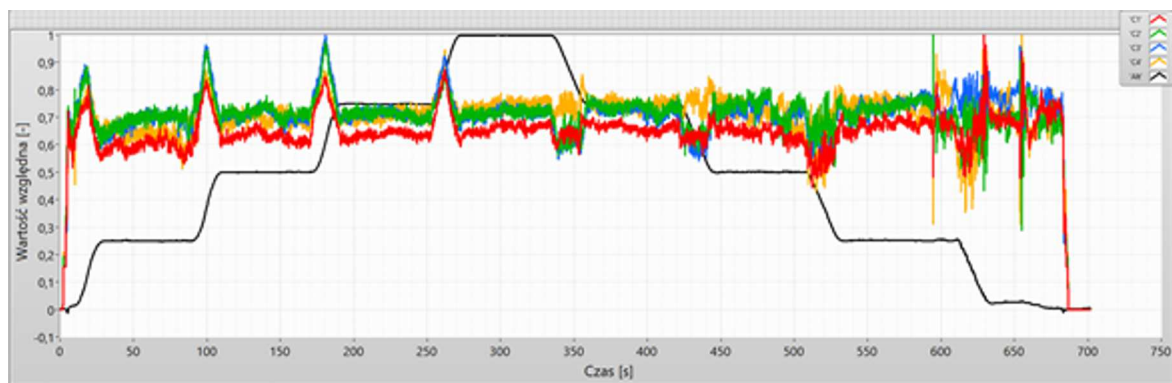
Zmiana wysokości lotu wiąże się ze zmianą wartości siły ciągu generowaną przez poszczególne zespoły napędowe (pędniki). Ciąg zespołów napędowych w stanie zawisu równoważy masę BSP (rys. 9), natomiast przy zmianie wysokości wartość ciągu rośnie (rys. 9). Sumaryczny ciąg silników wielowirnikowego BSP generuje składową siłę odpowiedzialną za równoważenie ciężaru platformy. Ponieważ platforma w stanie ustalonym (zawis) jest nieznacznie pochylona i przechylona (rys. 8), to wartości siły ciągu są rozdzielone między poszczególne pędniki. Zmiana



Rys. 8. Wykres zmian katów pochylenia i przechylenia podczas wykonywania badania



Rys. 9. Wykres zmian poziomuysterowania silników BSP

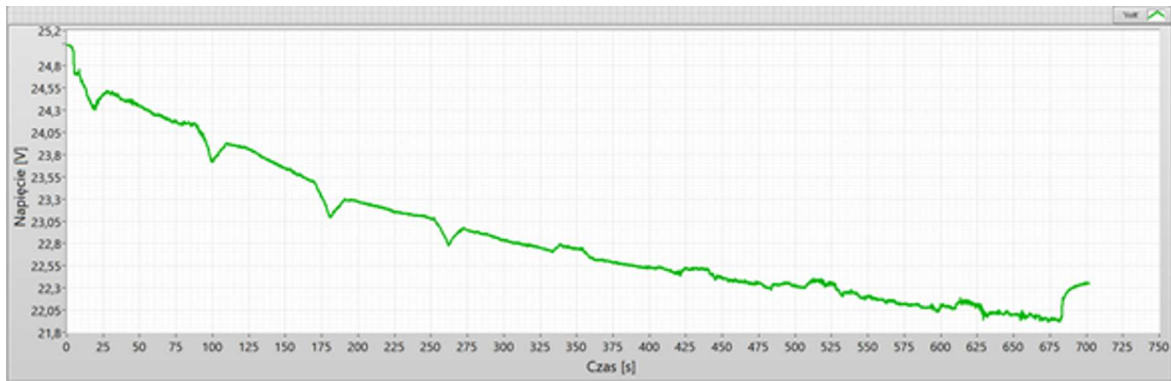


Rys. 10. Wykres zmian poziomuysterowania silnika względem pułapu lotu – wartości względne

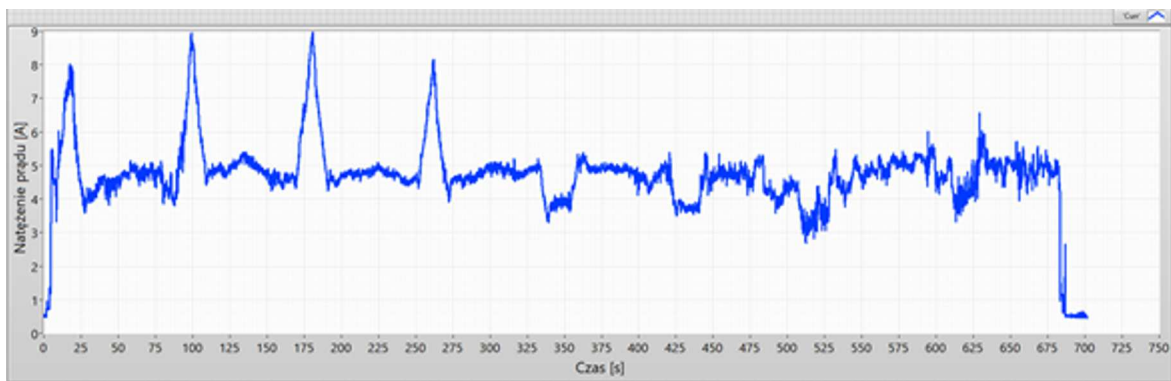
wysokości powoduje zwiększenie energii potencjalnej, dlatego zmiana wysokości powoduje skok siły ciągu (rys. 10). Podobne zjawisko występuje z w zakresie zapotrzebowania na prąd elektryczny pobierany z baterii (rys. 12). Zmian wysokości wiąże się z wzrostem zapotrzebowania na energię, co skutkuje zmianą poboru prądu (rys. 13). Podczas lądowania wartość składowej stałej siły ciągu zmniejsza się a tym samym spada zapotrzebowanie na wartość pobieranego prądu (rys. 10 i rys. 13). Skokowa zmiana natężenia prądu prowadzi do spadków wartości napięcia baterii (rys. 11).

Istotne dla oceny poziomu autonomii jest ocena zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną. Podczas lotu zaobserwowano wzrost natężenie prądu pobieranego z baterii, co można zaobserwować w końcowej fazie lotu. Wartość zarejestrowanego natężenia prądu w zawisie po starcie jest mniejsza o około 0,3 A (rys. 14). Zwiększenie wartości natężenia prądu spowodowane

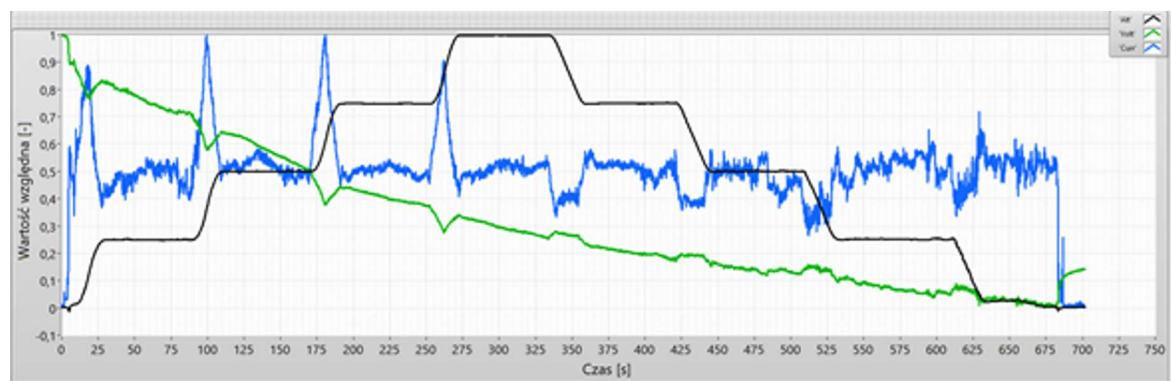




Rys. 11. Wykres zmian napięcia baterii Li-Po



Rys. 12. Wykres zmian wartości prądu pobieranego w czasie lotu BSP

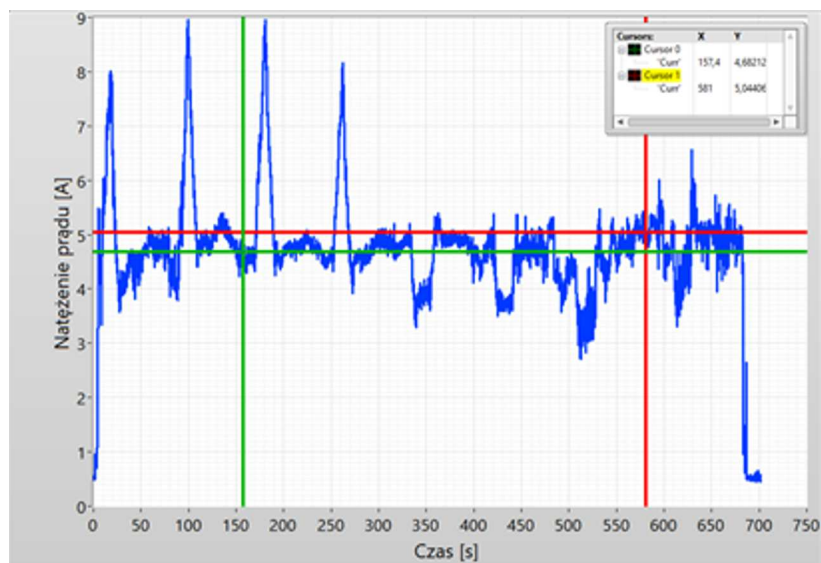


Rys. 13. Wykres porównujący wartości pobieranego prądu i zmianę napięcia baterii względem wysokości lotu – wartości względne

jest rozładowaniem baterii, co wiąże się ze spadkiem napięcia baterii litowo-polimerowej. Analiza zmiany wartości natężenia prądu elektrycznego i stanu napięcia baterii umożliwia ocenę energetyczną BSP, a tym samym ocenę zdolności wykonania zadania przez BSP.

## 5. Badania fazy II – stabilizacji prędkości liniowej

Kolejne badanie polegało na wykonaniu stabilnego lotu do zadanego punktu trasy. W punkcie następuje zmiana kursu na kontrkurs i lot do początku trasy. Lot do punktu był realizowany dla zadanej prędkości. BSP utrzymywał położenie kątowe umożliwiające lot po trasie. Po star-



Rys. 14. Zmiana poziomu natężenia prądu w początkowej i końcowej fazie lotu

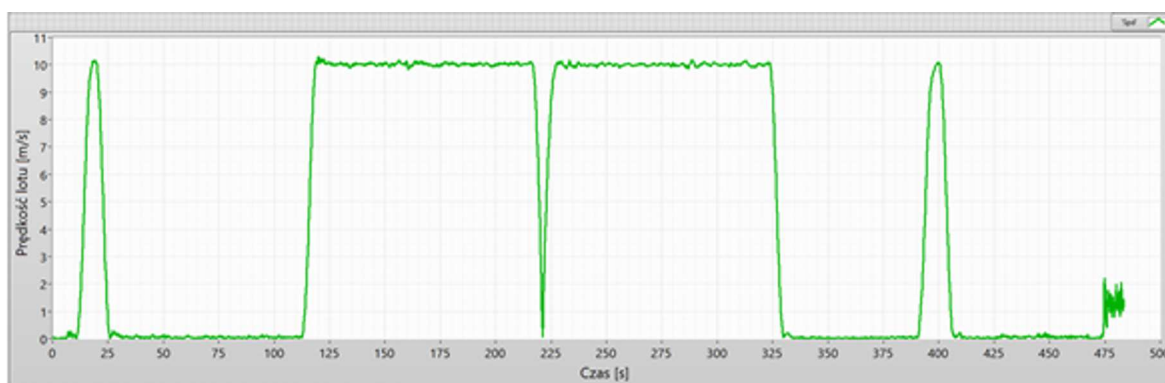
cie platforma wykonuje ruch pionowy na zadaną wysokość i osiąga początkowy punkt trasy. Po wykonaniu lotu BSP powraca do punktu lądowania, wytracając wysokość. Trajektoria lotu przedstawiona jest na rys. 15.



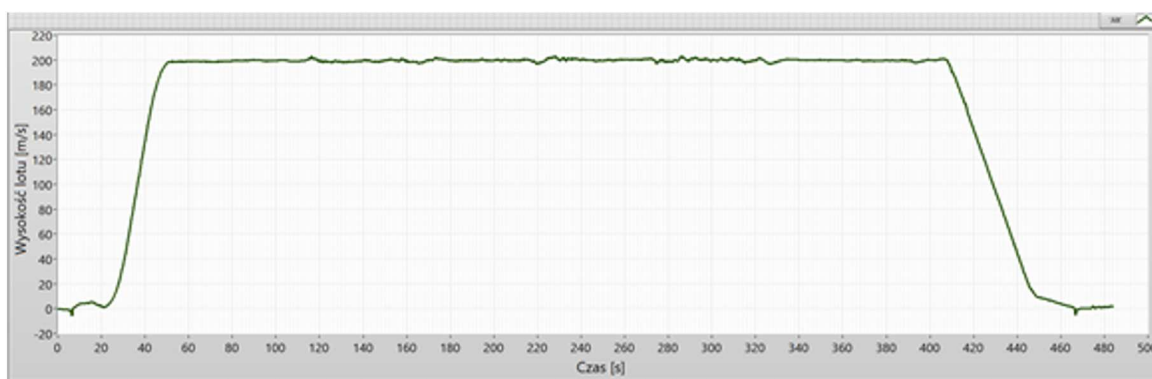
Rys. 15. Trasa lotu – badanie stabilizacji prędkości liniowej

Rysunek 16 przedstawia profil prędkości podczas wykonywania badania. Jak można zauważyć, po starcie BSP nabiera wysokości (zmiana prędkości pionowej – rys. 18 i wysokość lotu – rys. 17). Ponieważ punkt startu nie pokrywa się z punktem początku lotu po trasie, to BSP potrzebuje czasu na dotarcie do punktu początku zadania i osiągnięcie zadanej wysokości lotu. Po

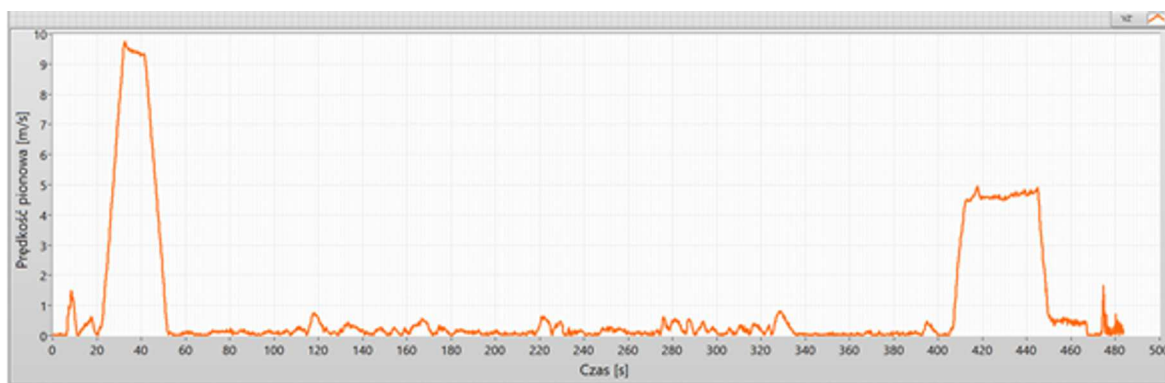
osiągnięciu początku trasy, BSP rozpoczyna lot, stabilizując prędkość na poziomie 10 m/s. Zmianę położenia można prześledzić, obserwując zmianę długości i szerokości geograficznej (rys. 20 i rys. 21). Porównanie parametrów ruchu (położenie BSP i prędkość) przedstawione są na rys. 19.



Rys. 16. Wykres prędkości liniowej BSP podczas wykonania badania

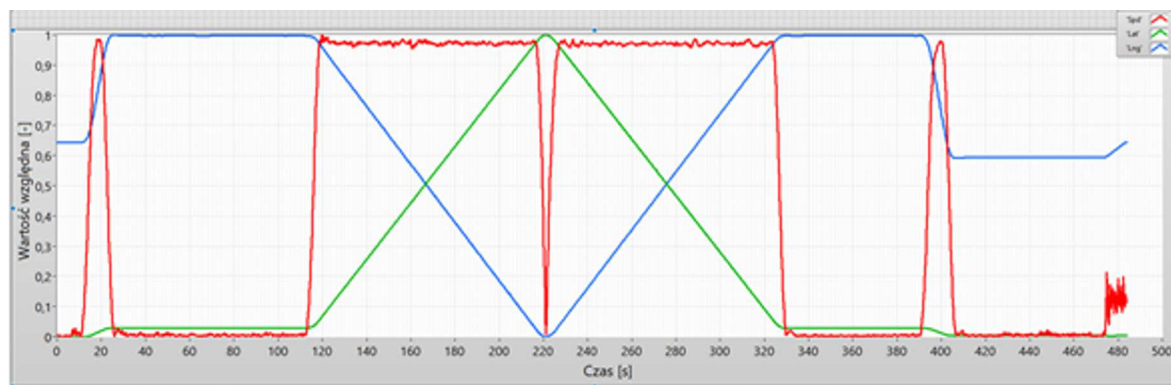


Rys. 17. Profil wysokości lotu BSP

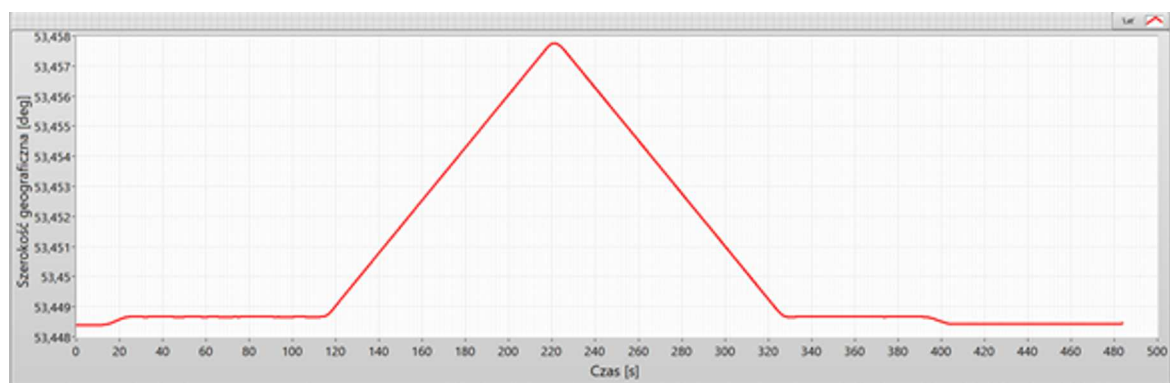


Rys. 18. Wykres zmian prędkości pionowej BSP

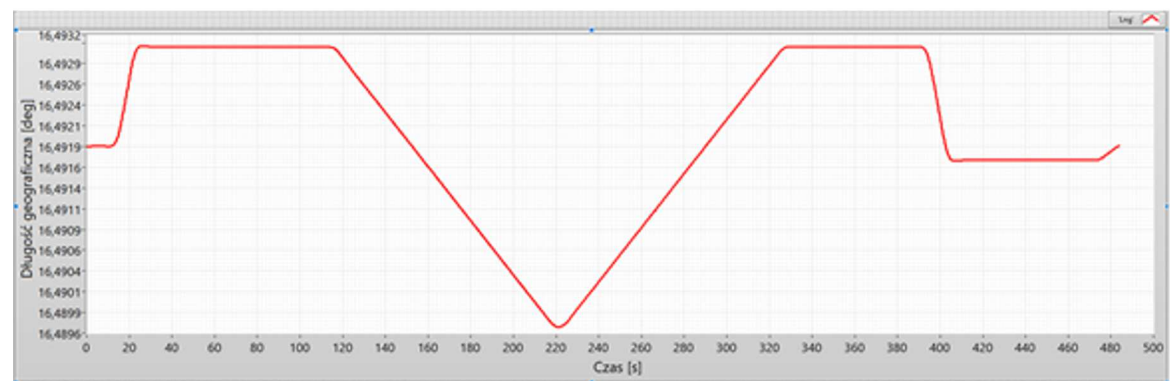
BSP podczas ruchu zmienia swoje położenie kątowe. Uzyskanie prędkości postępowej wymaga zwiększenia wartości kąta pochylenia (rys. 22). W zawisie kąt ten wynosił około  $-5^\circ$  (rys. 8), natomiast podczas lotu osiąga wartości na poziomie  $-15^\circ$  (rys. 22). Dodatkowo platforma zmienia kąt pochylenia na wartości dodatnie, gdy zbliża się do punktu, w którym następuje zatrzymanie BSP. Kąt dodatni umożliwia zahamowanie BSP i wytracenie prędkości do zera. Kąt przechylenia utrzymuje się na stałym poziomie, natomiast po zmianie kursu na kontrkurs kąt przechylenia



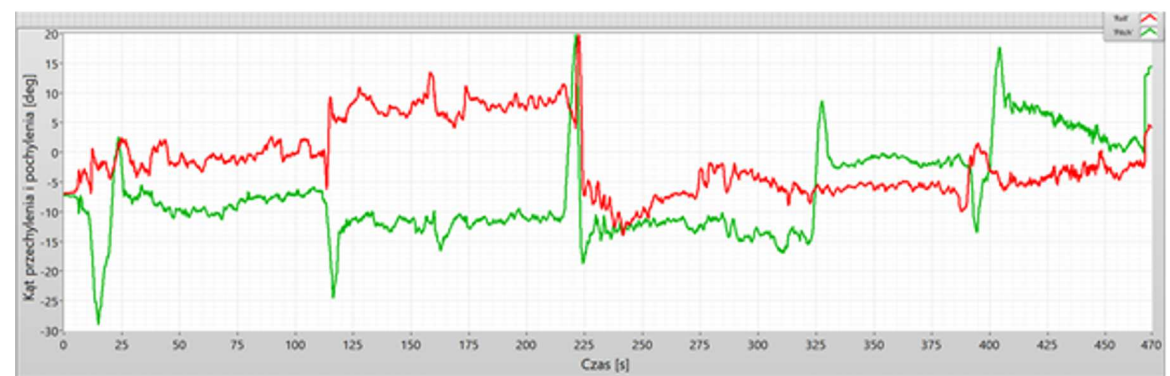
Rys. 19. Porównanie zmiany prędkości lotu i pozycji (długość i szerokość geograficzna) w wartościach względnych



Rys. 20. Wykres zmian położenia BSP – szerokość geograficzna



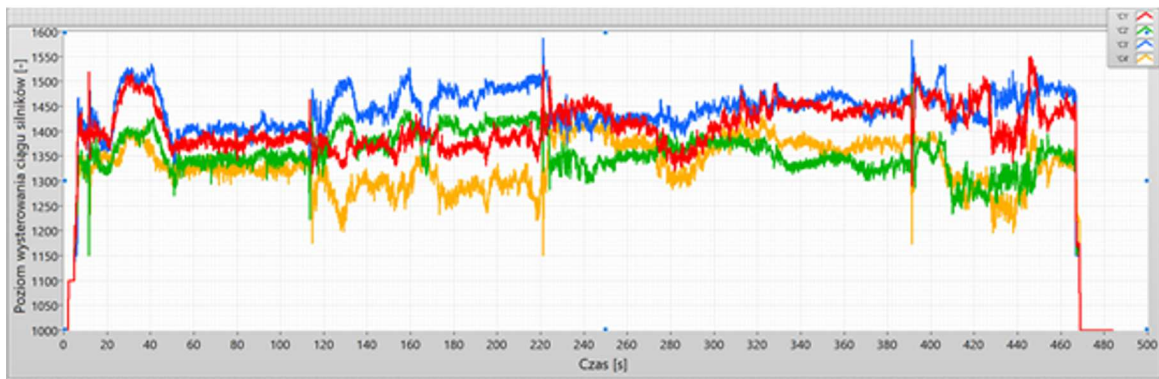
Rys. 21. Wykres zmian położenia BSP – długość geograficzna



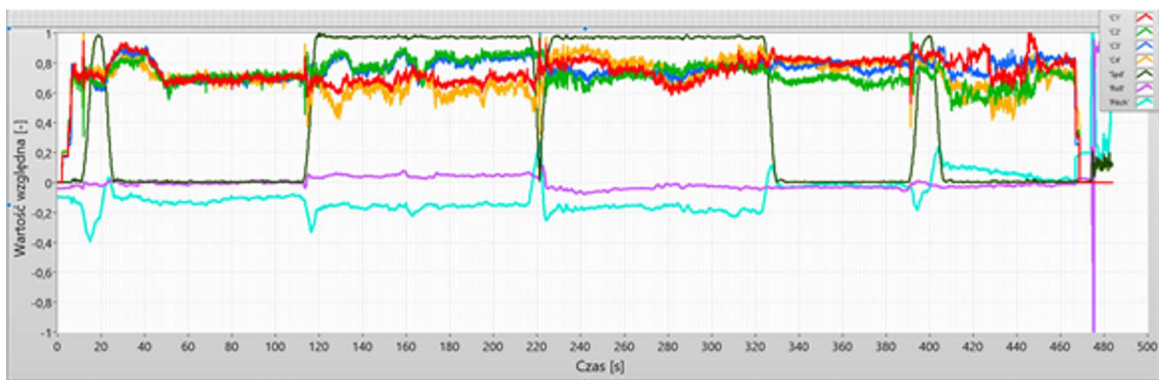
Rys. 22. Wykresy kątów pochylenia (pitch) i przechylenia (roll) BSP podczas lotu



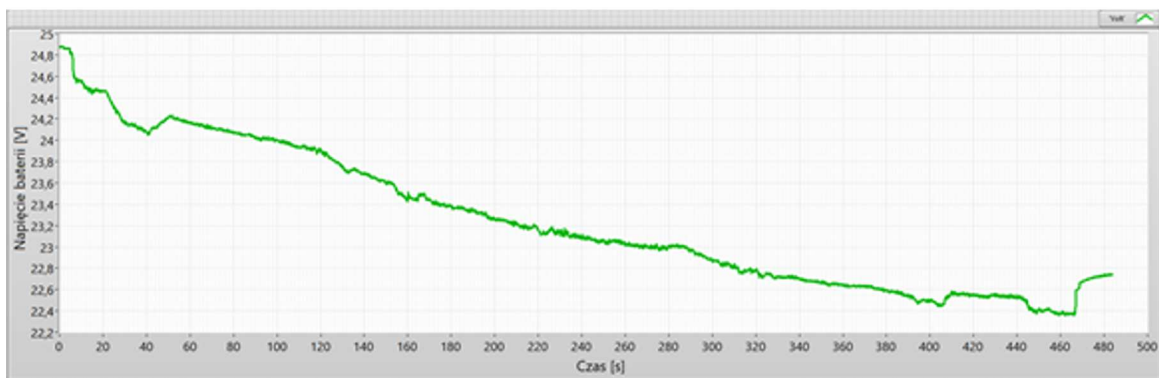
zachowuje wartość, jednak zmienia się z wartości dodatniej na ujemną (rys. 22). Takie ustawienie BSP podyktowane jest utrzymaniem odpowiedniej wartości kierunku ruchu i spowodowane koniecznością kompensacji oddziaływania atmosfery na ruch BSP.



Rys. 23. Wykres przedstawiający poziomysterowania zespołów napędowych BSP



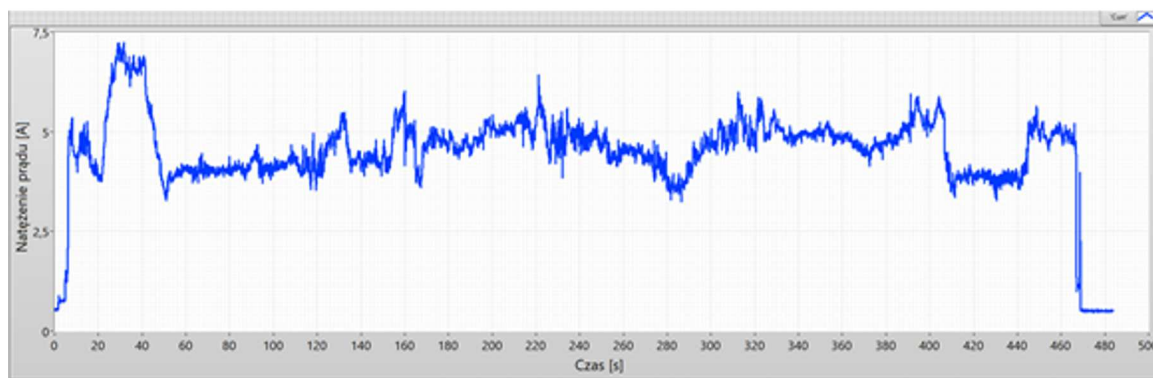
Rys. 24. Wykresy przedstawiające porównanie poziomysterowania zespołów napędowych z profilem prędkości i kątów pochylenia i przechylenia



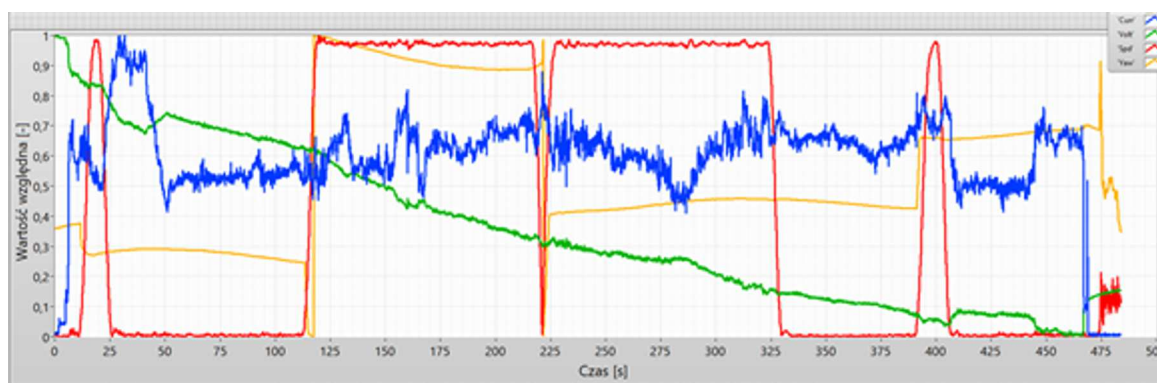
Rys. 25. Wykres zmiany poziomu napięcia baterii

Poziomysterowana zespołów napędowych generuje składowe siły ciągu, które umożliwiają ruch platformy (rys. 23). Rozkład składowych wynika z konieczności utrzymania odpowiedniego położenia BSP w przestrzeni oraz zapewnienia siły ciągu kompensującej opory ruchu (rys. 24). Odzwierciedleniem zmiany wartości siły ciągu jest zużycie prądu (rys. 26). Wartość poboru prądu koniecznego do zapewnienia energii kinetycznej jest znacznie mniejsza niż zapotrzebowanie w zawisie – zerowa wartość prędkości liniowej (rys. 27). Zapotrzebowanie na prąd elektryczny rośnie wraz z rozładowaniem baterii. Spadek napięcia baterii (rys. 25) powoduje zwiększenie po-

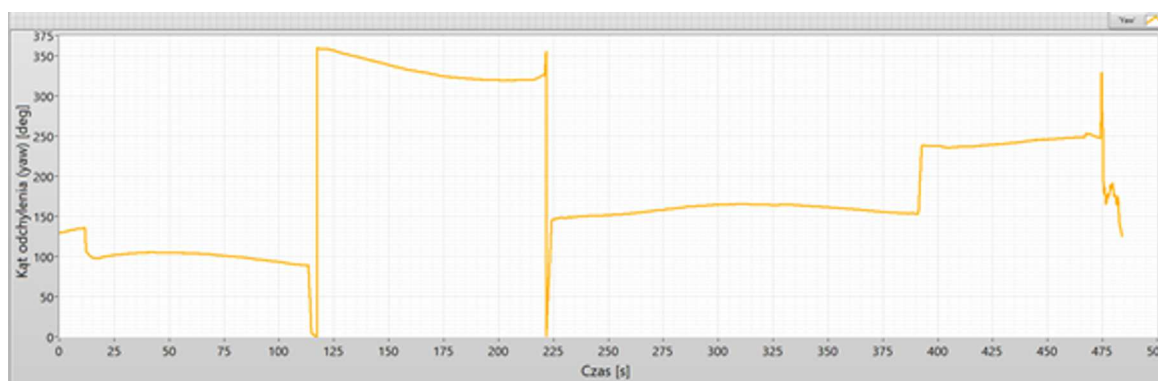
boru prądu, ponieważ musi być zapewnione zapotrzebowanie na wymaganą moc. Takie zjawisko również występowało w poprzednim badaniu. Dodatkowe zużycie prądu występuje, gdy BSP hamuje. Platforma zmienia swoje położenie kątowe (musi się obrócić i uzyskuje kąty pochylenia dodatnie) i zwiększa ciąg (rys. 23, rys. 24, rys. 25 i rys. 26). Dodatkowe zapotrzebowanie pojawia się w punkcie przejścia na kontrkurs. BSP obraca się o  $180^\circ$ , dlatego pojawia się dodatkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną (rys. 27 i rys. 28). Punkt zmiany kierunku lotu można prześledzić na podstawie analizy zmiany kąta odchylenia (kąt yaw – rys. 28).



Rys. 26. Wykres zmian poboru prądu podczas lotu BSP



Rys. 27. Porównanie zmiany napięcia baterii i poboru prądu ze zmianą prędkości i kątem odchylenia



Rys. 28. Wykres zmian kąta odchylenia (yaw)

## 6. Podsumowanie

Przedstawiona w pracy analiza parametrów ruchu wykazuje, że układ sterowania BSP klasy mini jest zdolny do stabilizacji:

- położenia przestrzennego BSP,
- prędkości ruchu liniowego,
- wysokości lotu,
- utrzymania zadanego punktu (współrzędne geograficzne).

Spełnienie powyższych wymagań powinno zapewnić zdolność do realizacji profilu i trajektorii lotu. Na profil i trajektorię składają się takie manewry jak:

- automatyczny start i wznoszenie na zadaną wysokość,
- automatyczna zmiana wysokości w punkcie (wznoszenie lub opadanie),
- automatyczna zmiana kursu w punkcie,
- automatyczny lot do zadanego punktu trasy,
- automatyczne lądowanie w zadanym punkcie,
- automatyczny powrót do zadanego punktu lądowania.

Dodatkowo układ sterowania jest zdolny do monitorowania stanu energetycznego BSP. Przez pomiar poboru wartości prądu i zmianę napięcia można oszacować stan naładowania pakietów baterii. Tym samym układ sterowania jest zdolny do monitorowania poziomu przepływu energii oraz oceny stanu energetycznego.

Zgodnie z przyjętymi poziomami autonomii tak działający system zasługuje na zakwalifikowanie do poziomu 1. Układ jest zdolny do kontrolowania więcej niż jednego parametru ruchu, jednak wymaga ciągłego nadzorowania przez operatora. Dodatkowo możliwości systemu sterowania w zakresie monitorowania i wykrywania przeszkód ograniczają się do obserwacji prowadzonej przez pilota. Jednak działanie takie nie świadczy o działaniu autonomicznym systemu.

Jak wynika z przedstawionej analizy, poziom automatyzacji dla opracowanych małych BSP jest zbyt niski, by zakwalifikować opracowane platformy do wyższego poziomu autonomii.

Zapewnienie odpowiedniego poziomu autonomii wiąże się z opracowaniem zaawansowanych systemów sterowania i nawigacji. Jednak wysoki poziom automatyzacji nie jest w stanie zrealizować oczekiwań w zakresie przejęcia odpowiedzialności podczas wykonywania zadania. Zapewnienie autonomii wiąże się z koniecznością sterowania procesem niezawodności konstrukcji BSP oraz bezpieczeństwa technologicznego. BSP klasy mikro o masie około 1 kg posiada zbyt mało miejsca na umieszczenie dodatkowych układów odpowiedzialnych za monitorowanie i sterowanie poziomem bezpieczeństwa i niezawodności BSP. Dlatego niezbędne jest poszukiwanie nowych metod zarządzania strukturą BSP w celu podwyższenia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych.

W Zakładzie Awioniki WAT prowadzone są prace badawcze związane z podwyższeniem poziomu autonomii BSP. Badania te mają na celu konstruowanie układów sterowania, które mają na celu zwiększenie poziomu automatyzacji bezzałogowych statków powietrznych w celu uzyskania wyższych poziomów autonomii. Dodatkowo opracowywane są procedury umożliwiające ocenę poziomów autonomii. Opracowanie mechanizmów oceny poziomu autonomii powinno wpłynąć na metodykę certyfikacji i spowodować zmiany legislacyjne. Bez wprowadzenia w przestrzeń powietrzną nieklasyfikowaną BSP o poziomie autonomii 4 nie można mówić o bezpiecznym eksploataowaniu mobilnych robotów latających.

## Bibliografia

1. ALSADIK B., Francesco Nex "The rise in UAV inspections for civil infrastructure", *GIM International*, June 2021

2. XU C., LIAO X., TAN J., YE H., LU H., Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude, *Open Access Journal*, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2987622, 2022
3. VIMALKUMAR R, KARAN KUMAR SHAW, Design and development of heavy drone for fire fighting operation, *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, **9**, 6, 2020
4. <https://ulc.gov.pl/pl/drony>
5. <https://dronelife.com/2019/03/11/droneii-tech-talk-unraveling-5-levels-of-drone-autonomy/>

### **Evaluation of flight parameters of unmanned aerial vehicles**

The results of verification tests developed at the Department of Avionics of the Military University of Technology of micro-class unmanned aerial vehicles were presented in the article. The developed aircrafts have weight of about 1 kg and are intended for use by security and rescue services. Since small UAVs can operate over a cluster of people and urban infrastructure, they must be characterized by increased levels of autonomy. The assessment of degree of automation which determines the level of UAV autonomy is presented in the paper.