

przegląd[®] komunikacyjny

2-3
2022
rocznik LXXVII
cena 35,00 zł
w tym 8% VAT



UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU



Bezzałogowe statki powietrzne

eISSN
2544-6037

ISSN
0033-22-32

Regulacje dotyczące SBSP w aspekcie bezpieczeństwa lotnictwa bezzałogowego. Rozwój koncepcji bezzałogowego holownika szybowców i dronów towarowych o napędzie elektrycznym. Zastosowanie metody pozycjonowania SBAS/EGNOS do wyznaczenia współrzędnych BSP. Kontrola stanu technicznego rusztowań budowlanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie. Wykorzystanie drona w identyfikacji uszkodzeń nawierzchni. Wykorzystanie dronów w inspekcjach morskich farm wiatrowych OFFSHORE. Perspektywy rozwoju i wykorzystania Bezzałogowych Systemów Latających

Podstawowe informacje dla Autorów artykułów

„Przegląd Komunikacyjny” publikuje artykuły związane z szeroko rozumianym transportem oraz infrastrukturą transportu. Obejmuje to zagadnienia techniczne, ekonomiczne i prawne. Akceptowane są także materiały związane z geografią, historią i socjologią transportu.

Artykuły publikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym” dzieli się na: „wnoszące wkład naukowy w dyscypliny: inżynieria lądowa i transport; ekonomia i finanse; nauki prawne; nauki socjologiczne. Prosimy Autorów o deklarację (w zgłoszeniu), do której dyscypliny zaliczyć ich prace.

Materiały do publikacji: zgłoszenie, artykuł oraz oświadczenie Autora, należy przysyłać w formie elektronicznej na adres redakcji:

artykuly@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.pl

W zgłoszeniu należy podać: imię i nazwisko autora, adres mailowy oraz adres do tradycyjnej korespondencji, miejsce zatrudnienia, zdjęcie, tytuł artykułu oraz streszczenie (po polsku i po angielsku) i słowa kluczowe (po polsku i po angielsku). Szczegóły przygotowania materiałów oraz wzory załączników dostępne są na stronie:

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

W celu usprawnienia i przyspieszenia procesu publikacji prosimy o zastosowanie się do poniższych wymagań dotyczących nadsyłanego materiału:

1. Tekst artykułu powinien być napisany w jednym z ogólnodostępnych programów (np. Microsoft Word). Wzory i opisy wzorów powinny być wkomponowane w tekst. Tabele należy zestawić po zakończeniu tekstu. Ilustracje (rysunki, fotografie, wykresy) najlepiej dołączyć jako oddzielne pliki. Można je także wstawić do pliku z tekstem po zakończeniu tekstu. Możliwe jest oznaczenie miejsc w tekście, w których autor sugeruje wstawienie stosownej ilustracji lub tabeli. Obowiązuje odrębna numeracja ilustracji (bez rozróżniania na rysunki, fotografie itp.) oraz tabel.
2. Całość materiału nie powinna przekraczać 12 stron w formacie Word (zalecane jest 8 stron). Do limitu stron wlicza się ilustracje załączane w odrębnych plikach (przy założeniu że 1 ilustracja = ½ strony).
3. Format tekstu powinien być jak najprostszy (nie stosować zróżnicowanych stylów, wcięć, podwójnych i wielokrotnych spacji itp.). Dopuszczalne jest pogrubienie, podkreślenie i oznaczenie kursywą istotnych części tekstu, a także indeksy górne i dolne. **Nie stosować przypisów.**
4. Nawiązania do pozycji zewnętrznych - cytaty (dotyczy również podpisów ilustracji i tabel) oznacza się numeracją w nawiasach kwadratowych [...]. Numerację należy zestawić na końcu artykułu (jako „Materiały źródłowe”). Zestawienie powinno być ułożone alfabetycznie.
5. Jeżeli Autor wykorzystuje materiały objęte nie swoim prawem autorskim, powinien uzyskać pisemną zgodę właściciela tych praw do publikacji (niezależnie od podania źródła). Kopie takiej zgody należy przesyłać Redakcji.

Artykuły wnoszące wkład naukowy w dyscypliny: inżynieria lądowa i transport, inżynieria lądowa i transport; ekonomia i finanse; nauki prawne; nauki socjologiczne podlegają procedurom recenzji merytorycznych zgodnie z wytycznymi MNIŚW, co pozwala zaliczyć je, po opublikowaniu, do dorobku naukowego oraz uwzględnić w ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392).

Liczba uwzględnianych punktów wg listy czasopism punktowanych przez MNIŚW wynosi 20.

Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki. Zasady kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i ewentualny formularz recenzencki są podane do publicznej wiadomości na stronie internetowej czasopisma lub w każdym numerze czasopisma. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji/numerów nie są ujawniane.

Przygotowany materiał powinien obrazować własny wkład badawczy autora. Redakcja wdrożyła procedurę zapobiegania zjawisku Ghostwriting (z „ghostwriting” mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji). Tekst i ilustracje muszą być oryginalne i niepublikowane w innych miejscach (w tym w internecie). Możliwe jest zamieszczanie artykułów, które ukazały się w materiałach konferencyjnych i podobnych (na prawach rękopisu) z zaznaczeniem tego faktu i po przystosowaniu do wymogów publikacyjnych „Przeglądu Komunikacyjnego”.

Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów wraz ze streszczeniami w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016) jako OPEN ACCESS. Pod koniec 2018 roku „Przegląd Komunikacyjny” rozpoczął indeksowanie artykułów angielskich z użyciem numerów cyfrowych DOI. Czasopismo ubiega się o partycypowanie w bazie SCOPUS. Rejestrowane jest w międzynarodowej bazie DOAJ <https://doaj.org/>.

Redakcja pisma oferuje objęcie patronatem medialnym konferencji, debat, seminariów itp.

Ceny są negocjowane indywidualnie w zależności od zakresu zlecenia. Możliwe są atrakcyjne upusty. Patronat obejmuje:

- ogłaszanie przedmiotowych inicjatyw na łamach pisma,
- zamieszczanie wybranych referatów / wystąpień po dostosowaniu ich do wymogów redakcyjnych,
- publikację informacji końcowych (podsumowania, apele, wnioski),
- kolportaż powyższych informacji do wskazanych adresatów.

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

Ramowa oferta dla „Sponsora strategicznego” czasopisma Przegląd Komunikacyjny

Sponsor strategiczny zawiera umowę z wydawcą czasopisma na okres roku kalendarzowego z możliwością przedłużenia na kolejne lata. Uprawnienia wydawcy do zawierania umów posiada Spółka Wydawnictwa SITK RP sp. z o.o..

Przegląd Komunikacyjny oferuje dla sponsora strategicznego następujące świadczenia:

- zamieszczenie logo sponsora w każdym numerze,
- zamieszczenie reklamy sponsora w jednym, kilku lub we wszystkich numerach,
- publikacja jednego lub kilku artykułów sponsorowanych,
- publikacja innych materiałów dotyczących sponsora,
- zniżki przy zamówieniu prenumeraty czasopisma.

Możliwe jest także zamieszczenie materiałów od sponsora na stronie internetowej czasopisma.

Przegląd Komunikacyjny ukazuje się jako miesięcznik.

Szczegółowy zakres świadczeń oraz detale techniczne (formaty, sposób i terminy przekazania) są uzgadniane indywidualnie.

Osoba kontaktowa w tej sprawie:

Hanna Szary

hanna.szary@sitkrp.org.pl

ul. Świętokrzyska 14 A, lok. 150, 00-050 Warszawa, tel.: (22) 336 12 06, 506 116 966

Cena za świadczenia na rzecz sponsora uzależniana jest od uzgodnionych szczegółów współpracy. Zapłata może być dokonana jednorazowo lub w kilku ratach (na przykład kwartalnych). Część zapłaty może być w formie zamówienia określonej liczby prenumerat czasopisma.





Na okładce: Dron Aquila firmy UAVS Poland Sp. z o.o.
Źródło: <http://polskiprzemysl.com.pl/>

Szanowni P.T. Czytelnicy

W numerze

Przekazujemy kolejny numer Przeglądu Komunikacyjnego jest on poświęcony wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych. W pierwszym artykule przedstawiono w zarysie dotychczasowe doświadczenia oddziaływania regulacji w lotnictwie załogowym oraz omówiono aktualne regulacje w lotnictwie bezzałogowym, zarządzanie bezpieczeństwem i ryzykiem zagrożeń. Dynamiczny rozwój lotnictwa bezzałogowego wymusił określenie zasad wykonywania operacji lotniczych SBSP. Regulacje dotyczące SBSP ustalają zasady użytkowania statków bezzałogowych i porządkują sposób ich funkcjonowania w integracji z lotnictwem załogowym. Nadrzędnym celem wprowadzanych regulacji i przepisów jest zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. W drugim artykule przedstawiono kilka wybranych propozycji zastosowań BSP rozwijanych w Polsce. Przedstawiono opis projektu bezzałogowego holownika, nowego rozwiązania technicznego, zgłoszonego do urzędu patentowego w grudniu 2017 roku i rozwijanego do chwili obecnej. Proponowany system holu składa się z uniwersalnej stacji naziemnej kontroli lotów bezzałogowców, BSP-holownika i dodatkowego systemu sterowania umieszczonego na obiekcie holowanym. Proponowane rozwiązanie ma na celu zmniejszenie kosztów eksploatacji oraz poprawę osiągnięć statków powietrznych o napędzie elektrycznym. W trzecim artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wyznaczenia pozycji BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) z użyciem metody pozycjonowania SBAS (Satellite Based Augmentation System) dla systemu wspomagania EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). W eksperymencie wykorzystano jednoczesnościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS, który rejestrował obserwacje satelitarne GPS (Global Positioning System) oraz poprawki EGNOS. Lot testowy wykonano w 2020 r. w okolicach Warszawy. W następnym artykule przedstawiono możliwość wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych na potrzeby przeprowadzenia kontroli stanu technicznego rusztowania budowlanego o powierzchni ok. 1 500 m². Rusztowanie usytuowane było na terenie budowy budynku wielorodzinnego. W wyniku przeprowadzonego nalotu BSP uzyskano szereg cennych informacji, które następnie zostały poddane szczegółowej analizie w celu zidentyfikowania newralgicznych elementów konstrukcji rusztowań, które stwarzały zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy. W kolejnym artykule przedstawiono wykorzystanie BSP w budownictwie, m.in. w: inspekcjach budowlanych, ocenie zniszczeń (szkód, uszkodzeń), pomiarach terenu (inwentaryzacje, mapowanie terenu), inspekcjach stanu bezpieczeństwa, monitorowaniu postępów prac, konserwacji budynków, a także badaniach termowizyjnych. Inny artykuł opisuje sposób identyfikacji uszkodzeń nawierzchni dużego obszaru placu z wykorzystaniem drona. Dzięki tej metodzie możliwe było lepsze i szybsze zobrazowanie i zróznicowanie różnych defektów nawierzchni co ostatecznie pozwoliło lepiej określić przyczyny i genezę tych uszkodzeń. W kolejnym artykule przedstawiono potencjał dronów w procesie inspekcji farm wiatrowych. Wskazano również na potencjał bezzałogowych platform pływających w ramach współpracy z BSP w procesie dokonywania inspekcji morskich farm wiatrowych. W ostatnim artykule zaprezentowano informacje dotyczące użycia bojowych platform latających oraz kierunki rozwoju i wykorzystania cywilnych i bojowych systemów powietrznych w zadaniach na rzecz gospodarki narodowej i przyszłych konfliktach zbrojnych.

Redaktor Naczelny
Prof. Antoni Szydło

Regulacje dotyczące SBSP w aspekcie bezpieczeństwa lotnictwa bezzałogowego Wiktor Wyszywacz	2
Rozwój koncepcji bezzałogowego holownika szybowców i dronów towarowych o napędzie elektrycznym Henryk Jaferniki, Tomasz Muszyński, Łukasz Puzio	10
Zastosowanie metody pozycjonowania SBAS/EGNOS do wyznaczenia współrzędnych BSP Henryk Jaferniki, Kamil Krasuski, Damian Wierzbicki	16
Kontrola stanu technicznego rusztowań budowlanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych Tomasz Nowobilski, Mariusz Szóstak	22
Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie Mariusz Szóstak, Tomasz Nowobilski	26
Wykorzystanie drona w identyfikacji uszkodzeń nawierzchni Piotr Mackiewicz, Eryk Mączka	32
Wykorzystanie dronów w inspekcjach morskich farm wiatrowych OFFSHORE Hanna Dzido	40
Perspektywy rozwoju i wykorzystania Bezzałogowych Systemów Latających Leszek Cwojdzinski	46

Wydawca:

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników
Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej
00-043 Warszawa, ul. Czackiego 3/5
www.sitkorp.org.pl

Redaktor Naczelny:

Antoni Szydło

Redakcja:

Maciej Kruszyna (Z-ca Redaktora Naczelnego),
Agnieszka Kuniczuk - Trzciniowicz (Redaktor językowy),
Piotr Mackiewicz (Sekretarz), Wojciech Puła (Redaktor
statystyczny), Eryk Mączka (obsługa techniczna, strona
internetowa), Krzysztof Gasz, Jarosław Kuźniowski, Łukasz
Skotnicki, Bartłomiej Krawczyk, Igor Gisterek, Karina
Korycka (obsługa anglojęzyczna)

Adres redakcji do korespondencji:

Poczta elektroniczna:
redakcja@przeglاد.komunikacyjny.pwr.wroc.pl
Poczta „tradycyjna”:
Piotr Mackiewicz, Maciej Kruszyna
Politechnika Wrocławska,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Faks: 71 320 45 39

Rada naukowa:

Marek Ciesielski (Poznań), Antanas Klibavičius (Wilno),
Jozef Komačka (Žilina), Elżbieta Marciszewska (Warszawa),
Andrzej S. Nowak (Auburn University), Tomasz Nowakowski (Wrocław),
Victor V. Rybkin (Dniepropetrovsk), Marek Sitarz (Katowice),
Wiesław Starowicz (Kraków), Hans-Christoph Thiel (Cottbus),
Tomasz Siwowski (Rzeszów), Jiri Straský (Brno), Andrea Zuzulova (Bratysława)

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma

Główną wersją czasopisma jest wersja elektroniczna.
Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne
wersje artykułów wraz ze streszczeniami w języku polskim
(od 2010) i angielskim (od 2016).

Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania zmian w
materiałach nie podlegających recenzji.

Artykuły opublikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym”
są dostępne w bazach danych 20 bibliotek technicznych
oraz są indeksowane w bazach:

BAZTECH: <http://baztech.icm.edu.pl>
Index Copernicus: <http://indexcopernicus.com>
Międzynarodowa baza DOAJ: <https://doaj.org/>

Prenumerata:

Szczegóły i formularz zamówienia na stronie:

<http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl>

Obecna Redakcja dysponuje numerami archiwalnymi
począwszy od 4/2010.

Numer archiwalne z lat 2004-2009 można zamawiać
w Oddziale krakowskim SITK, ul. Siostrzana 11, 30-804 Kra-
ków, tel./faks 12 658 93 74, mrowinska@sitk.org.pl

Druk:

HARDY Design, 52-131 Wrocław, ul. Buforowa 34a
Przemysław Wołczuk, przem@dodo.pl

Reklama:

Dział Marketingu: hanna.szary@sitkorp.org.pl

Nakład: 800 egz.

Regulacje dotyczące SBSP w aspekcie bezpieczeństwa lotnictwa bezzałogowego

UAS Regulations in The Aspect of Unmanned Aviation Safety



Wiktor Wyszywacz

Dr inż.

Członek Zarządu Aeroklubu
Polskiego

600316413@wp.pl

Streszczenie: Dynamiczny rozwój lotnictwa bezzałogowego wymusił określenie zasad wykonywania operacji lotniczych SBSP. Regulacje dotyczące SBSP ustalają zasady użytkowania statków bezzałogowych i porządkują sposób ich funkcjonowania w integracji z lotnictwem załogowym. Nadrzędnym celem wprowadzanych regulacji i przepisów jest zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Regulacje powinny uwzględniać zarówno aktualne potrzeby rozwojowe branży jak i wyraźnie sprecyzowane cele w zakresie bezpieczeństwa. Wszystkim interesariuszom związanym z lotnictwem zależy na tym, aby pomimo współużytkowania części przestrzeni powietrznej przez oba rodzaje lotnictwa, nie pogorszyć społecznego uznania wysokiego poziomu bezpieczeństwa transportu lotniczego. Wprowadzane regulacje rzutowały bezpośrednio na bezpieczeństwo operacji w lotnictwie załogowym jak i bezzałogowym. Przedstawiono w zarysie dotychczasowe doświadczenia oddziaływania regulacji w lotnictwie załogowym oraz omówiono aktualne regulacje w lotnictwie bezzałogowym, zarządzanie bezpieczeństwem i ryzykiem zagrożeń. Omówiono znaczenie poddziału operacji bezzałogowych na VLOS i BVLOS oraz na kategorie otwartą, szczególną i certyfikowaną. W obu rodzajach lotnictwa jednym z najbardziej znaczących czynników mających wpływ na poziom bezpieczeństwa jest czynnik ludzki (HF – human factor). Dlatego uwzględniono udział i znaczenie HF jako istotnego składnika istniejących i wdrażanych regulacji. Odniesiono się do aktualnie wprowadzanych zmian na poziomie krajowym i europejskim. W podsumowaniu przedstawiono wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: SBSP; Bezpieczeństwo; Zagrożenia; Ryzyko; Regulacje; Zarządzanie bezpieczeństwem; SORA

Abstract: The dynamic development of unmanned aviation forced the definition of the rules for performing UAS flight operations. The UAS regulations set the rules for the use of unmanned aerial vehicles and organize their functioning in integration with manned aviation. The paramount goal of the introduced regulations and provisions is to ensure an appropriate level of safety. Regulations should take into account both the current development needs of the industry and clearly defined safety objectives. It is important to all aviation stakeholders that, despite the shared use of a part of the airspace by both types of aviation, public recognition of the high level of aviation safety has not deteriorated. The introduced regulations had a direct impact on the safety of operations in both manned and unmanned aviation. The current experience of the impact of regulations in manned aviation is outlined and the current regulations in unmanned aviation, as well as safety and risk management, are discussed. The importance of the VLOS and BVLOS unmanned operations as well as the open, special and certified categories were discussed. In both types of aviation, one of the most significant factors influencing the level of safety is the human factor (HF). Therefore, the participation and importance of HF as an important component of the existing and implemented regulations was taken into account. Reference was made to the changes currently introduced at the national and European levels. The final conclusions are presented in the summary

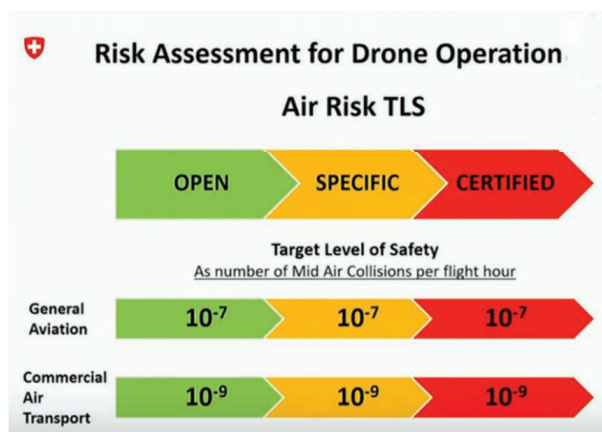
Keywords: UAS; Safety; Threats; Risk; Regulations; Safety management; SORA

Wprowadzenie

Rozwój lotnictwa bezzałogowego początkowo stymulowały techniki i technologie wojskowe, ale obecnie SBSP mają szerokie zastosowania cywilno - użytkowe i rekreacyjne. Systemy bezzałogowe znalazły zastosowanie niemal we wszystkich

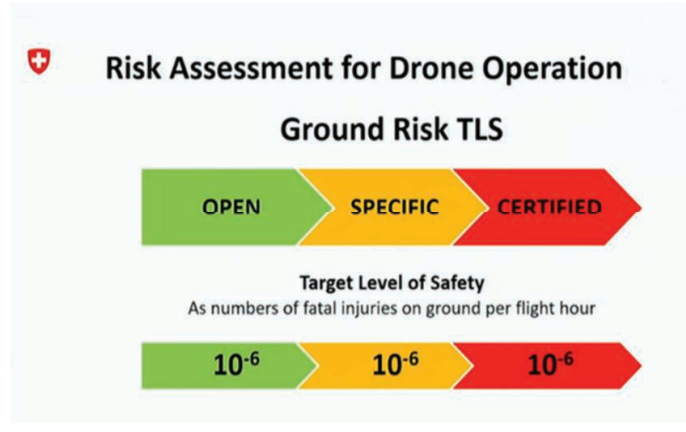
sektorach gospodarki, w nauce, rekreacji oraz w wielu dziedzinach działalności człowieka. Obserwowany rozwój systemów BSP umożliwia zaawansowana elektronika, inteligentne systemy informatyczne, techniki i technologie satelitarne i szereg innych. Zastosowania militarne koncentrują się głównie

na efektywności realizacji postawionych zadań. W zastosowaniach cywilnych najistotniejszym elementem składowym jest zapewnienie założonego poziomu bezpieczeństwa (TLS -Target Level of Safety) przy możliwie wysokiej skuteczności i niskich nakładach finansowych. Dla wszystkich interesariuszy lotnictwa



1. Porównanie TLS dla ryzyka w powietrzu

Źródło: Methodology for the Specific Ops Risk Assessment (SORA) by JARUS - UAS Workshop 2018



2. Porównanie TLS dla ryzyka na ziemi

Źródło: Methodology for the Specific Ops Risk Assessment (SORA) by JARUS - UAS Workshop 2018

załogowego, w tym rządów, istotne jest bezpieczeństwo operacji wykonywanych przez statki bezzałogowe. Poziom bezpieczeństwa lotów SBSP nie może odbiegać istotnie od poziomu lotnictwa załogowego. Przez przeszło sto lat zostało wypracowane wysokie zaufanie do transportu lotniczego. Założenia i porównanie poziomu bezpieczeństwa lotów SBSP z lotnictwem załogowym przedstawiają rysunki 1 i 2 [1].

Integracja przy prowadzeniu operacji lotniczych pomiędzy bezzałogowymi i załogowymi statkami powietrznymi jest koniecznością wynikającą ze względu na wspólne użytkowanie części przestrzeni powietrznej. Jest to głównie przestrzeń do wysokości 150m AGL (VLL). Dla uzyskania integracji lotnictwa załogowego i bezzałogowego wprowadzane są odpowiednie regulacje, szczególnie dla lotów SBSP, które mają na celu zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa lotniczego.

Bezpieczeństwo w lotnictwie

Budowanie systemu bezpieczeństwa w lotnictwie opiera się na zarządzaniu ryzykiem i właściwie przeprowadzonej analizie ryzyka. Dlatego międzynarodowe organy lotnicze wprowadzają stosowne regulacje dotyczące możliwie pełnego

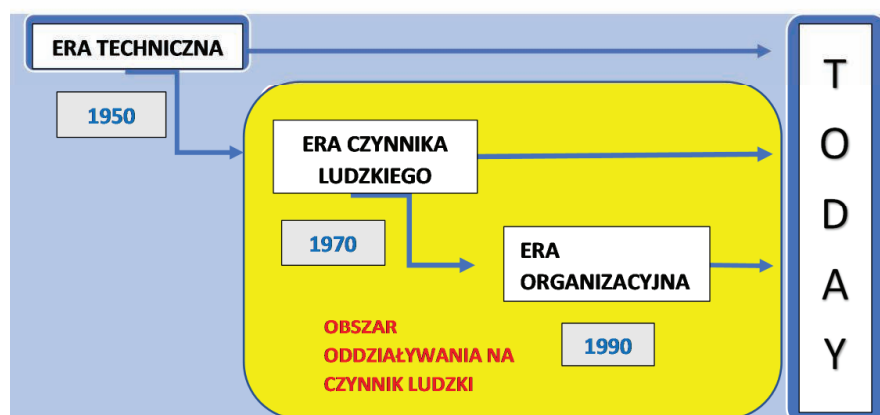
zakresu problematyki bezpieczeństwa. W lotach załogowych przepisy podążały za rozwojem lotnictwa i często stanowiły reakcję na tragiczne zdarzenia. Głównym czynnikiem rzutującym na poziom bezpieczeństwa jest czynnik ludzki (HF), który odpowiada za przeważającą część wypadków lotniczych. Ustanawiane regulacje nie zawsze biorą pod uwagę w dostatecznym stopniu znaczenie HF. Jest to wyraźnie widoczne w 118 letniej historii lotnictwa. Ewolucja regulacji w lotnictwie dotycząca bezpieczeństwa zawiera kilka etapów przedstawionych na rysunku 3.

W badaniach naukowych z upływem czasu i zdobywaniem coraz większych doświadczeń zmieniały się także koncepcje przyczynowości wypadków lotniczych, sposobów zapobiegania im i zarządzania ryzykiem. Jednym ze znamienych przy-

kładów jest model prof. J. Reasona znany pod nazwą „sera szwajcarskiego”, który z powodzeniem może być stosowany jako uzasadniony sposób postrzegania problemów w procesie tworzenia regulacji w zakresie bezpieczeństwa lotów bezzałogowych.

Zmieniane przepisy lotnicze stawały się coraz bardziej skuteczne w podnoszeniu poziomu bezpieczeństwa ze względu na bogatą bazę danych dotyczącą zdarzeń z przeszłości. W odniesieniu do SBSP baza danych jest bardzo uboga. Stąd ustalanie zasad dotyczących bezpieczeństwa, zawartych w regulacjach dla SBSP, wymaga stosowania metod proaktywnych i predyktywnych.

Analiza różnych koncepcji, teorii i modeli służących do rozwiązywania problemów związanych z bezpieczeństwem lotniczym i za-



3. Ewolucja regulacji w lotnictwie dotycząca bezpieczeństwa

Źródło: opracowanie własne

rzządzania ryzykiem zagrożeń (5M, SHALL, HFACS, Practical Drift i inne) potwierdza stwierdzenie, że HF znajduje się w centrum zagadnień bezpieczeństwa. Modele uwzględniają co prawda elementy otoczenia, w którym pracuje pilot, ale uzależniają jego działania, w tym błędy, od relacji z otoczeniem. Teoria profesora Jamesa Reasona sytuuje błędy i naruszenia człowieka jako jeden z elementów łańcucha bezpieczeństwa, podkreślając jednocześnie, że popełnione przez niego błędy są zaliczane do aktywnych, które skutkują natychmiastowymi konsekwencjami. Niemniej jednak pozostałe bariery teorii Reasona, także dotyczą ludzi znajdujących się w środowisku, otoczeniu pilota. Stanowią je elementy począwszy do organizacji i zarządzania aż po szkolenie czy przepisy dotyczące wykonywania operacji.

Regulacje dotyczące SBSP – świat, Europa, Polska

Organizacje międzynarodowe, europejskie i narodowe władze lotnicze wprowadzają odpowiednie regulacje starając się podnieść poziom bezpieczeństwa użytkownika SBSP. ICAO w okólniku nr 328 z 2011 roku [8] omawia SBSP jako nowy kompo-

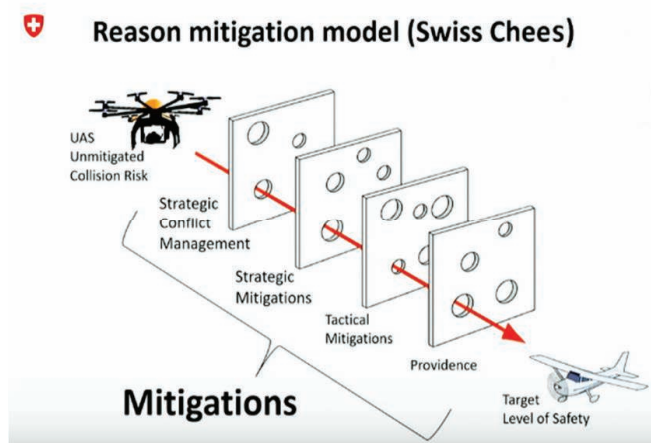
nent w funkcjonowaniu systemu lotniczego w przestrzeni niesegregowanej. Filarami okólnika są operacje, sprzęt, personel. Punkt 2.7 okólnika ocenia, iż BSP nie będą przewozić pasażerów zarobkowo (może w odległej przyszłości), co w porównaniu z rzeczywistością wykazuje błąd założenia. Okólnik zawiera dwie koncepcje. Jeden koncept odnosi się do kontrolowania bezpieczeństwem przez Krajowe Plany Bezpieczeństwa (SSP - State Safety Programme), drugi do systemu zarządzania bezpieczeństwem (SMS - Safety Management System) [10], przy czym odpowiedzialność za SMS przypisana jest operatorom lotniczym. Obecnie na forum międzynarodowym ICAO wprowadza do swoich załączników uzupełnienia dotyczące SBSP np. załączniki 13 i 19 czy też w Globalnym Planie Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym GASP [9] (Global Aviation Safety Plan) ICAO Doc 10004 na lata 2020 – 2022.

Państwa Unii Europejskiej, które są jednocześnie członkami ICAO, powołały Europejską Agencję Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA), aby ujednolicić w ramach wspólnoty

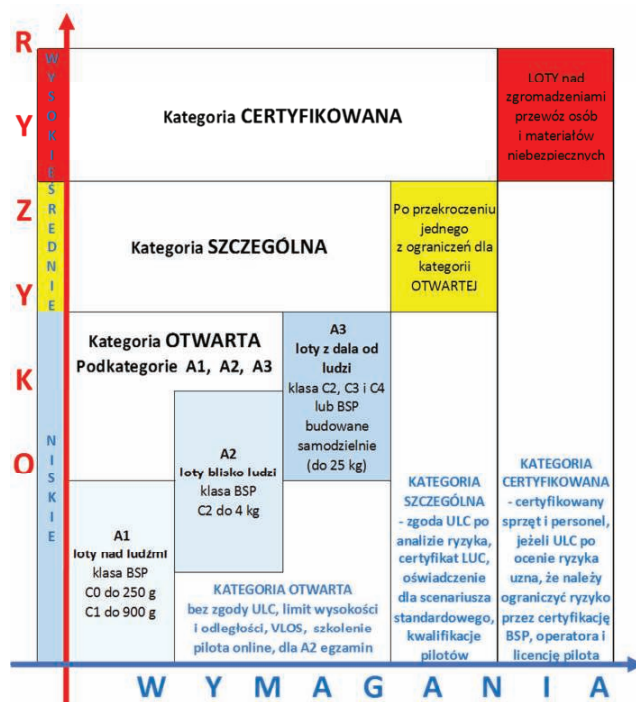
przepisy i osiągnąć wysoki poziom bezpieczeństwa operacji lotniczych. EASA opracowała Europejski Program bezpieczeństwa Lotniczego (EASP - European Aviation Safety Programme), który jest odpowiednikiem Załącznika 19 ICAO. EASA sporządziła także europejską mapę drogową na rzecz bezpiecznej integracji SBSP we wszystkich klasach przestrzeni powietrznej [17], przyjmując loty w zasięgu wzroku VLOS i poza zasięgiem wzroku BVLOS oraz trzy kategorie operacji pod względem wielkości ryzyka:

1. otwarta (open) - niskie ryzyko;
2. szczególna (specific) – średnie ryzyko;
3. certyfikowane (certified) – wysokie ryzyko.

EASA ustaliła również wytyczne dla producentów i użytkowników, dotyczące wymogów dla sprzętu do 25kg. SBSP są podzielone na pięć klas od C0 do C4 (Class 0 - Class 4) oraz dodatkowo ustalono klasę C5 i C6 dla STS. Bezzałogowe systemy powietrzne przeznaczone są do eksploatacji zgodnie z zasadami i wa-



4. Model J. Reasona łagodzenia ryzyka kolizji w powietrzu dla SBSP
Źródło: Methodology for the Specific Ops Risk Assessment (SORA) by JARUS - UAS Workshop 2018[12]



5. Schemat podziału na kategorie operacji i klasy SBSP
Źródło: opracowanie własne

runkami mającymi zastosowanie do operacji w ramach kategorii otwartej i STS. Podział operacji na VLOS i BVLOS determinuje poziom ryzyka. Stąd kategoria otwarta, w której dopuszczono wyłącznie operacje VLOS, jest obciążona niskim ryzykiem, ze względu na ciągłe pozostawanie BSP w zasięgu wzroku pilota, który dostrzega zagrożenia i unika kolizji w powietrzu. W kategorii operacji szczególnej BSP pozostaje poza zasięgiem wzrokowym pilota – BVLOS, zwiększony jest dystans pomiędzy RPS a BSP i pilot wspomaga się urządzeniami typu DAA mając obraz z kamery BSP i ewentualną pomoc obserwatorów.

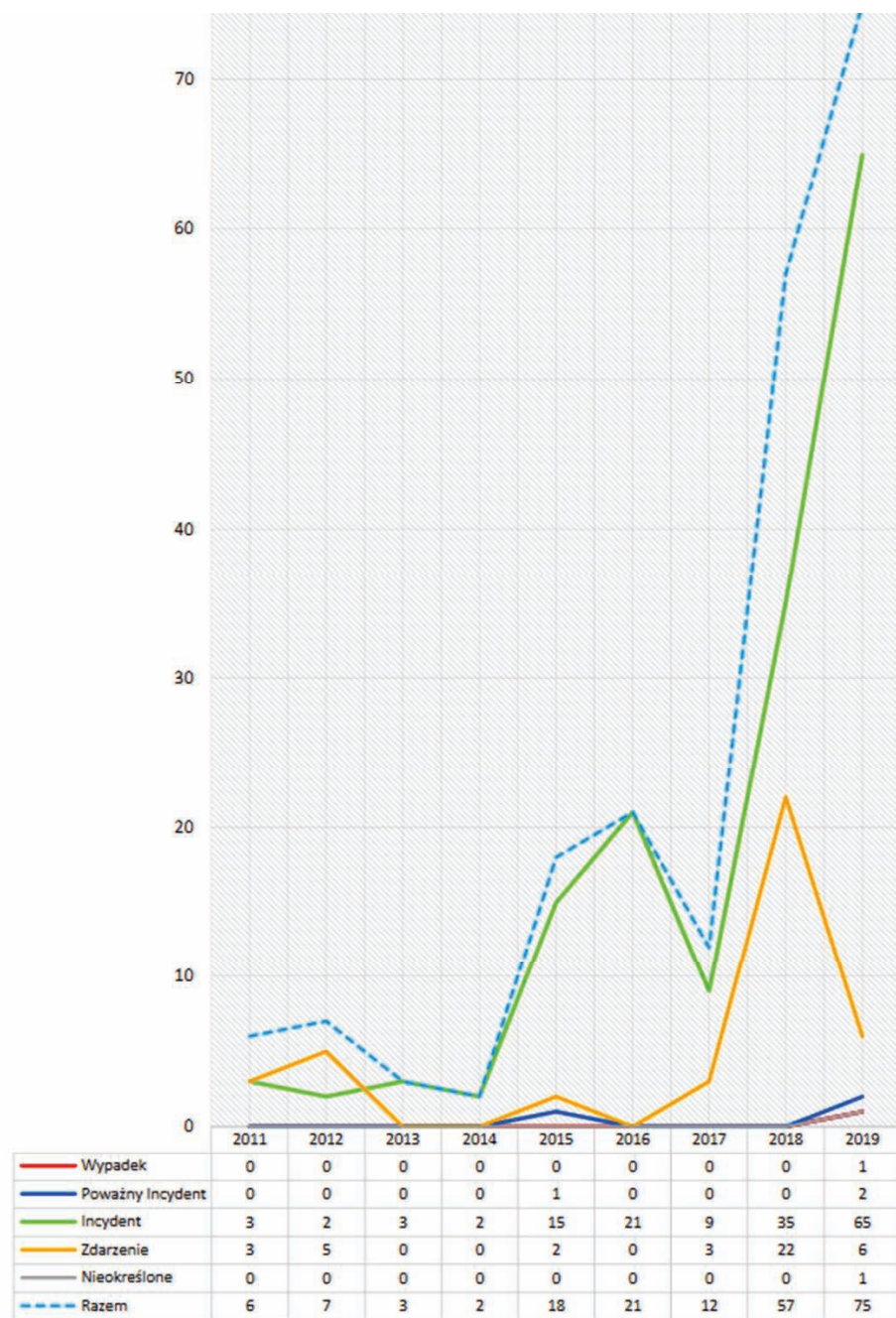
Rozporządzenia Komisji (UE) dotyczące powyższych unormowań to:

- Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. (nowelizacja rozporządzenie 2020/1058) w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich; [15]
- Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych; [16]

Schemat podziału na kategorie operacji i klasy SBSP przedstawia rys. 5. Istotnym dopełnieniem regulacji EASA jest opracowana przez JARUS analiza ryzyka dla operacji szczególnych [6]. Organizacja JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems) to wspólne organy odpowiedzialne za tworzenie przepisów dotyczących systemów bezzałogowych), skupia światowych ekspertów z 61 krajów, EASA i EUROCONTROL, przedstawiciele narodowych władz lotniczych, przemysłu czy linii lotniczych.

Dokument przedłożony przez organizację JARUS pod nazwą „SORA v2.0” (Specific Operations Risk Assessment) [11] dla systemów bezzałogowych prezentuje model zarządzania ryzykiem operacji UAS dla operatorów jak i władz lotniczych. SORA ma być rozwiązaniem na brak możliwości zastosowania do SBSP tradycyjnych metod zarządzania ryzykiem. Opracowanie dotyczy kategorii szczególnej lotów SBSP. Model zakłada określenie zagrożenia łącznie z sugestią stosowanych ogólnych przeciwdziałań w taki sposób, aby osiągnąć granice bezpiecznego

wykonania operacji. Uwzględnia zagrożenia lotów BVLOS i możliwych błędów pilota. SORA koncentruje się na ustalaniu przesłanek, które w celach bezpieczeństwa mają tworzyć ramy, ograniczenia dla podmiotów lotniczych. Natomiast w mniejszym stopniu skupia się na problemach zarządzania ryzykiem zagrożeń na poziomie operacyjnym. Regulacje dotyczące sprzętu, operatorów, pilotów czy zasad operacji nie uwzględniają bezpieczeństwa lotów SBSP kompleksowo w aspekcie zarządzania przestrzenią powietrzną. W 2007 roku został powołany SESAR Joint



6. Operacje bezzałogowych statków powietrznych. Źródło: ULC

Undertaking (SESAR - Single European Sky ATM - Air Traffic Management - Research, Europejski system zarządzania ruchem lotniczym) jako wspólne przedsięwzięcie publiczno-prywatne, którego członkami założycielami są UE i Eurocontrol oraz wiele instytucji sektora lotniczego (w tym PAŻP). Dokument SESAR JU - European ATM Master Plan: „Roadmap for the safe integration of drones into all classes of airspace” porusza problematykę zarządzania ryzykiem na wysokim poziomie ogólności definiując ryzyko, konsekwencje i działania łagodzące. W ramach programu realizowana jest koncepcja dotycząca bezpieczeństwa lotów SBSP „U-space”. Jako taka „U-space” jest modelem stworzonym w celu ułatwienia wykonywania każdego rodzaju operacji SBSP w każdej klasie przestrzeni i rodzaju środowiska, nawet najbardziej zatłoczonym, jako połączenie SBSP z lotnictwem załogowym i ATC.

Do 2021 roku loty SBSP w regulacjach polskich, traktowane były odrębnie na zasadzie wyłączenia z zapisów dotyczących lotnictwa załogowego. Od początku 2021 roku zaczęły obowiązywać rozporządzenia unijne 2019/945 i 2019/947. Zmieniają one znacząco podejście do SBSP i zagadnienia bezpieczeństwa uznając, że loty bezzałogowe to część wspólnej działalności lotniczej wraz z lotami załogowymi. Aktualne przepisy krajowe to wytyczne prezesa ULC nr 24 [3] i nr 7 [2] oraz wytyczne o numerach od 15 do 23 [4] zawierające dziewięć scenariuszy NSTS. Polskie prawo lotnicze jest w trakcie nowelizacji. Przewidywane w projekcie zmiany ustawy z dnia 3 lipca 2002 r. – Prawo lotnicze (Dz. U. z 2020 r. poz. 1970, z późn. zm.), zwanej dalej „ustawą – Prawo lotnicze” oraz niektórych innych ustaw, mają na celu zapewnienie stosowania nowych przepisów Unii Europejskiej dotyczących bezzałogowych stat-

ków powietrznych oraz systemów bezzałogowych statków powietrznych [14].

Najważniejszą zmianą zaproponowaną w projekcie jest wprowadzenie do ustawy Prawo lotnicze nowego działu dedykowanego bezzałogowym statkom powietrznym. Projektowany dział VIa „Bezzałogowe statki powietrzne” ustawy został podzielony na 6 rozdziałów regulujących: wykonywanie operacji z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych, strefy geograficzne dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, rejestr operatorów systemów bezzałogowych statków powietrznych, wyznaczone podmioty i uznane podmioty, dokumenty potwierdzające kwalifi-

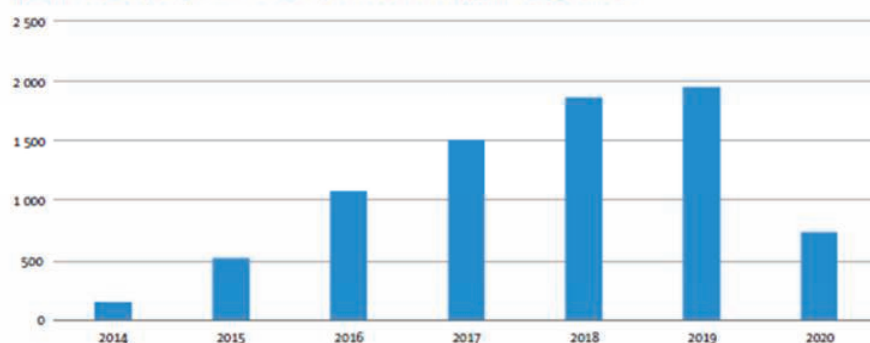
kacje, szkolenia i egzaminy oraz zapobieganie bezprawnemu użyciu bezzałogowych statków powietrznych. Do ustawy Prawo lotnicze mają zostać wydane rozporządzenie określające warunki dla operacji w kategorii otwartej i szczególnej oraz rozporządzenie dotyczące stref geograficznych.

Najistotniejsze zmiany w prawie lotniczym mające wpływ na problematykę bezpieczeństwa dotyczą wielu zagadnień. W projekcie założono, że przepisy regulujące zasady wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych na użytek cywilny będą co do zasady stosowane również w przypadku wykonywania operacji przez podmioty, których



151
Drone Incident Management at Aerodromes

Figure A: Reported UAS occurrences between 2014 and 2020
(Source: EASA query from the European Central Repository, ECCAIRS).⁸



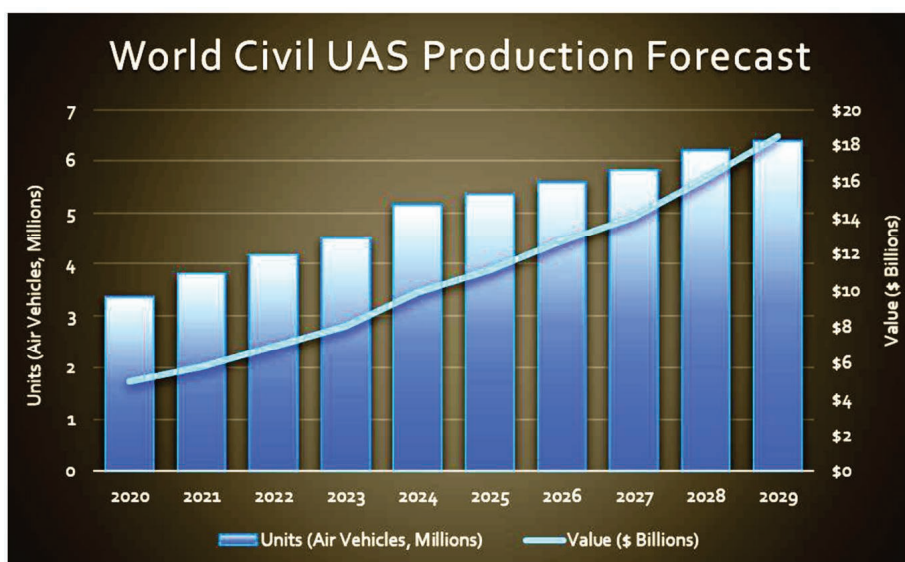
7. Odnotowane zdarzenia bezzałogowych statków powietrznych w latach 2014-2020
Źródło: EASA

Unmanned Aerial Vehicles Market - Growth Rate by Region (2021 - 2026)



Source: Mordor Intelligence

8. Tempo wzrostu rynku SBSP na świecie według regionów
Źródło: Mordor Intelligence



9. Prognozy wzrostu rynku SBSP na świecie
Źródło: Teal Group

ustawowym zadaniem są wszelkiego rodzaju usługi wykonywane w interesie publicznym. Uzasadnieniem takiego stanowiska ustawodawcy jest, aby zasady wykonywania operacji przy użyciu SBSP oraz poziom kwalifikacji osób je wykonujących na rzecz służb państwowych, były takie same jak dla wszystkich użytkowników przestrzeni powietrznej. Istotnym elementem jest rejestracja operatorów jako i certyfikowanych SBSP. Odpowiedzialność za zadania właściwego organu (art. 18 rozporządzenie 2019/947) została przydzielona odpowiednio ULC i PAŻP. Agencja między innymi ma zapewnić utrzymanie, prowadzenie i rozwój systemu teleinformatycznego wykorzystywanego do realizacji usług związanych z wykonywaniem przez Agencję zadań. Zmiany w prawie lotniczym mają umożliwić kontrolowanie nie tylko członków personelu lotniczego, ale także osób przeprowadzających, szkolenia i egzaminy teoretyczne oraz szkolenia praktyczne i ocenę umiejętności praktycznych. Dla NSTSów przyjęto rozwiązanie, zgodnie z którym potwierdzenie odbioru i kompletności oświadczeń będzie przekazywane do operatorów systemów bezzałogowych statków powietrznych bez

konieczności wydawania decyzji administracyjnych. Członkowie klubów lub stowarzyszeń modelarstwa lotniczego będą mogli wykonywać operacje w kategorii „szczególnej” po uzyskaniu od Prezesa ULC zezwolenia. Polisa OC będzie obowiązkowa dla SBSP o MTOM powyżej 250g. Poza przepisami karnymi ustawy i zawartymi tam sankcjami, w załączniku nr 5c do ustawy zaproponowano długą listę relatywnie wysokich kar pieniężnych za niedopilnowanie formalności ze strony pilotów i operatorów.

Bezpieczeństwo a rozwój branży

Rozwijająca się branża bezzałogowa wymusza powstawanie nowych i modyfikacje istniejących regulacji oraz działań w celu uzyskania założonego poziomu bezpieczeństwa wraz z możliwie małymi ograniczeniami dla jej rozwoju. Decydującym wskaźnikiem o poziomie bezpieczeństwa są wypadki i incydenty lotnicze z udziałem SBSP. Dane dotyczące zdarzeń z udziałem SBSP w Polsce rejestrowane są w CBZ (Centralnej Bazy Zgłoszeń) prowadzonej przez ULC. W załączniku do Krajowego Programu Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym - Krajowym

Planie Bezpieczeństwa 2020 – 2023, w Krajowym Rejestrze Zagrożeń pkt. 3.c - Operacje bezzałogowych statków powietrznych (UAV/RPAS), przedstawione są wskaźniki prezentujące wypadki i incydenty z udziałem SBSP - rysunek 6.

NAA przekazują swoje dane do ECCAIRS (European Co-ordination centre for Accident and Incident Reporting Systems) Europejskiego Centrum Koordynacji Systemów Zgłaszania Wypadków i Incydentów. W raporcie EASA przedstawiono zestawienie zdarzeń dotyczących SBSP w latach 2014-2020 na lotniskach - rysunek 7 [5]. Znaczący spadek zdarzeń jest odnotowany w 2020 roku.

Eurocontrol prezentuje także zestawienie zdarzeń dotyczących SBSP w EVAIR (Voluntary ATM Incident Reporting) Bulletin No 22 2015 - 2019 Summer periods 10 May 2021[7]. Po znaczącym wzroście w 2018 roku EVIAR odnotował spadek zdarzeń z dronami w 2019r. Z danych wynika, że latem 2019 roku najbardziej dotknięta fazą lotu była faza podejścia w odniesieniu do wcześniej monitorowanego okresu. Większość zdarzeń zgłaszana była przez operatorów lotniczych (AO) w czasie dobrych warunków widzialności i w czasie zbliżania, ale odnotowano też zdarzenia na wyższych wysokościach. Około 15% spotkań z BSP można zaliczyć do poważnych incydentów.

Ażeby znaleźć stopień zależności poziomu bezpieczeństwa od stosowanych regulacji należy uwzględnić również dane dotyczące tendencji rozwojowych branży. Według Mordor Intelligence tempo wzrostu rynku SBSP na świecie według regionów rozkłada się w sposób pokazany na rysunku 8 [13].

Mordor Intelligence przewiduje, że rynek bezzałogowych statków powietrznych w okresie prognozy (2021-2026) zarejestruje CAGR (Compound Annual Growth Rate)

na poziomie 8,48%, a segment cywilny i handlowy zdominują rynek w okresie prognozy. Z kolei Teal Group releases 2020/2021 world civil UAS market profile and forecast [18], uwzględnia wpływy pandemii sugerując, że zmienia ona strukturę wzrostu w branży, zwiększając wsparcie dla dronów dostawczych, jednocześnie szkodząc inwestycjom w niektóre zastosowania długoterminowe. Prognozy Teal Group przewidują, że produkcja bezzałogowych statków powietrznych poza przeznaczeniem militarnym wyniesie 108 miliardów dolarów w następnej dekadzie i wzrośnie z 5 miliardów dolarów na rynku światowym w 2020 roku do 18,4 miliarda dolarów w 2029 roku, rysunek 9, co stanowi 15,6% łączną roczną stopę wzrostu.

Zestawiając systematyczny wzrost rynku branży bezzałogowej w porównaniu z malejącą ilością zdarzeń z udziałem SBSP można stwierdzić, że globalnie operacje bezzałogowe wykonywane są z niższym poziomem ryzyka. Wynika to z lepiej dostosowanych przepisów i zwiększonej ogólnej świadomości bezpiecznego wykonywania lotów SBSP. Daje to podstawę do stwierdzenia, że podejmowane działania w celu zapewnienia zakładanego poziomu bezpieczeństwa w lotach bezzałogowych przynoszą pozytywne efekty.

Podsumowanie i wnioski

Bezpieczeństwo lotów SBSP jest zależne od wielu czynników. Do najistotniejszych należy zaliczyć poziom techniczny i technologiczny systemów bezzałogowych oraz działania mające wpływ na sprawność szeroko rozumianego czynnika ludzkiego. W obu przypadkach podstawową rolę odgrywają wprowadzane regulacje, które rzutują na poziom zarówno bezpieczeństwa jak i efektywności. W odniesieniu

do lotów bezzałogowych, przyjęta przez międzynarodowe władze lotnicze ICAO i EASA koncepcja zakłada poziom ryzyka jako podstawę do wprowadzania podziału lotów i związanych z nimi regulacji. Tym samym eliminuje błędy i słabości działań stosowanych do kontroli poziomu bezpieczeństwa w rozwoju lotnictwa załogowego. W aspekcie technicznym i technologicznym wprowadzane regulacje uwzględniają bieżące osiągnięcia i rozwiązania dotyczące zarówno systemów bezzałogowych oraz zarządzania i kontroli przestrzeni powietrznej. Najślabszym ogniwem budowanego systemu bezpieczeństwa w lotach bezzałogowych jest oddziaływanie na czynnik ludzki. Wzrost ilości negatywnych zdarzeń związanych z lotami SBSP wynika z efektu skali stosowanych SBSP. Jednocześnie przy szybkim wzroście ilości operacji SBSP w ostatnich dwóch latach odnotowano wyraźny spadek incydentów z udziałem SBSP. Ponieważ decydujący wpływ na poziom bezpieczeństwa ma szeroko rozumiany HF, istnieje podstawa do stwierdzenia, że odnotowany spadek wynika zarówno z modyfikowanych starych oraz nowych skuteczniejszych regulacji oddziałujących na HF jak i ze zdobywania doświadczeń i budowania świadomości i kultury bezpieczeństwa wśród personelu operatorów i pilotów oraz innych użytkowników bezzałogowych statków powietrznych.

Analiza przedstawionych danych wskazuje na szereg obszarów i problemów, które mogą być wykorzystane do zapewnienia wyższego poziomu bezpieczeństwa. Do najważniejszych należy zaliczyć:

- Specjalizacja regulacji dostosowanej do różnych rodzajów lotów i wykonywanych zadań; np. zalecenia dotyczące zarządzania SBSP dostawczymi i wykonują-

cymi inne komercyjne usługi (jak w lotnictwie załogowym regulacje dla komercyjnego transportu lotniczego i GA)

- Wprowadzanie regulacji dla SBSP z jednoczesnym uwzględnieniem adekwatnych zmian dotyczących lotnictwa załogowego;
- Rozwijanie systemów zarządzania ruchem w przestrzeni powietrznej dla SBSP umożliwiających pełną integrację z lotnictwem załogowym;
- Uwzględnienie w regulacjach nieuniknionych w najbliższej przyszłości lotów SBSP z ludźmi na pokładzie oraz problematyki lotów autonomicznych.

Równoległy rozwój rozwiązań technicznych i technologicznych SBSP, zarządzanie przestrzenią powietrzną dla wspólnego użytkowania przez SBSP i lotnictwo załogowe, budowanie świadomości bezpieczeństwa czynnika ludzkiego i dostosowanie regulacji do zmieniających się warunkowań, może zapewnić utrzymanie bezpieczeństwa na zakładanym poziomie. ◀

Wykaz najważniejszych akronimów i skrótów

AGL (*Above Ground Level*) – wysokość nad poziomem terenu
ATC (*Air Traffic Control*) – kontrola ruchu lotniczego
ATM (*Air Traffic Management*) – system zarządzania ruchem lotniczym
BSP – bezzałogowy statek powietrzny
BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*) – operacje poza zasięgiem wzroku operatora bezzałogowego statku powietrznego
DAA – *Detect And Avoid* („wykryj i uni-

kaj”) - systemy umożliwiające zobaczenie lub wykrycie zagrożeń i podjęcie działań w celu spełnienia akceptowalnych zasad lotu

EASA (European Union Aviation Safety Agency) – Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej, do 2018 roku EASA (European Aviation Safety Agency)

HF (Human Factor) – czynnik ludzki
ICAO (International Civil Aviation Organization) – Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego

JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems) - wspólne organy odpowiedzialne za tworzenie przepisów dotyczących systemów bezzałogowych

MTOM – maksymalna masa startowa; maksymalna określona przez producenta lub konstruktora masa bezzałogowego statku powietrznego

NSTS (Natiopnal Standard Scenario) - Krajowy Scenariusz Standardowy
PAŻP (PANSA – Polish Air Navigation Services Agency) – Polska Agencja Żeglugi Powietrznej

RPS (Remote Pilot Station) – kontroler do zdalnego sterowania BSP

SBSP – system bezzałogowego statku powietrznego

SESAR Joint Undertaking (SESAR - Single European Sky ATM - Air Traffic Management – Research), Europejski system zarządzania ruchem lotniczym)

SMS (Safety Management System) – system zarządzania bezpieczeństwem
SORA (Specific Operations Risk Assessment) - Ocena ryzyka dla operacji
SBSP w kategorii szczególnej

Strefa geograficzna - część przestrzeni powietrznej wyznaczonej przez właściwy organ, która ułatwia, ogranicza lub wyklucza operacje z użyciem bezzałogowych systemów powietrznych, aby wyeliminować zagrożenia związane z bezpieczeństwem, prywatnością, ochroną danych osobowych, ochroną lub środowiskiem wynikające z operacji z użyciem tych systemów

STS (Standard Scenario) – standardowe scenariusze lotów SBSP

TLS (Target Level of Safety) - założony cel bezpieczeństwa

UAS (Unmanned Aerial System) – bezzałogowy system powietrzny

ULC – Urząd Lotnictwa Cywilnego

VLL (Very Low-Level Airspace) – przestrzeń powietrzna niskiej wysokości

VLOS (Visual Line of Sight) - Operacje w zasięgu wzroku operatora bezzałogowego statku powietrznego

Materiały źródłowe

[1] Cross Jean, ISO 31010 Risk assessment techniques and open systems, Sixth Workshop on Open Systems Dependability Tokyo, 2017-10-21.

[2] DZIENNIK URZĘDOWYURZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO, poz.35, WYTYCZNE NR 7 PREZESA URZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO z dnia 9 czerwca 2021 r.

[3] DZIENNIK URZĘDOWYURZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO, poz.78, WYTYCZNE NR 24 PREZESA URZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO z dnia 30 grudnia 2020 r.

[4] DZIENNIK URZĘDOWYURZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO, Wytyczne nr 15-23 - Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego

[5] –EASA Drone Incident Management at Aerodromes, The challenge of unauthorised drones in the surroundings of aerodromes, Cologne, Germany, 8 March 2021

[6] EASA Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945), Published January 2021

[7] EVAIR BULLETIN No 22 Years 2015-2019

[8] ICAO Cir 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS) 2011.

[9] ICAO Doc 10004 Globalny Plan Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym 2017-2019 (GASP), aktu-

alizacja edycja 2020-2022.

[10]ICAO Doc 9859 AN/474 PODRCZNIK ZARZĄDZANIA BEZPIECZEŃSTWEM (wydanie drugie - 2009)

[11]JARUS Doc. 06 SORA - Specific Operations Risk Assessment (pakage), JAR-DEL-WG6-D.04, 2019.

[12]Methodology for the Specific Ops Risk Assessment (SORA) by JARUS - UAS Workshop 2018

[13]Mordor Intelligence Unmanned Aerial Vehicles Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026) <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/uav-market>

[14]Projekt ustawy o zmianie ustawy z dnia 26.08.2021 r – Prawo lotnicze oraz niektórych innych ustaw (UD104) dokument518582

[15]Rozporządzenie Delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32019R0945>

[16]Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32019R0947>

[17]SESAR European ATM Master Plan 2020.

[18]Teal Group, Teal Group releases 2020/2021 world civil UAS market profile and forecast <https://www.compositesworld.com/news/teal-group-releases-20202021-world-civil-uas-market-profile-and-forecast>

Rozwój koncepcji bezzałogowego holownika szybowców i dronów towarowych o napędzie elektrycznym

The development of a concept of an unmanned glider-tug and cargo unmanned aerial vehicle with electric drive



Henryk Jafernik

Dr inż.

Państwowa Wyższa Szkoła
Zawodowa w Chełmie

henrykj21@interia.pl



Tomasz Muszyński

Dr inż.

Państwowa Wyższa Szkoła
Zawodowa w Chełmie



Łukasz Puzio

Mgr inż.

Państwowa Wyższa Szkoła
Zawodowa w Chełmie

Streszczenie: W artykule przedstawiono kilka wybranych propozycji zastosowań BSP rozwijanych w Polsce. Przedstawiono opis projektu bezzałogowego holownika, nowego rozwiązania technicznego, zgłoszonego do urzędu patentowego w grudniu 2017 roku i rozwijanego do chwili obecnej. Proponowany system holu składa się z uniwersalnej stacji naziemnej kontroli lotów bezzałogowców, BSP-holownika i dodatkowego systemu sterowania umieszczonego na obiekcie holowanym. Proponowane rozwiązanie ma na celu zmniejszenie kosztów eksploatacji oraz poprawę osiągnięć statków powietrznych o napędzie elektrycznym.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny; Holownik; Globalny System Pozycjonowania (GPS); Galileo

Abstract: The article presents a few selected ideas for AUV usage which are being developed in Poland as well as the description of a project of an unmanned tug, a new technological solution which was submitted to the Patent Office in December 2017 and which has been being developed since then. The proposed towing system consists of a universal ground-based air traffic control station for unmanned flights, an AUV-tug and an additional control system placed on the towed object. The proposed solution aims at maintenance costs reduction and increase of performance of aircrafts with electric drive.

Keywords: UAV; Tug; Global Positioning System (GPS); Galileo

Wstęp

Rynek bezzałogowych statków powietrznych (BSP) to jeden z najszybciej rozwijających się sektorów gospodarki. Obok USA i Izraela Polska należy do światowych liderów projektujących i produkujących BSP. Według niezależnych źródeł [2] pod względem wartości obrotów w tym sektorze gospodarki jesteśmy na trzecim miejscu na świecie. W Polsce działa około 4 tys. firm, produkujących całe systemy bądź ich komponenty. Z prognoz Komisji Europejskiej wynika, że cywilne pojazdy bezzałogowe, już za dziesięć lat będą stanowiły 10% światowego rynku lotniczego.

Analiza rynku krajowego

Portal *Dronell.com* (*Drone Industry In-*

sights) zajmujący się analizami globalnego rynku dronów cyklicznie publikuje raporty o stanie światowej branży BSP „The Drone Market Environment 2018”, wymienia wśród kilkuset firm, cztery polskie firmy które wg Dronell.com wpływają na kształtowanie się i rozwój globalnego rynku. Znalazły się tam następujące polskie przedsiębiorstwa:

1. DroneRadar – w kategorii UTM (UAS Traffic Management)
2. DroneTech – w kategorii Shows, Conferences, Events
3. Dron House – w kategorii Unmanned Platform Manufacturer
4. Novelty RPAS – w kategorii Unmanned Platform Manufacturer

Dron House to firma która jest pomysłodawcą innowacyjnego syste-

mu monitoringu UAV poprzez sieć GSM. Jest ona między innymi twórcą wielozadaniowej konstrukcji o nazwie Bielik.

Novelty RPAS z siedzibą w Gliwicach jest producentem systemów bezzałogowych. Z oferty tej firmy przede wszystkim warto wyróżnić najnowszy quadcopter przemysłowy Ogar Mk2, płatowiec Albatros oraz sterowiec skyMARK. Oprócz platform bezzałogowych Novelty RPAS tworzy osobne podzespoły, moduły do niezależnego wykorzystania, między innymi: GeoScanner (skaner do fotogrametrii), AgroScanner (do fotogrametrii multispektralnej), PostMan (uchwyt transportowy), WatchDog (moduł do obserwacji i inspekcji), SnifferDog (moduł do wykrywania i pomiaru zanieczyszczeń w powietrzu), CinemaArtist (moduł do profesjonalnego



1. Dron Aquila firmy UAVS Poland Sp. z o.o. – źródło: [3]

filmowania z powietrza).Wiele z tych modułów jest branych przy opracowaniu projektu.

DroneRadar jest firmą zarządzaną przez spółkę „ Dlapilota.pl sp. z o.o.” jest dopracowanym i zaawansowanym systemem do zgłaszania lotów dronów, oraz monitorowania ruchu. Ponadto użytkownicy aplikacji DroneRadar na urządzeniach mobilnych mogą sprawdzić możliwość wykonania lotu w danym miejscu w oparciu o polskie prawo lotnicze i rozmieszczenie struktur w przestrzeni powietrznej.

DroneTech jest organizatorem międzynarodowych targów dronowych DroneTech World Meeting w Toruniu. Aktywność firmy została zauważona przez portal Dronell.com. Kolejny rodzaj zastosowania dronów i aktywność polskich konstruktorów na tym polu to konstrukcja dronów stosowanych do transportu towarowego. Drony do przewozu nawet trzykilogramowych paczek buduje firma Ritex z Dolnego Śląska. Tym samym

staje ona w wyścigu o wprowadzenie dronów do usług kurierskich z DHL czy szwajcarską pocztą. Drony - małe, to lekkie roboty latające do robienia zdjęć czy filmów z lotu ptaka. Zainteresowani ich ofertą są fotografowie i filmowcy, cieszą się nimi gadżeciarze. Drony mają jednak znacznie większy potencjał, z którego póki co korzysta wojsko i policja, np. do transportu materiałów wybuchowych, monitoring natężenia ruchu itp. [1]. Potencjalnym zastosowaniem tego typu maszyn jest przewożenie leków w nagłych wypadkach lub dostarczenie ważnych dokumentów. Czas ich przewozu można by skrócić dwu-, a nawet trzykrotnie, w zależności od ukształtowania terenu. Drony są już wykorzystywane do koordynowania akcji ratunkowych podczas klęsk żywiołowych. Maszyny te są także używane do udzielania pomocy osobom tonącym na rozległych akwenach wodnych gdzie czas dotarcie innych służb ratowniczych byłby zbyt długi.

Kolejną wyróżniającą się firmą jest”

UAVS Poland Sp. z o.o” której sztandarowym produktem jest dron Aquila.

Aquila – jest bezzałogowcem w układzie śmigłowca, ważącym 32 kg., posiadającym udźwig 10 kg, jest to w pełni autonomiczny dron wykonujący samodzielny pionowy start, lot po zdefiniowanej trasie i pionowe lądowanie. Autorski system "antena-tracker" umożliwia utrzymywanie komunikacji z dronem w odległości nawet kilkudziesięciu kilometrów. Głównym wyposażeniem Aquila jest głowica obserwacyjna z termowizyjną kamerą, kamerą klasyczną dzienną oraz laserowym dalmierzem. Obraz jest rejestrowany zarówno przez kamerę jak również przesyłany razem z dźwiękiem w czasie rzeczywistym do naziemnej bazy na odległość do 30. Dron jest w stanie utrzymywać się w powietrzu przez ok. 2 godzin a jego maksymalny pułap lotu to 1500 m. Rozpiętość łopat głównego wirnika wynosi 2m. Aquila został zaprojektowany i stworzony z myślą o wsparciu głównie jednostek mundurowych takich jak Straż Pożarna, Straż Graniczna, Policja, Wojsko czy Leśnictwo. Z powodzeniem może być również używany przez firmy geodezyjne do obrazowania terenu lub np. firmy z sektora energetycznego do inspekcji infrastruktury przesyłowej.

Bardzo ciekawą jest również konstrukcja opracowana przez firmę FlyTech UAV, założoną przez absolwentów Politechniki Rzeszowskiej

BIRDIE – dron na bazie płatuowca z tylnym silnikiem pchającym został opracowany przez firmę FlyTech UAV, założoną przez absolwentów Politechniki Rzeszowskiej na kierunku Lotnictwo i Kosmonautyka. Został on opracowany przede wszystkim z myślą o fotogrametrii. Podstawowym wyposażeniem drona jest aparat fotograficzny światła widzialnego, ale na pokładzie może zostać zamontowany również inny sprzęt np. kamera multispektralna lub termowizyjna. Dzięki takiemu wyposażeniu BIRDIE idealnie sprawdza się do mapowania terenu, tworzenia jego modelu 3D oraz map topograficznych, po zamontowaniu kamery multispektralnej może być



2. BIRDIE dron opracowany przez absolwentów Politechniki Rzeszowskiej na kierunku Lotnictwo i Kosmonautyka. Źródło[5]

wykorzystywany np. w rolnictwie do oceny stanu wegetacji upraw rolniczych lub w leśnictwie – do badania jakości drzewostanu. Z kolei wykorzystanie termowizji sprawdzi się przy inspekcjach technicznych infrastruktury np. gazociągów lub w górnictwie – przy namierzaniu wycieków gazu pod ziemią. Dron BIRDIE jest stosunkowo lekki (2,5-3,9 kg w zależności od konfiguracji) i o niewielkiej rozpiętości (1,4/1,8 m) co pozwala na proste starty z ręki. Nowością w skali światowej jest możliwość przejścia z konfiguracji fixed-wing do VTOL za pomocą dołączanego modułu. Czas lotu w konfiguracji samolotu to 60 minut, w konfiguracji VTOL to 40 min.

Inną propozycją aczkolwiek odmienną od dotychczasowych to temat hoverbike'ów. W Polsce też podjęto ten problem. W roku 2016, zanim latającymi motocyklami zainteresowała się policja z Dubaju, firma Skynamo Aerospace z niewielkiego Wojnicza (pow. tarnowski) zaprezentowała pojazd Hoverbike Raptor. Jako napęd główny nasi rodacy wykorzystali nie silnik elektryczny, lecz spalinowy i to o mocy aż 380 KM, zapożyczony od motocykla torowego Suzuki Hayabusa.

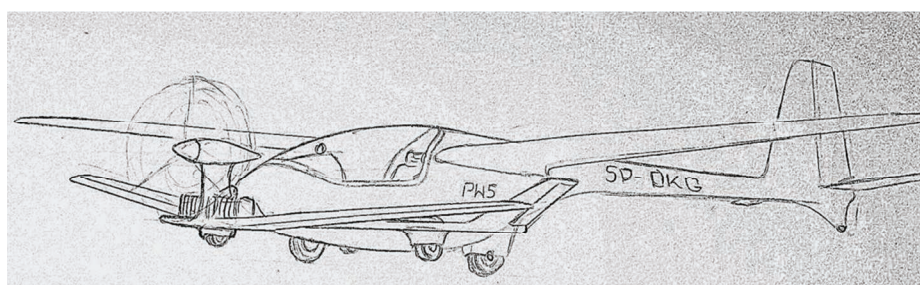
Wehikułem zainteresowało się wiele firm, w tym wojsko. Niestety Hoverbike Raptor cały czas tkwi w fazie projektowej, podczas gdy inne podobne projekty weszły już w fazę testowania i udoskonalania prototypów, albo tak jak Hoverbike S3 są już na etapie wprowadzenia do czynnej służby przez policję ZEA.

Bezzałogowy holownik – opis ogólny

Analiza podstawowych parametrów dronów eksploatowanych przez użytkowników cywilnych jak i wojskowych do których można zaliczyć długotrwałość lotu, udźwig, różnorodność zadań, precyzja wykonania zadań, monitoring lotu, system sterowania, bezpieczeństwo operacji skłania do poszukiwania nowych rozwiązań. Jedną z prób nowego zastosowania bezzałogowców, jest



3. Polski Hoverbike Raptor Źródło:[6]



4. Szkic zespołu holownika z wysoką wieżyczką silnika i podwoziem z przednim punktem podparcia i usterzeniem motylkowym i szybowca PWS. Źródło: archiwum T. Muszyńskiego wersja holownika 1 z roku 2016

koncepcja holownika szybowców opracowana przez pracowników Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Chełmie. Została ona zgłoszona do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej w grudniu 2017 roku pod numerem P.423710.

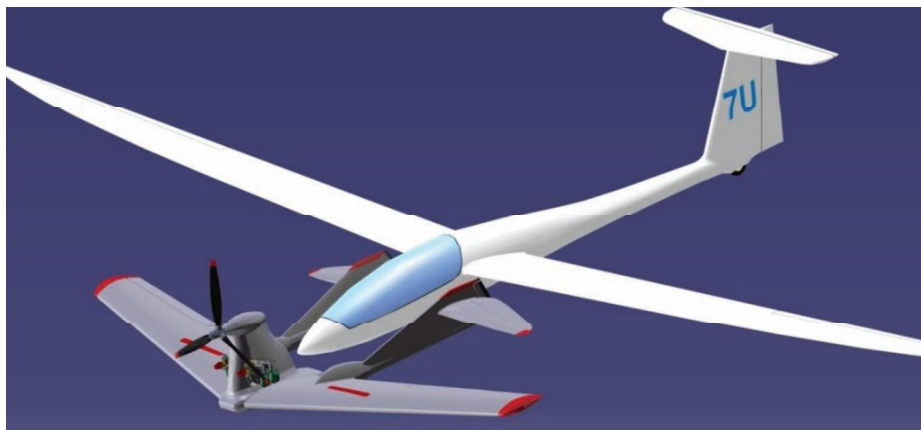
Tradycyjny start szybowca odbywa się najczęściej z wykorzystaniem samolotu holującego lub wyciągarki. Na niektórych szybowiskach górskich możliwe jest również rozpędzanie szybowców do startu przy pomocy lin gumowych lub poprzez taką lokalizację miejsca startu, że przy sprzyjających warunkach, szybowiec może osiągnąć prędkość wystarczającą do samodzielnego lotu poprzez stoczenie się w dół zbocza. Po osiągnięciu odpowiedniej wysokości pilot szybowca wyczepia linę holowniczą i szybowiec rozpoczyna samodzielną lot.

Zastosowanie każdego z tych systemów startu wymaga udziału minimum dwóch dodatkowych podmiotów. Hol za samolotem jest kosztowny, natomiast pozostałe rozwiązania mają istotne ograniczenia. W

proponowanym rozwiązaniu istnieje możliwość zmniejszenia podmiotów obsługujących start szybowca a ponadto istnieje możliwość redukcji masy zespołu holownik-szybowiec, co zmniejsza znacznie zużycie energii (paliwa). Celem projektu jest opracowanie holownika zintegrowanego z szybowcem, sterowanego przez pilota w fazie startu i zdolnego do samodzielnego powrotu na lotnisko.

Projekt bezpilotowego statku powietrznego (BSP) – holownika w tym głównie szybowców jest rozwijany od roku 2016 początkowo przez Tomasza Muszyńskiego. W roku 2017 do prac nad projektem dołączyli Henryk Jafarnik, Bartłomiej Kostowski, Łukasz Puzio, Arkadiusz Tofil, Józef Zając. Prace zaowocowały zgłoszeniem patentowym przez pracowników PWSZ w Chełmie. Pierwsza koncepcja opierała się na statku powietrznym w układzie, że śmigłem ciągnącym, dwoma belkami ogonowymi, pomiędzy które mocowany jest kadłub szybowca.

Istotą rozwiązania jest wyposażenie BSP w mechanizm mocowania do szybowców i system sterowania



5. Połączony zespół szybowca i BSP-holownika (wersja 1), Źródło: archiwumT. Muszyński

umieszczony w szybowcu, co umożliwia przemieszczanie połączonych BSP i szybowca na ziemi oraz ich lot silnikowy. Rozwiązanie obejmuje BSP-holownik, naziemną stację kontroli lotu i dodatkowo system sterowania umieszczony w szybowcu System monitoringu i sterowania wstępnie oparto o system GPS. Rozważane jest docelowo wykorzystanie systemu GALILEO. BSP-holownik składa się z płatowca z układami płatowcowymi, zespołu napędowego, oraz układu sterowania radio control - RC, autopilota z systemem stabilizacji i wyposażenia - kamery z przesyłem obrazu i dźwięku w czasie rzeczywistym od BSP do operatora, system monitoringu lotu.

Wstępny etap polegał na wykonaniu obliczeń stateczności BSP o nietypowym układzie z krótkim kadłubem, wysoko uniesionym śmigłem ciągnącym, dwoma belkami ogonowymi i usterzeniem mieszczącym się pod skrzydłami szybowca. Obliczenia wykonano w programie XFLR5.

Przeprowadzone badania umożliwiły dobranie kątów zaklinowania usterzeń, kątów ustawienia skrzydła holownika względem szybowca. Ponadto wyznaczono środki ciężkości i określono zakres ich zmiany. Na podstawie tych wyliczeń skonfigurowano i zaprojektowano modele testowe. Wykonane modele holownika i szybowca poddano badaniom weryfikacyjnym w powietrzu w locie. Wykonano 36 lotów w trakcie których sprawdzono właściwości aerodynamiczne samego holownika oraz zespołu holownik-szybowiec.

Bezzałogowy holownik – badania modelowe

Początkowo zakładano, że wystarczające jest połączenie szybowca z holownikiem w oparciu o istniejące na szybowcach zaczepy holownicze-przedni linki holowniczej ciągnięjonej za samolotem oraz dolny zaczep do liny wyciągarki. Założono także zastosowanie kilku punktów oporowych w

formie poduszki powietrznej.

Wykonano model latającego holownika szybowców o wadze ok. 3,6 kg i rozpiętości 1.6 m.

Do prób holowania wykorzystano szybowiec o rozpiętości 5,1 m o wadze 6,3 kg. Holownik wykonano według projektu 1 w układzie dolnopłata, ze śmigłem ciągnącym, dwoma belkami ogonowymi, pomiędzy które mocowano kadłub szybowca. Już podczas prób w locie samego holownika okazało się, że śmigło zamocowane na wysokiej wieżyczce daje podczas dodawania gazu silny moment pochylający. Po kilku próbach w locie zdecydowano się zmniejszyć wysokość wieżyczki do 90 mm. Podczas mocowania szybowca do holownika okazało się, że aby podczas startu uzyskać kąt zaklinowania holownika względem szybowca $+2,5^\circ$ należy zmienić konstrukcję podwozia na układ z kółkiem tylnym. Sztynne połączenie BSP z szybowcem wykonano w oparciu o dwa zaczepy -przedni i dolny oraz poduszki opinające kadłub. Zakładano, że dzięki temu rozwiązaniu będzie możliwy lot połączonych zespołu BSP i szybowca za pomocą ciągu sterowego jedynie szybowca.

W praktyce już do lotu poziomego niezbędne było sterowanie klapolotkami holownika, które w tym przypadku wspomagały ster wysokości szybowca. Lot w zespole posiadał więc właściwości układu z trzema powierzchniami nośnymi, przy czym był bardziej zbliżony do układu „kaczka” niż klasycznego. Ponadto sztywność „skrętna” zespołu okazała się zbyt mała – przy sterowaniu przechyleniem szybowca, obrót nie był przekazywany na holownik. Doprowadziło to do rozbicia obu modeli.

W wyniku niepomyślnych prób w locie stwierdzono iż sztywność skrętna zespołu jest niewystarczająca. Opracowano kolejną koncepcję zakładającą usztywnienie połączenia poprzez dodanie nakładek, zamocowanych na podwójnym usterzeniu pionowym i opierających się na krawędzi natarcia skrzydła szybowca. Rozwiązanie to pozwoliło w sposób

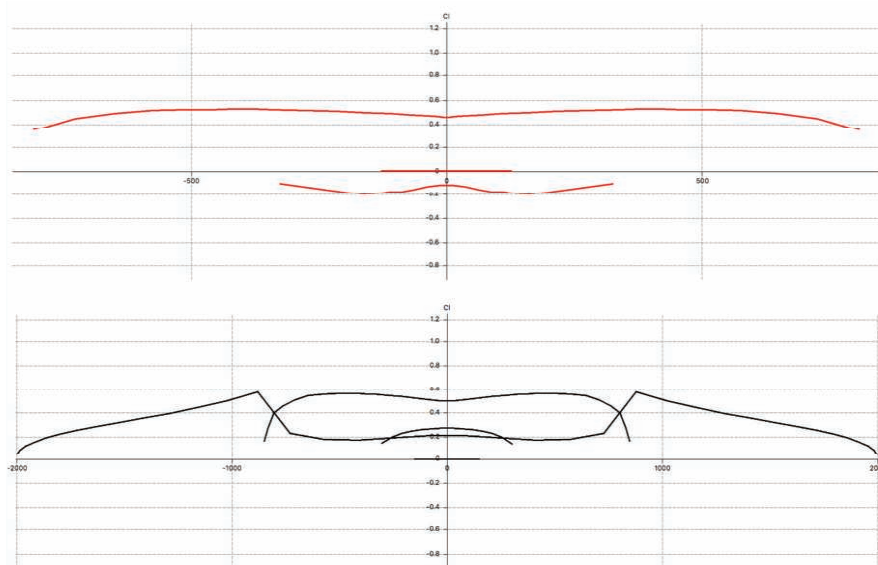
znakomity zwiększyć sztywność skrętną zespołu i oprzeć sterowanie przechyleniem w czasie lotu w zespole wyłącznie o sterowanie lotkami szybowca, które położone są w odległości od osi obrotu ponad dwukrotnie większej niż lotki holownika.

W trzeciej wersji prototypu zdecydowano się również na odsunięcie usterzeń pionowych od kabiny, co przy skośnym skrzydle pozwoliło na skrócenie belek ogonowych. W wersji pełnowymiarowej znakomicie ułatwi to również wsiadanie do szybowca.

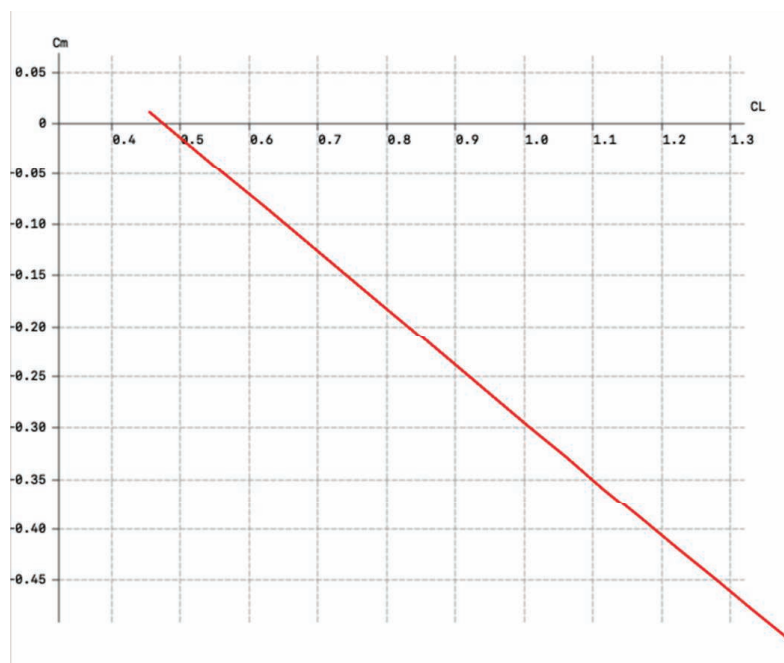
Następnym etapem (około 12 miesięcy) będzie wykonanie właściwego demonstratora technologii. Przyjęta koncepcja zostanie zweryfikowana o wyniki z etapów wcześniejszych, po czym zostanie podjęta decyzja o konfiguracji właściwego prototypu produktu BSP-holownik. Konieczne jest sprawdzenie koncepcji sterowania połączonego zespołu BSP i szybowca oraz przetestowanie sposobu wyczepiania szybowca w czasie lotu. Zostanie wykonany nowy model BSP o wadze ok 5 kg z napędem elektrycznym, zasilanym bateriami litowo-polimerowymi. Konstrukcja płatowca i dźwigary skrzydeł będą wykonane z duraluminium, natomiast skrzydła, powierzchnie sterujące, panele i owiewki będą wykonane z kompozytu szklano-węglowego. Formy elementów kompozytowych zostaną wykonane w uproszczonej technologii. Na tym etapie konieczne będzie wstępne sprawdzenie charakterystyk przyjętego układu w lotach samodzielnych. Przy udziale specjalistów, w ośrodku naukowym zostaną wykonane badania aerodynamiczne oraz badania i testy stateczności i sterowności zespołu BSP-holownik szybowców. Badania będą dotyczyć głównie lotu poziomego w zespole sterowania. Przyjęta koncepcja zostanie zweryfikowana. Pozwoli to na podjęcie decyzji co do konfiguracji właściwego prototypu produktu BSP-holownik szybowców. Wyniki zostaną przedstawione na konferencji naukowej i upublicznione. Ponadto konieczne są prace nad integracją wielu systemów wspomagających, takich jak system

kamer z dedykowanym systemem obróbki obrazu (komputer obrazu na bazie nvidia), skaner laserowy LIDAR, pomocniczy system sterowania

z autopilotem, systemem stabilizacji i nawigacji GPS, Galileo. Pomocniczy komputer pokładowy jest niezbędny do prób integracji systemów w czasie



6. Porównanie rozkładu siły nośnej wzdłuż rozpiętości skrzydła na modelu szybowca bez holownika (a) oraz zespołu model holownika-model szybowca (b). Źródło: archiwum T. Muszyński



7. Zależność współczynnika momentu C_m od współczynnika siły nośnej C_l . Źródło: archiwum T. Muszyński



8. Model zespołu szybowiec i BSP-holownika - wersja 2 z obniżoną wieżyczką silnika i podwoziem z tylnym punktem podparcia. Źródło: archiwum T. Muszyński

Tab. 1. Opis techniczny (projekt wstępny wersji spalinowej) - BSP holownik szybowców

Rozpiętość skrzydeł	6 (m)
Powierzchnia nośna	5,8 (m ²)
Ciężar własny	155 (kg)
Prędkość przelotowa	110 (km/h)
Prędkość maksymalna lotu poziomego	165 (km/h)
Prędkość przeciągnięcia	50(km/h)
Rozbieg/dobieg	60 (m)/100m
Silnik	ROTAX 912 ULS
Moc silnika	100 (KM)
Pojemność zbiornika paliwa	30 (l)
Zużycie paliwa w czasie lotu w zespole	15 (l/h)
Maksymalna masa startowa zespołu	750 (kg)
Prędkość wznoszenia w zespole (600 kg)	5 (m/s)
Prędkość minimalna lotu poziomego w zespole	70 (km/h)
Prędkość maksymalna lotu poziomego w zespole	100 (km/h)

kiedy nie jest wykonany specjalistyczny komputer główny dedykowany do BSP-holownika. Konieczny jest także wysokowydajny system do przesyłu sygnału audio-video oraz system do przesyłu danych telemetrycznych. W etapie wdrażania powinny zostać także rozwiązane problemy komercyjne tj. wybrane firmy do współpracy w zakresie projektu, wykonania i sprzedaży opracowywanego produktu. Brana jest pod uwagę próba znalezienia udziałowców w oparciu o portal crowdfundingowy Indiegogo.

Obecnie prowadzone są analizy w kierunku zastosowania zespołów elektrycznego i spalinowego. Elektryczny napęd wydaje się być właściwy dla urządzenia mającego zastosowanie w organizacjach szkoleniowych, kształcących pilotów do licencji szybowcowej. Wstępne obliczenia obciążenia elektrycznego pokazują, że w przypadku holu jednoosobowego szybowca bez problemu powinna zostać osiągnięta długotrwałość lotu powyżej 15 minut co powinno wystarczyć na 10-cio kilometrowy promień działania wokół lotniska.

BSP-holownik o dużej długotrwałości lotu z napędem silnikiem spalinowym, o masie całkowitej ok. 160 kg mógłby być zastosowany w organizacjach w których potrzebne są loty o większej długotrwałości lotu. Opis parametrów tego projektu zestawiono w tabeli 1.

Na każdym etapie realizacji projektu możliwe będą korekty założeń konstrukcyjnych. Zostanie wybrane optymalne rozwiązanie aby osiągnąć zakładane charakterystyki w locie połączonych BSP i szybowca. Konieczne będzie dokładne określenie charakterystyk układu, określenie optymalnych wielkości poszczególnych elementów BSP w tym powierzchni sterujących. Ze względów bezpieczeństwa i względów prawnych konieczne będzie także zaangażowanie lotniczych organizacji prawnych. Zakłada się że proces projektowania i wykonania płatowca, układu przeniesienia napędu, wykonanie głównego komputera pokładowego wraz z układem sterowania BSP, układu nawigacji potrwa 12 miesięcy. Ostatnią częścią są testy prototypu i dostosowanie gotowego wyrobu do zaleceń odbiorcy. W celu przeprowadzenia badań ośrodek naukowy będzie musiał przygotować specjalizowane stanowisko, umieścić w nim zespół BSP HOLOWNIK SZYBOWCÓW i szybowca, skonfigurować system pomiarowy i przeprowadzić badania.

Zakończenie

W oparciu o wykonany model matematyczny urządzenia, wyniki badań w tunelu aerodynamicznym, badań w locie zostaną dobrane i dostrojone algorytmy sterowania. Zostanie zaprogramowany układ stabilizacji

sterowania i sztucznej stateczności wspomagający lot w zespole i lot autonomiczny podczas dolotu na lotnisko. Opisany produkt zdaniem autorów może stanowić ciekawą propozycję dla ośrodków szkolenia szybowcowego, firm przewozowych trudniących się dostawą niewielkich produktów w trudno dostępnym terenie. Ten sam BSP –holownik służyć może jako wózek do holowania szybowców oraz holownik systemów transportowych dostarczających towary drogą powietrzną.

Ze względu na rodzaj wykonywanych zadań podstawowym systemem sterowania powinien być system autonomiczny. System ręcznego sterowania RC powinien mieć dwa nadajniki. Pierwszy z nich powinien być umieszczony w centrum kontroli lotu. W przypadku lotów szybowcowych drugi system sterowania powinien być wykonany w formie małego panelu przyczepianego do struktury szybowca i powinien dawać możliwość sterowania co najmniej ciągiem silnika BSP. Podstawowy system monitoringu i sterowania proponuje się opracować na bazie systemu satelitarnego Galileo. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Henryk Jafern, The Safety of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Missions in Storm and Precipitation Areas, SFT Józefów k/Otwoc-ka, vol 54 ISSUE2,2019
- [2] <http://www.swiatdronow.pl/polskie-firmy-wsrod-najbardziej-wplywowych-wg-dronii-comhttp>
- [3] <http://polskiprzemysl.com.pl/>
- [4] The Drone Market Environment 2018
- [5] <https://www.flytechuav.pl/#produkty> -7 maj 2020r.
- [6] <https://wataha.no/2018/06/06/polski-latajacy-motor-poznaj-ho-verbike-raptor/>

Zastosowanie metody pozycjonowania SBAS/EGNOS do wyznaczenia współrzędnych BSP

Using the SBAS / EGNOS positioning method to determine BSP coordinates



Henryk Jaferník

Dr inż.

Państwowa Wyższa Szkoła
Zawodowa w Chełmie

henryk21@interia.pl



Kamil Krasuski

Dr inż.

Lotnicza Akademia Wojskowa,
Deblin

k.krasuski@law.mil.pl



Janusz Ćwiklak

dr hab inż., prof. LAW

Lotnicza Akademia Wojskowa,
Deblin

j.cwiklak@law.mil.pl



Damian Wierzbicki

Dr hab. inż., prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna,
Warszawa

damian.wierzbicki@wat.edu.pl

Streszczenie: W artykule dokonano przedstawienia wyników badań dotyczących wyznaczenia pozycji BSP (Bezzałogowy Statek Powietrzny) z użyciem metody pozycjonowania SBAS (Satellite Based Augmentation System) dla systemu wspomaganie EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). W eksperymencie wykorzystano jednoczęstotliwościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS, który rejestrował obserwacje satelitarne GPS (Global Positioning System) oraz poprawki EGNOS. Lot testowy wykonano w 2020 r. w okolicach Warszawy. Obliczenia nawigacyjne dla określenia pozycji BSP podczas lotu wykonano w oprogramowaniu gLAB v.5.5.1. Na podstawie wykonanych obliczeń wyznaczono: współrzędne BSP w układzie elipsoidalnym BLh, błędy średnie współrzędnych BSP, wartości współczynników geometrycznych DOP (Dilution of Precision). Ponadto w trakcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych BSP nie przekraczają 3.6 m, zaś maksymalna wartość współczynnika geometrycznego GDOP (Geometric DOP) jest mniejsza niż 3.5.

Słowa kluczowe: SBAS; EGNOS; BSP; błędy średnie; DOP

Abstract: The article presents the results of research on the determination of the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) position using the SBAS (Satellite Based Augmentation System) positioning method for the EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) support system. The experiment used a single-frequency AsteRx-m2 UAS receiver, which recorded GPS (Global Positioning System) satellite observations and EGNOS corrections. The test flight was made in 2020 near Warsaw. Navigation calculations for determining the UAV position during the flight were made in the gLAB v.5.5.1 software. On the basis of the performed calculations, the following were determined: BSP coordinates in the ellipsoidal system BLh, mean errors of the BSP coordinates, values of the geometric coefficients DOP (Dilution of Precision). Moreover, during the performed calculations, it was found that the mean errors of the determined UAV coordinates do not exceed 3.6 m, and the maximum value of the Geometric DOP coefficient is lower than 3.5.

Keywords: SBAS; EGNOS; BSP; mean errors; DOP

Wstęp

W XXI wieku nastąpił gwałtowny rozwój platform bezzałogowych, dla których podstawowym wyposażeniem nawigacyjnym stał się odbiornik satelitarne GNSS. Dotyczy to zarówno bu-

dowy i implementacji jedno- i dwuczęstotliwościowych odbiorników satelitarnych GNSS. W przypadku odbiorników jednoczęstotliwościowych GNSS (Global Navigation Satellite System), podstawową metodą pozycjonowania jest metoda SPP (Single

Point Positioning), w której wykorzystujemy obserwacje kodowe C/A na częstotliwości L1 oraz depeszę nawigacyjną w danym systemie satelitarnym GNSS [1]. Wadą tej metody jest niska dokładność pozycjonowania, chociaż jest ona najbardziej rozpo-

wszechniona i używana w zastosowaniach lotniczych. W związku z tym poszukuje się ulepszonych rozwiązań nawigacyjnych dla poprawy wyznaczenia pozycji BSP z użyciem odbiorników jednocześnie GNSS. Jednym ze sposobów poprawy wyznaczenia pozycji BSP jest zastosowanie metody pozycjonowania SBAS [2]. W ramach metody pozycjonowania SBAS wykorzystujemy poprawki różnicowe określone dla danego systemu nawigacyjnego GNSS. Rozwijając pojęcie poprawki różnicowe rozumiemy przez to poprawki do współrzędnych satelity GNSS, poprawki do błędu zegara satelity GNSS, poprawkę jonosferyczną w postaci parametrów VTEC (Vertical TEC) oraz poprawkę troposferyczną obliczoną z modelu RTCA-MOPS (Radio Technical Commission for Aeronautics - Minimum Operational Performance Standards) oraz szybkie poprawki SBAS. Poprawki SBAS do pozycji satelity i błędu zegara satelity GNSS są określone jako długoterminowe poprawki SBAS, zaś poprawka jonosferyczna i troposferyczna jako poprawki atmosferyczne [3].

W Europie systemem wspomagania SBAS jest system geostacjonarny EGNOS. System EGNOS składa się z segmentu kosmicznego (3 satelity), segmentu naziemnego (stacje: RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), NLES (Navigation Land Earth Stations) oraz MCC (Mission Control Centers)), segmentu użytkownika (odbiorniki satelitarne). System EGNOS obecnie wypracowuje poprawki różnicowe dla systemu nawigacyjnego GPS. W przyszłości EGNOS będzie kompatybilny i międzyoperacyjny z systemem Galileo (European Navigation Satellite System) [4, 5].

Głównym celem pracy jest pokazanie wyników badań dotyczących wyznaczenia współrzędnych BSP w

ramach przykładowego lotu. W tym celu wykorzystano obserwacje kodowe GPS, depeszę nawigacyjną GPS oraz poprawki EGNOS. W obliczeniach wykorzystano nowy pakiet oprogramowania gLAB v.5.5.1 z modułem pozycjonowania SBAS. Całość pracy podzielono na 5 części, tj. 1. Wstęp, 2. Metoda badawcza, 3. Test badawczy, 4. Wyniki badań i dyskusja, 5. Wnioski. Na zakończenie pracy dodano zwarty spis literatury.

Metoda badawcza

W niniejszej części pokazano algorytmy wyznaczenia pozycji BSP oraz wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych. Podstawowe równanie obserwacyjne dla metody pozycjonowania SBAS/EGNOS przyjmuje postać, jak zapisano poniżej [6]:

$$l = d + c \cdot (dtr - dts) + lon + Trop + TGD + Rel + Mp + PRC \quad (1)$$

gdzie:

l - pomiar kodowy, czyli pseudoodległość w systemie GPS,
 d - odległość geometryczna pomiędzy satelitą a odbiornikiem, uwzględnia pozycję satelity GPS (X_s, Y_s, Z_s), uwzględnia poprawki długoterminowe orbity EGNOS,
 $d = \sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2}$,
 (X, Y, Z) - współrzędne anteny odbiornika, szukane parametry,
 dtr - błąd zegara odbiornika, niewiadomy parametr,
 dts - błąd zegara satelity, obliczany na podstawie depeszy nawigacyjnej GPS i poprawek długoterminowych EGNOS,
 c - prędkość światła,
 lon - poprawka jonosferyczna, obliczana na podstawie modelu jonosfery SBAS/EGNOS,
 $Trop$ - poprawka troposferyczna, obliczana na podstawie modelu RTCA-

-MOPS dla systemów wspomagania SBAS,
 TGD - opóźnienie sprzętowe, obliczana na podstawie depeszy nawigacyjnej GPS,
 Rel - poprawka relatywistyczna, obliczana na podstawie depeszy nawigacyjnej GPS
 Mp - efekt wielotorowości dla obserwacji kodowych GPS,
 PRC - szybkie poprawki EGNOS.

Z równania (1) wyznaczane są jako niewiadome parametry, tj. 3 składowe pozycji (X, Y, Z) oraz błąd zegara odbiornika dtr . Niewiadome parametry są wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów w procesie stochastycznym [7]:

$$\begin{cases} Qx = N^{-1} \cdot L \\ v = A \cdot Qx - dl \\ m0_{post} = \sqrt{\frac{[pvv]}{n-k}} \\ C_{Qx} = m0_{post}^2 \cdot N^{-1} \\ m_{Qx} = diag(\sqrt{C_{Qx}}) \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

Q_x - wektor wyznaczanych parametrów,
 $N = A^T \cdot p \cdot A$ - macierz układu równań normalnych,
 A - macierz współczynników,
 p - macierz wag,
 $p = 1/(m0_{post}^2 \cdot ml^2)$,
 $m0_{post}$ - błąd średni jednostkowy a posteriori,
 ml - macierz z błędami średnimi pseudoodległości,
 $ml^2 = (ml_{C/A} / \sin(EI))^2 + m_{SBAS}^2$,
 EI - kąt elewacji,
 $ml_{C/A}$ - odchylenie standardowe pomiarów kodowych w systemie GPS,
 m_{SBAS} - błąd modelu poprawek SBAS/EGNOS,
 $L = A^T \cdot p \cdot dl$,
 dl - wektor wyrazów wolnych,
 n - liczba obserwacji,
 k - liczba wyznaczanych parametrów,

v – wektor poprawek,
 C_{Qx} – macierz wariancyjno-kowariancyjna zawierająca wartości błędów średnich wyznaczanych parametrów,
 m_{Qx} – błędy średnie wyznaczanych parametrów, odniesione do układu geocentrycznego ECEF.

Ze względu na to, iż w nawigacji lotniczej pozycja BSP jest wyrażana za pomocą współrzędnych elipsoidalnych BLh (szerokość geodezyjna B, długość geodezyjna L, wysokość elipsoidalna h), w równaniu (3) zaprezentowano model transformacji współrzędnych XYZ do BLh [8]:

$$\begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{Z}{\rho} + \frac{\delta_1 \cdot tg B_{i-1}}{\sqrt{\delta_2 \cdot tg^2 B_{i-1}}}\right) \\ \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \frac{\rho}{\cos B} - R \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

(a,b) – wielka oraz mała półoś elipsoidy,
 e – mimośród pierwszy,
 $e = \sqrt{((a^2 - b^2)/a^2)}$,
 R – promień krzywizny pierwszego wertykału elipsoidy,
 $R = 1/\sqrt{(1 - e^2 \cdot \sin^2 B)}$,
 $\rho = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$,
 $\delta_1 = (a \cdot e) / (\rho \cdot \sqrt{(1 - e^2)})$,
 $\delta_2 = 1 / (1 - e^2)$,
 $i-1$ – poprzednia iteracja,
 (B, L, h) – współrzędne elipsoidalne statku powietrznego,

B – szerokość geodezyjna,
 L – długość geodezyjna,
 h – wysokość elipsoidalna.

Ponadto wartości błędów średnich m_{Qx} obliczonych dla geocentrycznych współrzędnych XYZ, mogą być wyrażone także w układzie elipsoidalnym BLh [7, 8]:

$$\begin{bmatrix} mB \\ mL \\ mh \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{m_{BLh}(1,1)} \\ \sqrt{m_{BLh}(2,2)} \\ \sqrt{m_{BLh}(3,3)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

m_{BLh} – macierz wariancyjno-kowariancyjna wyznaczanych parametrów w układzie elipsoidalnym BLh,
 $m_{BLh} = R \cdot C_{Qx} \cdot R^T$,
 R – macierz przejścia z układu geocentrycznego XYZ do układu geodezyjnego BLh,
 mB – błąd średni wyznaczenia szerokości geodezyjnej B,
 mL – błąd średni wyznaczenia długości geodezyjnej L,
 mh – błąd średni wyznaczenia wysokości elipsoidalnej h.

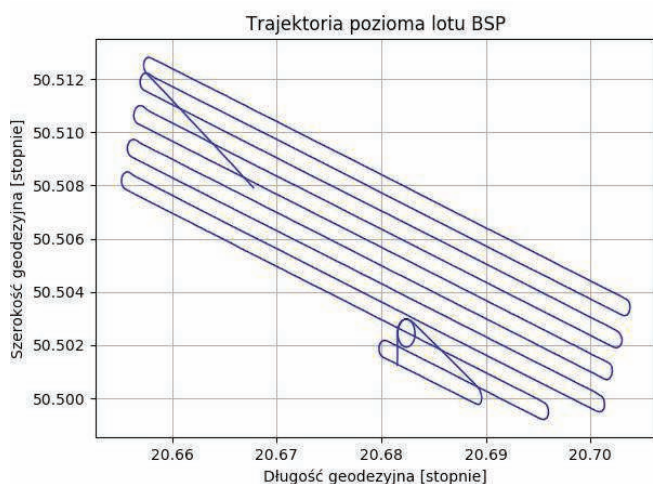
Test badawczy

Test badawczy do pracy został podzielony na 2 etapy. Pierwszy etap dotyczył lotu testowego platformy BSP, na której zamontowano odbiornik satelitalny GPS. Lot testowy odbył

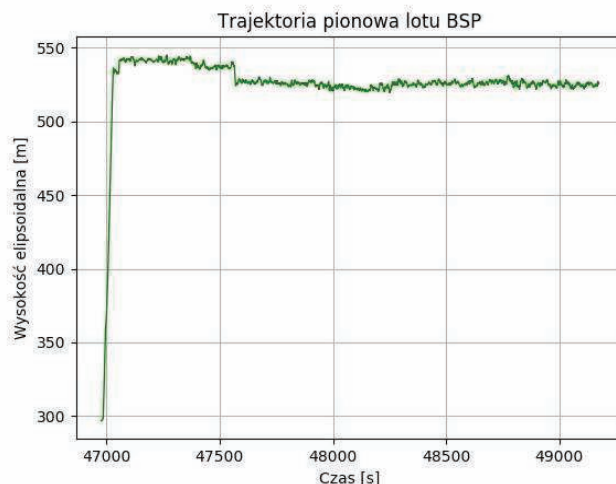
się w kwietniu 2020 r. w okolicach Warszawy w Polsce. Na pokładzie platformy BSP zamontowany został jednoczesotliwościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS, który rejestrował surowe obserwacje satelitarne GPS oraz poprawki z systemu wspomagania EGNOS od satelity S123. Lot trwał od godziny 13:02:55 do godziny 13:39:35 według czasu systemu GPST (GPS Time). Na Rys. 1 pokazano szkic trajektorii poziomej lotu BSP, zaś na Rys. 2 przedstawiono szkic trajektorii pionowej lotu. Wysokość lotu nie przekraczała 550 m.

Drugi etap eksperymentu dotyczył wykonania obliczeń nawigacyjnych i analiz numerycznych uzyskanych wyników badań. Na tym etapie obliczenia zostały wykonane w oprogramowaniu gLAB v.5.5.1 w module pozycjonowania SBAS [9]. W trakcie wykonywania obliczeń moduł pozycjonowania SBAS został skonfigurowany w następujący sposób:

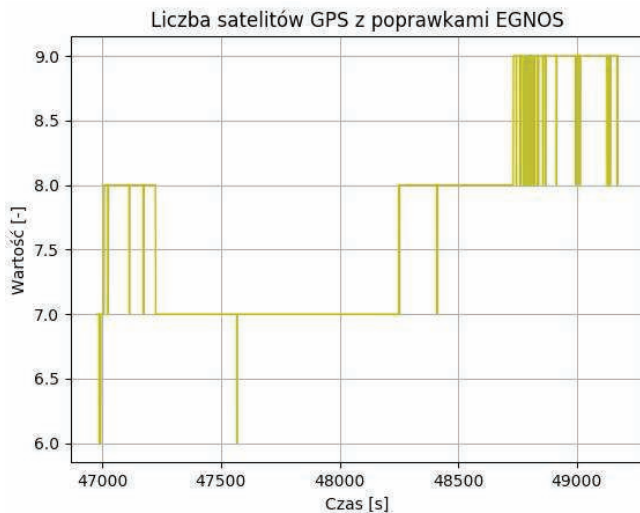
- dane obserwacyjne: plik obserwacyjny RINEX w formacie 2.11,
- źródło danych orbitalnych i zegar satelity: depesza nawigacyjna GPS + poprawki EGNOS,
- źródło poprawek SBAS: poprawki EGNOS w formacie EMS,
- interwał obliczeń: 1 s,
- maska obcięcia obserwacji: 50,
- tryb pozycjonowania: kinema-



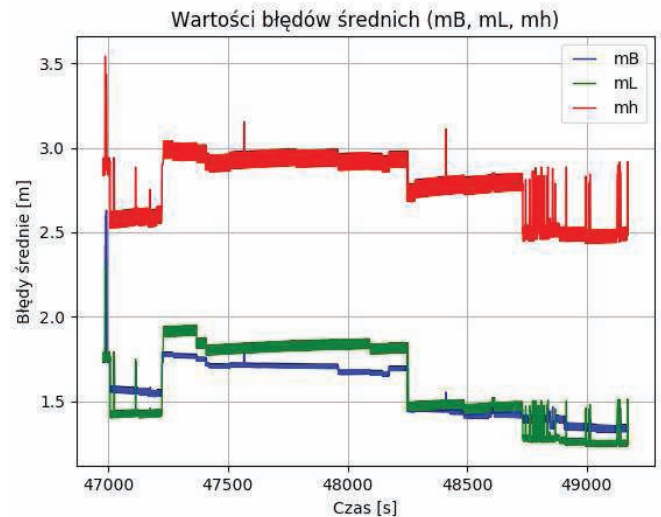
1. Trajektoria pozioma lotu BSP [opr. wł.]



2. Trajektoria pionowa lotu BSP [opr. wł.]



3. Liczba satelitów GPS, dla których wypracowano poprawki EGNOS [opr. wł.]



4. Błędy średnie wyznaczenia pozycji BSP z rozwiązania SBAS/EGNOS [opr. wł.]

tyczny,

- metoda wyznaczenia niewiadomych parametrów: filtracja Kalmana w przód,
- rodzaj obserwacji GPS: obserwacje kodowe L1-C/A,
- model jonosfery: model SBAS/EGNOS,
- model troposfery: model RTCA-MOPS dla system EGNOS,
- układ współrzędnych: układ WGS-84.

Wyniki badań i dyskusja

Prezentację wyników badań rozpoczęto od określenia liczby satelitów GPS, dla których określono poprawki EGNOS. Na Rys. 3 pokazano liczbę satelitów GPS dla rozwiązania nawigacyjnego pozycji BSP. Należy zaznaczyć, że wyniki pokazane na Rys. 3 dotyczą satelitów GPS, dla których program gLAB obliczył poprawki z systemu EGNOS. Liczba satelitów GPS podczas lotu wynosiła od 6 do 9. Przy czym najmniejsza liczba satelitów GPS była widoczna w początkowej fazie lotu i wynosiła od 6 do 8. Natomiast największa liczba satelitów GPS była widoczna w końcowej fazie lotu i wyniosła od 8 do 9.

Na Rys. 4 przedstawiono wyniki błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP, zgodnie ze wzorem (4). W

szczegółowości pokazano wyniki obliczenia parametrów (mB, mL, mh). Wartości błędów średnich wyznaczenia składowej B pozycji BSP wynoszą od 1,3 m do 2,7 m. Z kolei wartości błędów średnich wyznaczenia składowej L pozycji BSP wynoszą od 1,2 m do 2,3 m. Natomiast wartości błędów średnich wyznaczenia składowej h pozycji BSP wynoszą od 2,5 m do 3,6 m. Jak można zauważyć wysokość elipsoidalna jest wyznaczana z największym błędem średnim. Z kolei współrzędne horyzontalne B i L są najlepiej wyznaczane.

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla płaszczyzny 2D, obliczonych zgodnie ze wzorem (5) [8]:

$$DR = \sqrt{mB^2 + mL^2} \quad (5)$$

Wartości wypadkowych błędów średnich w płaszczyźnie 2D zależą głównie od parametrów (mB, mL). Wartości wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP w płaszczyźnie poziomej 2D wynoszą od 1,8 m do 3,3 m. Najgorsze wyniki parametru DR są zauważalne w początkowej fazie lotu. Z kolei najlepsze wyniki parametru DR są widoczne w końcowej fazie, na co wpływ ma liczba satelitów GPS w rozwiązaniu nawigacyjnym pozycji

BSP.

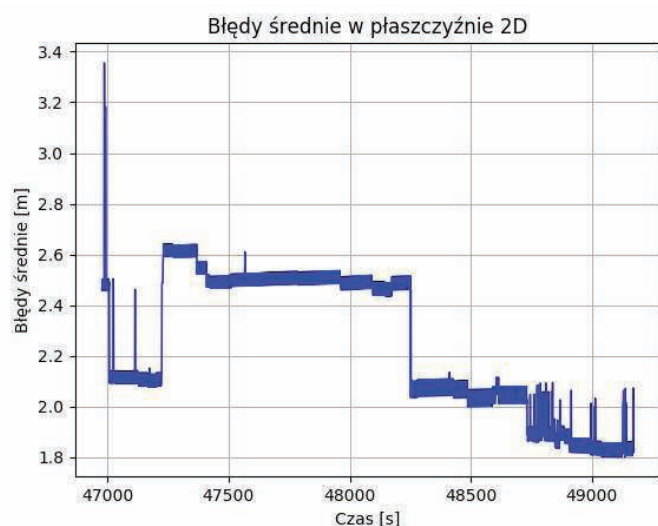
Na Rys. 6 przedstawiono wyniki wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla przestrzeni 3D, obliczonych zgodnie ze wzorem (6) [8]:

$$DS = \sqrt{mB^2 + mL^2 + mh^2} \quad (6)$$

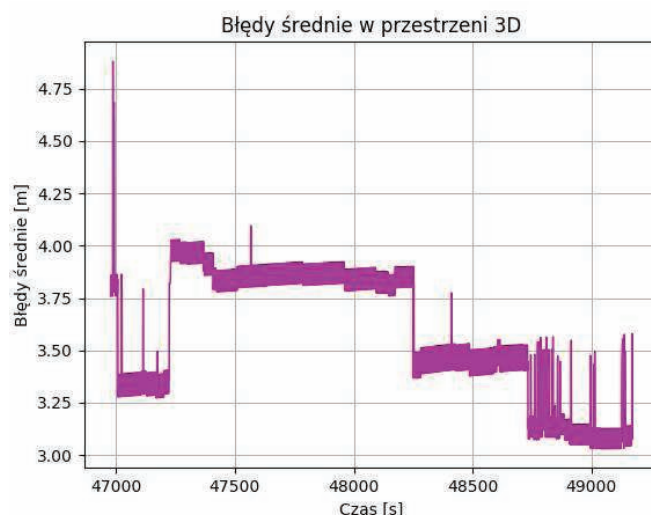
Wartości wypadkowych błędów średnich w płaszczyźnie 2D zależą głównie od parametrów (mB, mL, mh). Wartości wypadkowych błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP w przestrzeni 3D wynoszą od 3,1 m do 4,8 m. Najgorsze wyniki parametru DS są zauważalne w początkowej fazie lotu, kiedy liczba satelitów GPS wynosi od 6 do 8. Z kolei najlepsze wyniki parametru DS są widoczne w końcowej fazie, na co wpływ ma liczba satelitów GPS w rozwiązaniu nawigacyjnym pozycji BSP.

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki współczynników geometrycznych DOP (Dilution of Precision), obliczonych zgodnie ze wzorem (6) [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} HDOP = \sqrt{N^{-1}(1,1) + N^{-1}(2,2)} \\ VDOP = \sqrt{N^{-1}(3,3)} \\ TDOP = \sqrt{N^{-1}(4,4)} \\ GDOP = \sqrt{N^{-1}(1,1) + N^{-1}(2,2) + N^{-1}(3,3) + N^{-1}(4,4)} \end{array} \right. \quad (7)$$



5. Wypadkowa wartość błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla płaszczyzny 2D [opr. wł.]



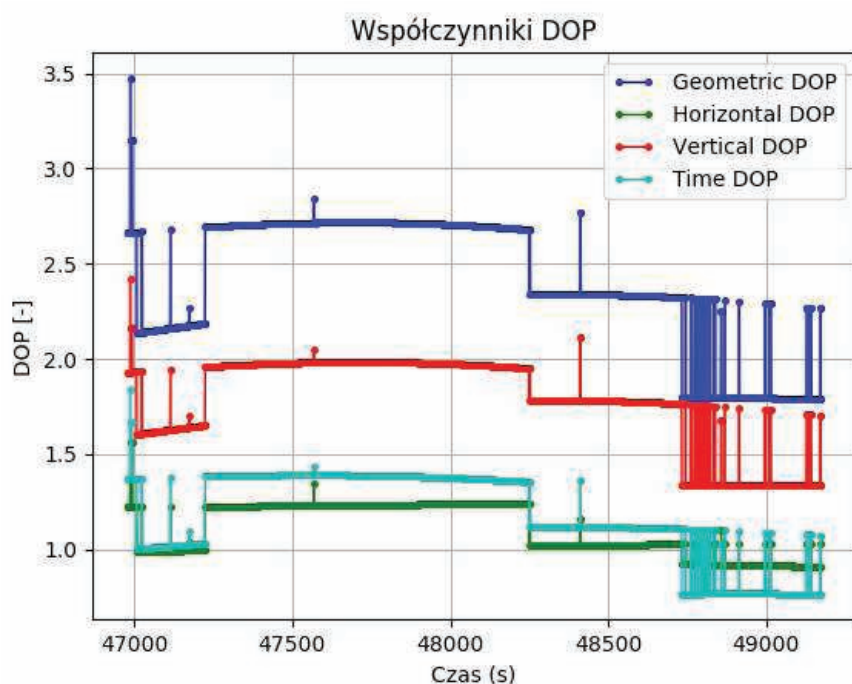
6. Wypadkowa wartość błędów średnich wyznaczenia pozycji BSP dla przestrzeni 3D [opr. wł.]

W trakcie badań wyznaczono następujące współczynniki DOP: GDOP (Geometric DOP), HDOP (Horizontal DOP), VDOP (Vertical DOP) oraz TDOP (Time DOP). Wartości współczynników DOP wynoszą odpowiednio: 1,8 do 3,5 dla GDOP, 0,9 do 1,5 dla HDOP, 1,3 do 2,4 dla VDOP oraz 0,7 do 1,8 dla TDOP. Należy zaznaczyć, że największe wartości współczynników DOP są w początkowej fazie lotu BSP, kiedy liczba satelitów GPS wynosi od 6 do 8. Z kolei w końcowej fazie lotu BSP, wartości współczynników DOP są mniejsze niż 2,4.

Wnioski

W pracy dokonano przedstawienia wyników badań dotyczących wyznaczenia pozycji BSP z użyciem metody SBAS/EGNOS. W badaniach wykorzystano dane GPS i poprawki EGNOS zarejestrowane przez jednoznacznościowy odbiornik AsteRx-m2 UAS zamontowany na platformie bezzałogowej BSP. Lot testowy odbył się w kwietniu 2020 r. w okolicach Warszawy w Polsce i trwał od godziny 13:02:55 do godziny 13:39:35 według czasu GPST. Obliczenia nawigacyjne

do badań wykonano w programie gLAB v.5.5.1. W szczególności w pracy wyznaczono współrzędne lotu BSP, błędy średnie wyznaczenia współrzędnych pozycji BSP, liczbę satelitów GPS z dostępnymi poprawkami EGNOS oraz współczynniki geometryczne DOP. W trakcie wykonanych obliczeń stwierdzono, że wartości błędów średnich wyznaczonych współrzędnych BSP nie przekraczają 3,6 m, zaś maksymalna wartość współczynnika geometrycznego GDOP jest mniejsza niż 3,5. ◀



7. Współczynniki geometryczna DOP dla wyznaczonej pozycji BSP [opr. wł.]

Materiały źródłowe

- [1] Krasuski K., Wierzbicki D., Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies*, 2021, 14, 739. <https://doi.org/10.3390/en14030739>.
- [2] Ciećko A., Grunwald G., Examination of Autonomous GPS and GPS/EGNOS Integrity and Accuracy for Aeronautical Applications. *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 2017, 61, 920–928, <https://doi.org/10.3311/PPci.10022>.
- [3] Krasuski K., Wierzbicki D., Bakula M., Improvement of UAV Positioning Performance Based on EGNOS+SDCM Solution. *Remote Sens.*, 2021, 13, 2597. <https://doi.org/10.3390/rs13132597>.
- [4] Grunwald G., Kaźmierczak R., Rozkład poprawek EGNOS w czasie, *Logistyka*, 2012, nr 3, str. 995–1000.
- [5] Krzykowska K., Siergiejczyk M., Signal monitoring as a part of maintenance of navigation support system in civil aviation, *Archives of Transport System Telematics*, vol. 7, 2014, pp. 36–40.
- [6] Krasuski K., Wierzbicki D., Monitoring Aircraft Position Using EGNOS Data for the SBAS APV Approach to the Landing Procedure. *Sensors*, 2020, 20, 1945. <https://doi.org/10.3390/s20071945>.
- [7] Krasuski K., The Research of Accuracy of Aircraft Position Using SPP Code Method. Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2019; pp. 1–106. (In Polish).
- [8] Osada E., *Geodesy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej: Wrocław, Poland, 2001; Volume 92, ISBN 83-7085-663-2. (In Polish)
- [9] <https://gage.upc.edu/gLAB/>, [dostęp: 01.03.2021].
- [10] Specht C., Mania M., Skóra M., Specht M., Accuracy of the GPS positioning system in the context of increasing the number of satellites in the constellation. *Pol. Marit. Res.*, 2015, 22, 9–14, DOI: 10.1515/pomr-2015-0012.

REKLAMA

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com

Kontrola stanu technicznego rusztowań budowlanych z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych

Inspection of the technical condition of scaffolding using unmanned aerial



Tomasz Nowobilski

Mgr inż.

Katedra Inżynierii Materiałów
i Procesów Budowlanych,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

tomasz.nowobilski@pwr.edu.pl



Mariusz Szóstak

Dr inż.

Katedra Budownictwa Ogólnego,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

mariusz.szostak@pwr.edu.pl

Streszczenie: Bezzałogowe statki powietrzne są urządzeniami powszechnie wykorzystywanymi w różnych gałęziach przemysłu. Ich dostępność sprawia, że stają się również pomocnym narzędziem inżyniera na nowoczesnej budowie. W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych na potrzeby przeprowadzenia kontroli stanu technicznego rusztowania budowlanego o powierzchni ok. 1 500 m². Rusztowanie usytuowane było na terenie budowy budynku wielorodzinnego. W wyniku przeprowadzonego nalotu BSP uzyskano szereg cennych informacji, które następnie zostały poddane szczegółowej analizie w celu zidentyfikowania newralgicznych elementów konstrukcji rusztowań, które stwarzały zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy. Dodatkowym efektem przeprowadzonej analizy jest opracowana chmura punktów, która przedstawia szczegółową geometrię rusztowania i umożliwia analizę odkształceń konstrukcji.

Słowa kluczowe: Bezzałogowy statek powietrzny; Dron, rusztowanie budowlane; Budownictwo; Bezpieczeństwo pracy

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) are devices that are commonly used in various industries. Their availability makes them also a helpful tool for an engineer on a modern construction site. The article presents the possibility of using unmanned aerial vehicles for the inspection of the technical condition of the scaffolding with an area of approx. 1.500 m². As a result of the conducted UAV trials, a lot of valuable information was obtained, which was then subjected to a detailed analysis in order to identify critical elements of the scaffolding that posed a threat to work safety. An additional effect of the analysis is the developed point cloud, which shows the detailed geometry of the scaffolding and enables the analysis of the deformation of the structure

Keywords: Unmanned aerial vehicle; Drone, Scaffolding; Construction industry; Occupational health and safety

Wprowadzenie

Rusztowania budowlane stanowią konstrukcję tymczasową, powszechnie stosowaną w branży budowlanej, których głównym zadaniem jest zapewnienie bezpiecznego dostępu do miejsc usytuowanych na wysokości w trakcie prowadzenia prac budowlanych [1].

Wszystkie rusztowania budowlane muszą spełniać szereg wymagań formalno-prawnych, niezbędnych do zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Obecnie w Polsce obowiązuje kilkadziesiąt norm, a także około 30

aktów prawnych związanych z rusztowaniami budowlanymi [1], [2]. Z powyższych przepisów wynika m.in., że wszystkie rusztowania budowlane powinny być: wykonywane, montowane, eksploatowane i demontowane zgodnie z dokumentacją lub instrukcją producenta (w przypadku typowych konfiguracji rusztowań systemowych) albo według indywidualnego projektu (w pozostałych przypadkach) [3]. Do użytkowania dopuszczone może być tylko kompletnie i poprawnie zmontowane rusztowanie, posiadające odpowiednie oznakowanie i uzie-

kierownika budowy lub uprawnioną osobę. Przepisy [4] nakazują również wykonanie dodatkowego przeglądu rusztowania m.in. po: wystąpieniu opadów atmosferycznych lub silnego wiatru, przerwach roboczych dłuższych niż 10 dni oraz minimum raz w miesiącu. Prawidłowo przeprowadzony przegląd rusztowania powinien w szczególności pozwolić na identyfikację nieprawidłowości konstrukcji, które mogą wpłynąć na prawidłowy i bezpieczny przebieg dalszych prac budowlanych.

Dotychczas dostępna i możliwa forma przeprowadzenia kontroli sta-

Tab. 1. Parametry techniczne urządzenia zastosowanego w trakcie kontroli

Parametr	Wartość
Masa urządzenia (MTOM)	1,4 kg
Maksymalny czas lotu	do 30 min (teoretyczny) do 20-25 min (praktyczny)
Maksymalna rozdzielczość zdjęć	20 Mpix
Maksymalna rozdzielczość materiału wideo	4K (60 kl./s.)

nu technicznego rusztowania wiązała się z koniecznością wejścia osoby sprawdzającej na rusztowanie. Wraz z rozwojem bezzałogowych statków powietrznych możliwe staje się wykorzystanie nowych technologii w procesie kontroli. Celem przedstawionych w artykule badań i analiz jest wskazanie możliwych obszarów zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w trakcie oceny stanu technicznego rusztowań w budownictwie.

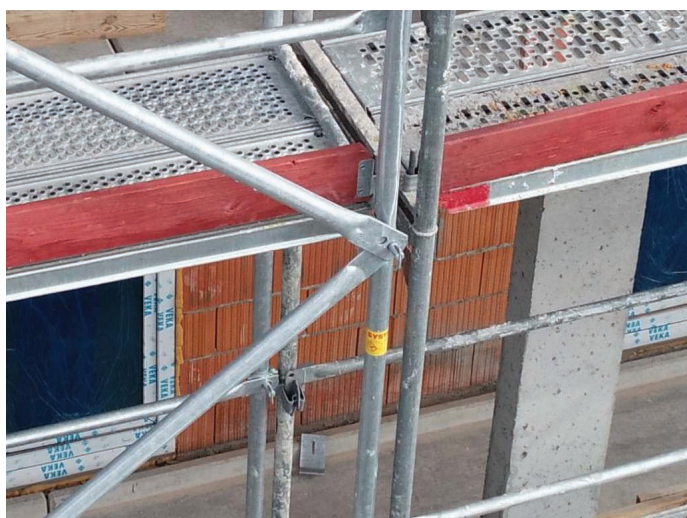
Przedmiot badań i stosowane narzędzia

Badania i analizę wykorzystania dronów na potrzeby przeprowadzenia kontroli stanu technicznego rusztowań budowlanych przeprowadzono we Wrocławiu, na terenie kilku budowli wielorodzinnych. Każdorazowo w trakcie kontroli wykorzystano bezzałogowy statek powietrzny firmy DJI model Phantom 4 PRO V2.0. Podstawowe parametry urządzenia przedstawiono w tabeli 1.

Wykonanie operacji lotniczej z użyciem bezzałogowego statku powietrznego wiąże się z koniecznością spełniania szeregu wymagań, które regulują odpowiednie przepisy prawne [5]. Zgodnie z obowiązującymi przepisami wykonanie operacji lotniczej dronem w pobliżu zabudowań możliwe jest wyłącznie w kategorii „szczegól-

nej”, według „scenariusza standardowego” (STS), w którym to przedstawione zostały wymagania dotyczące dronów oraz maksymalnych parametrów lotu, m.in. wysokości i odległości. Dodatkowo pilot bezzałogowego statku powietrznego wykonujący operację w kategorii „szczególnej” zobowiązany jest posiadać odpowiednie uprawnienia i powinien być zarejestrowany w systemie operatorów systemów bezzałogowych statków powietrznych.

Należy zwrócić również uwagę, że jednym z ważniejszych elementów, które w dużym stopniu mogą wpływać na możliwość wykonania operacji lotniczej i jej bezpieczeństwo, są ograniczenia wynikające z budowy struktury przestrzeni powietrznej.



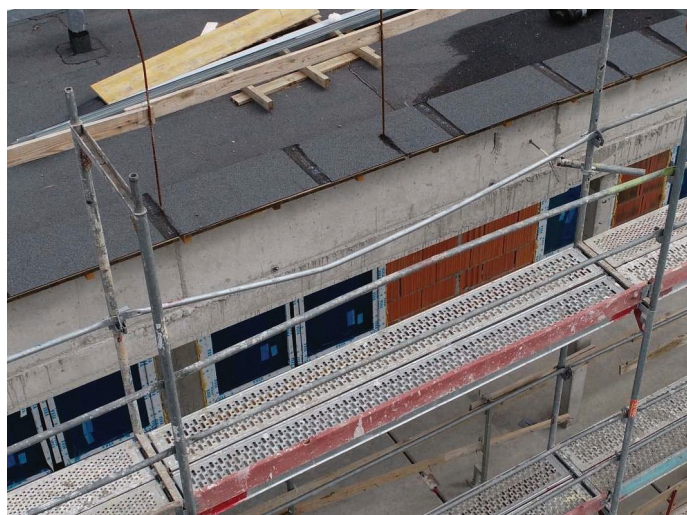
1. Widok na szczegół konstrukcyjny rusztowania – połączenie



2. Widok na pion stępujący rusztowanie



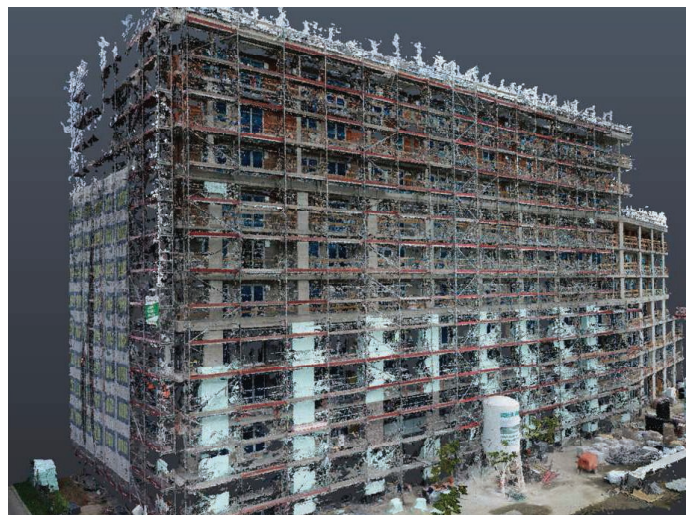
3. Widok na wciągarkę



4. Widok na uszkodzoną poręcz



5. Widok na uszkodzoną deskę krawężnikową



6. Widok ogólny na opracowaną chmurę punktów

Ocena stanu technicznego rusztowania budowlanego – studium przypadku

Poniżej przedstawiono przykładowy przebieg kontroli stanu technicznego jednego z wrocławskich rusztowań budowlanych. Powierzchnia analizowanego rusztowania systemowego wynosiła ok. 1 500 m². Inspekcji poddano wszystkie newralgiczne elementy konstrukcji rusztowania, takie jak: połączenia, stężenia, elementy zabezpieczające i inne. Wykonanie inspekcji rusztowania z wykorzystaniem drona znacząco skróciło czas jej trwania do około 30 minut i pozwoliło uzyskać, w sposób bezpieczny, bez zagrożeń i sytuacji potencjalnie wypadkowych, obszerny materiał fotograficzny oraz filmowy.

Przykładowo na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie wykonane za pomocą kamery drona szczegół, na którym można zaobserwować połączenie pomostu roboczego i stężeń z ramą główną.

Pozyskany obszerny materiał zdjęciowy oraz filmowy pozwolił wykonać szczegółową ocenę geometrii rusztowania i analizę składowych elementów rusztowania bez konieczności wejścia na badane rusztowanie. Ocena geometrii i stanu technicznego rusztowań za pomocą zgromadzonego materiału badawczego może być wykonana zarówno w aspekcie ilościowym (np.

Tab. 2. Zalety i ograniczenia wynikające z zastosowanie bezzałogowego statku powietrznego na potrzeby kontroli rusztowań budowlanych

Zalety	Ograniczenia
• Szybkie pozyskanie materiału fotograficznego i filmowego w wysokiej rozdzielczości, • Znaczące skrócenie czasu niezbędnego na przeprowadzenie kontroli stanu technicznego rusztowania w porównaniu do metod tradycyjnych, • Możliwość dotarcia do trudnodostępnych części rusztowania – m.in. usytuowanych na wysokości, • Ograniczenie ryzyka dla osób wchodzących na rusztowanie w sytuacji braku pewności co do stateczności rusztowania, • Zlokalizowanie drobnych uszkodzeń w konstrukcji rusztowania, mogących stwarzać zagrożenia dla bezpieczeństwa pracy.	• Utrudniony dostęp do elementów rusztowania zlokalizowanych od strony elewacji budynku, • Konieczność posiadania odpowiednich kwalifikacji umożliwiających wykonywanie operacji lotniczych z użyciem dronów, • Uzależnienie możliwości wykonania lotów od warunków terenowych i atmosferycznych (m.in. opady atmosferyczne lub prędkość wiatru powyżej 10 m/s w większości BSP znacząco utrudnia lub uniemożliwia wykonanie lotu), • Konieczność stosowania się do ograniczeń występujących w przestrzeni powietrznej,

weryfikacja kompletności elementów składowych konstrukcji) jak i jakościowym (np. identyfikacja uszkodzeń) w zakresie m.in.: poprawności montażu stężeń, balustrad i desek krawężnikowych (rys. 2) oraz elementów wyposażenia rusztowania, np. wciągarek (rys. 3).

Wykorzystany w trakcie kontroli dron umożliwił również sprawne zlokalizowanie uszkodzeń konstrukcji, które mogą stanowić źródło zagrożeń dla użytkowników rusztowania. Przykładem takiego uszkodzenia może być wygięta poręcz (rys. 4) lub pęknięta deska krawężnikowa (rys. 5).

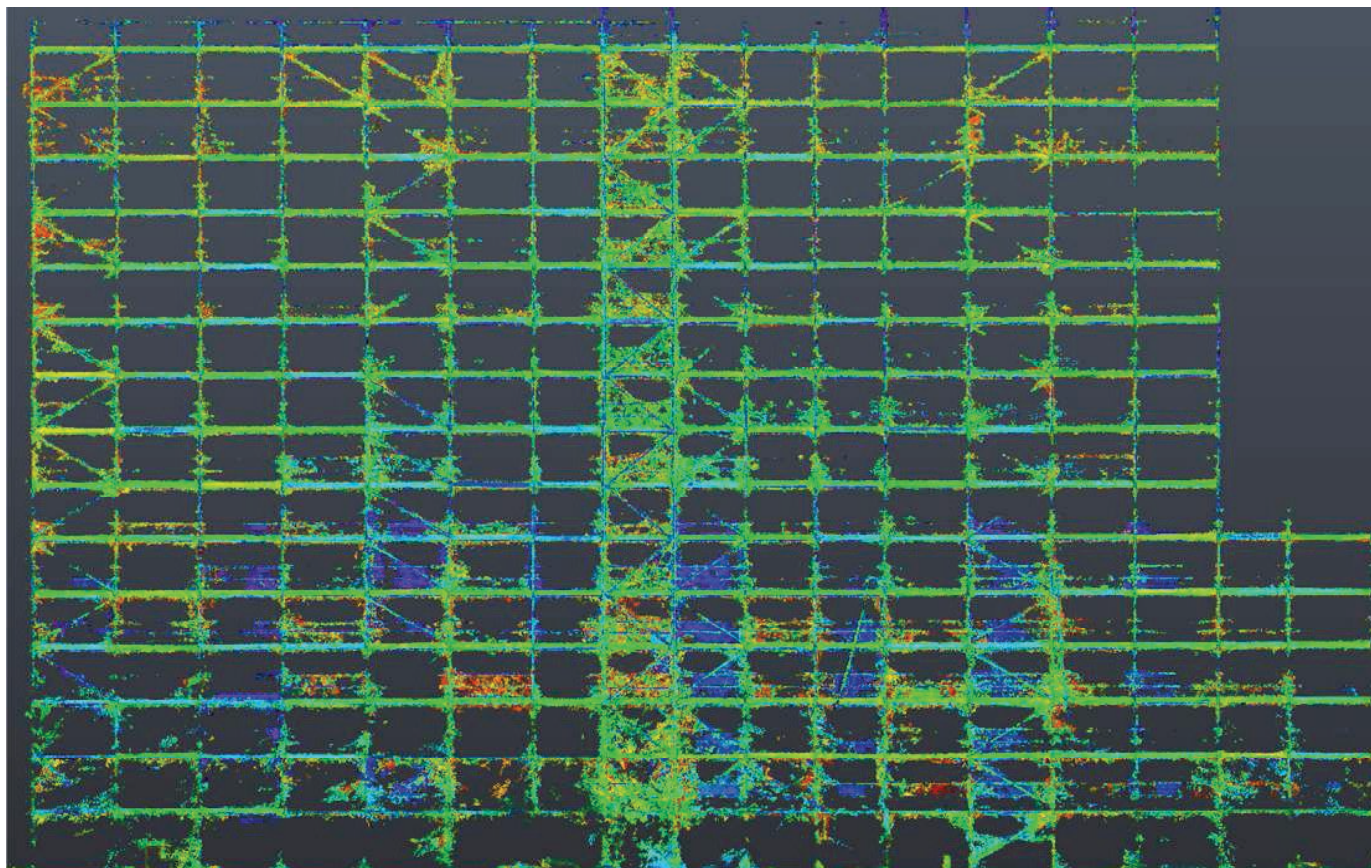
Wykonane w trakcie nalotu zdjęcia, w odległości ok. 10-15 m od rusztowania, pozwoliły na opracowanie chmury punktów konstrukcji. Do jej opracowania wykorzystano technikę fotogrametrii, pozwalającą na uzyskanie przestrzennego odzwierciedlenia

rzeczywistych obiektów na podstawie zdjęć [6] oraz oprogramowaniu ReCap firmy Autodesk. Opracowana chmura punktów (rys. 6) charakteryzuje się wysokim zagęszczeniem punktów (łączna liczba punktów: 104 306 967), gdzie każdy punkt posiada przypisane współrzędne w przestrzeni 3-wymiarowej (X, Y, Z) oraz barwę (opisaną współrzędnymi RGB).

Analiza opracowanej chmury punktów pozwala m.in. na identyfikację schematu statycznego konstrukcji oraz pomiar ewentualnych odkształceń (rys. 7).

Podsumowanie

Analiza zastosowania bezzałogowego statku powietrznego w trakcie oceny stanu technicznego rusztowania budowlanego pozwoliła na wskazanie najważniejszych korzyści i ograniczeń,



7. Widok na zewnętrzną połąć rusztowania – chmura punktów

wynikających z zastosowania bezzałogowych statków powietrznych jako narzędzia wspomagającego kontrolę. Najważniejsze z nich zestawiono w tab. 2.

Wnioski

Obowiązek przeprowadzenia kontroli stanu technicznego rusztowania budowlanego jest wymogiem niezbędnym do bezpiecznego jego użytkowania. Jak wykazano w artykule narzędziem wspomagającym kontrolę oraz przyczyniającym się do znacznego ograniczenia czasu niezbędnego na jej przeprowadzenie są bezzałogowe statki powietrzne. Drony umożliwiają szybkie i bezpieczne gromadzenie szczegółowego materiału fotograficznego oraz filmowego w wysokiej rozdzielczości bez konieczności wchodzenia na rusztowanie. Taka funkcjonalność dronów przyczynia się to do znacznego ograniczenia narażenia pracowników wykonujących kontrolę na czynniki ryzyka, występujące na terenie budowy, w szczególności

na rusztowaniach budowlanych.

Ponadto, poprawnie zgromadzony materiał fotograficzny umożliwia wizualną ocenę stanu technicznego rusztowania, sprawdzenie kompletności wszystkich elementów składowych oraz wczesne wykrycie uszkodzeń, które mogą powodować zagrożenia dla bezpiecznej pracy. Dodatkowo, wykorzystując odpowiednie oprogramowanie komputerowe możliwe jest dalsze przetwarzanie zgromadzonego materiału. Umożliwia to m.in. opracowanie tzw. chmury punktów badanego rusztowania, która przedstawienie rzeczywistą geometrię rusztowania w przestrzeni trójwymiarowej (3D).

Należy jednak pamiętać, że operacje z wykorzystaniem dronów mogą być wykonywane przez osoby posiadające odpowiednie uprawnienia, a na prawidłowy i bezpieczny przebieg operacji wpływ ma szereg czynników związanych m.in. z uwarunkowaniami terenowymi i atmosferycznymi. ◀

Materiały źródłowe

- [1] P. Kmiecik, D. Gnot, R. Jurkiewicz, E. Nowicka-Słowik, and M. Brajza, Rusztowania robocze ochronne. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018
- [2] E. Błazik-Borowa and M. Pieńko, Scaffoldings. Lublin: Politechnika Lubelska, 2017
- [3] P. Kmiecik and D. Gnot, Budownictwo. Bezpieczne rusztowania. Warszawa: Państwowa Inspekcja Pracy, 2016
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych (Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401)
- [5] Urząd Lotnictwa Cywilnego, "Bezzałogowe statki powietrzne," <https://ulc.gov.pl/pl/drony>, Mar. 2022
- [6] Kurczyński Zdzisław, Fotogrametria. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie

Application of unmanned aerial vehicles in construction industry



Mariusz Szóstak

Dr inż.

Katedra Budownictwa Ogólnego,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

mariusz.szostak@pwr.edu.pl



Tomasz Nowobilski

Mgr inż.

Katedra Inżynierii Materiałów
i Procesów Budowlanych,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

tomasz.nowobilski@pwr.edu.pl

Streszczenie: Bezzałogowe statki powietrzne, potocznie nazywane dronami, są szeroko stosowane w wielu sektorach gospodarki, m.in. w: górnictwie, rolnictwie, medycynie, ekologii, transporcie. Na podstawie wykonanego systematycznego przeglądu literatury wynika, że drony mają również szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. w: inspekcjach budowlanych, ocenie zniszczeń (szkód, uszkodzeń), pomiarach terenu (inventaryzacje, mapowanie terenu), inspekcjach stanu bezpieczeństwa, monitorowaniu postępów prac, konserwacji budynków, a także badaniach termowizyjnych.

Słowa kluczowe: Bezzałogowy statek powietrzny; Dron; Przegląd literatury; Budownictwo; Bezpieczeństwo pracy

Abstract: Unmanned aerial vehicles, commonly known as drones, are widely used in many sectors of the economy, including in: mining, agriculture, medicine, ecology, transport. The systematic literature review shows that drones are also widely used in construction, including: construction inspections, damage assessment, area measurements (inventory, area mapping), safety inspections, monitoring of the work progress, maintenance buildings, as well as thermographic researches

Keywords: Unmanned aerial vehicles; drone; Literature review, Construction industry; Occupational health and safety

Wprowadzenie

Era wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych (UAV - the unmanned aerial vehicles), tzw. dronów wyłącznie do celów wojskowych to już historia. W ciągu ostatniej dekady bezzałogowe statki powietrzne były wykorzystywane w szerokim zakresie w sektorze cywilnym i komercyjnym.

Obecnie drony są szeroko stosowane w wielu sektorach gospodarki, m.in. w: górnictwie, rolnictwie, medycynie, ekologii, transporcie. Bezzałogowe systemy powietrzne mają również szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. w: inspekcjach budowlanych [1,2], ocenie zniszczeń (szkód, uszkodzeń), pomiarach terenu (inventaryzacje, mapowanie terenu), inspekcjach stanu bezpieczeństwa, monitorowaniu postępów prac [3],

konserwacji budynków, a także badaniach termowizyjnych [4].

Należy być świadomym, że bezzałogowe statki powietrzne stwarzają nowe, dotychczas niewystępujące zagrożenia w budownictwie. Nowe zagrożenia związane są z nieustannym rozwojem nowych technologii, a także ciągłej automatyzacji i robotyzacji branży budowlanej. Chociaż istnieją badania na temat korzyści jakie nowe technologie, w tym drony, przyniosą branży budowlanej to w dalszym ciągu brakuje ilościowych badań analizujących wpływ użytkowania bezzałogowych statków powietrznych na zdrowie i bezpieczeństwo pracowników. Analiza czynników wpływających na bezpieczeństwo wykonywania operacji z użyciem bezzałogowych statków powietrznych wskazuje, że głównymi przyczynami wypadków są błędy ludzkie oraz pro-

blemy techniczne.

Stosowanie bezzałogowych systemów powietrznych (UAS - the unmanned aerial system) pozwala na osiągnięcie kilku istotnych korzyści w zakresie bezpieczeństwa w budownictwie. Po pierwsze drony mogą poruszać się szybciej niż ludzie, a także mogą docierać do niedostępnych lub trudno dostępnych dla człowieka miejsc – np. zlokalizowanych na wysokości z brakiem możliwości wejścia [5]. Zastosowanie dronów może znacznie poprawić bezpieczeństwo pracy m.in. w pobliżu poruszających się pojazdów na placu budowy, w strefie pracy żurawia/dźwigu budowlanego, w pobliżu niezabezpieczonych krawędzi i otworów, a także w obszarze tzw. „martwego pola” podczas użytkowania ciężkiego sprzętu budowlanego.

Systematyczny przegląd literatury

Dokonano systematycznego przeglądu dostępnej literatury. W przeglądzie literatury uwzględniono tylko artykuły występujące w bazie Web of Science z ostatniej dekady (od stycznia 2011 do grudnia 2021), aby zapewnić, że informacje zawarte w artykułach są aktualne. Do wykonania przeglądu literatury wybrano następujące słowa kluczowe, które mogły występować w tytule, streszczeniu pracy lub w słowach kluczowych, a mianowicie: „drone”, „unmanned aerial vehicle”, „construction”. Aby ocenić trafność wybranych prac, ustalono zestaw kryteriów wykluczających publikacje na podstawie ich treści i typu publikacji. Po pierwsze, zidentyfikowano i wykluczono te prace, które nie przedstawiały bezpośrednio badań lub analiz dotyczących zastosowań bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie. Następnie weryfikacji podlegał rodzaj pracy, aby upewnić się, że publikacje pochodzą z recenzowanych czasopism lub materiałów konferencyjnych. Na koniec dokonano przeglądu manuskryptów, aby upewnić się, że w treści artykułu omówiono przynajmniej jedno ze słów kluczowych tego badania. Po ocenie przyrostowej uzyskano 40 publikacji. Zakres tematyczny artykułów dotyczył 5 głównych obszarów:

1. artykuły przeglądowe (12 artykułów),
2. klasyfikacja dronów (8 artykułów),
3. planowanie lotu (4 artykuły),
4. bezpieczeństwo pracy (8 artykułów),
5. analizy studiów przypadku (8 artykułów).

W sytuacji, w której artykuł podejmował kilka z wyżej wymienionych obszarów tematycznych, został on zakwalifikowany tylko do jednego, wiodącego obszaru.

Artykuły przeglądowe

W tej grupie artykułów znalazły się prace, które przedstawiają aktualny stan wiedzy w zakresie zastosowania

bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie lub omawiają obowiązujące przepisy prawne, które regulują zasady poruszania się dronów w powietrzu [6,7]. Artykuły te omawiają dotychczasowe wyniki oryginalnych badań naukowych m.in. w zakresie analizy obecnego stanu badań nad zastosowaniem dronów w USA [8], a także w Indiach [9]. W analizowanych pracach przedstawiono możliwości zastosowania bezzałogowych statków powietrznych do zarządzania placem budowy, a w szczególności do monitorowania postępu prac i inspekcji budowlanych, poprawy logistyki w miejscu pracy, oceny warunków bezpieczeństwa pracy i szkód powstałych w wyniku katastrof [10,11].

Drugim występującym w literaturze zastosowaniem dronów w budownictwie, poza zarządzaniem na placu budowy, jest możliwość wykonywania pomiarów fotogrametrycznych, za pomocą zdjęć wykonywanych na placu budowy. Zdjęcia wykonane przy pomocy drona pozwalają na opracowanie m.in. ortofotomap i numerycznych modeli terenu [12]. Zastosowanie odpowiedniego oprogramowania fotogrametrycznego pozwala na integrację zgromadzonych i opracowanych danych z modelami informacji o budynku wspierającymi technologię BIM [13] i może być wykorzystane do oceny postępu projektu [14], a także sprawdzenia zgodności geometrycznych w modelu projektowym [15]. Bezzałogowe statki powietrzne wyposażone odpowiednio w kamerę termowizyjną mogą mieć zastosowanie również w termografii budowlanej [16], a po odpowiednim przygotowaniu mogą być również wykorzystywane do inspekcji budynków w pomieszczeniach zamkniętych [17].

Klasyfikacja dronów

W budownictwie powszechnie stosowane są dwa typy bezzałogowych statków powietrznych: wiropląt i stałopłat. Urządzenia z obrotowymi wirnikami (wiropląt) charakteryzują się zdolnością do zawisu, pionowego

startu i lądowania [18]. W zależności od liczby wirników mogą to być śmigłowce lub wielowirnikowce [19]. Zasada wytwarzania siły nośnej przez wirnikowce czyni je potencjalnie lepszą platformą dla małych i średnich projektów lub pionowych typów konstrukcji. Urządzenia zdalnie sterowane w formie stało płatowca (przypominające swoim kształtem samoloty i latające skrzydła) charakteryzują się zdolnością do długotrwałego utrzymania się w powietrzu bez potrzeby lądowania. Przekłada się to bezpośrednio na możliwość wykonywania nalotów na dużych obszarach. Takie możliwości sprawiają, że są one lepszą platformą do dużych projektów, w szczególności liniowych [20]. Głównymi ograniczeniami stałopłatów wynikającymi z ich konstrukcji są: niezdolność do wykonywania zawisu i potrzeba stosowania dużej przestrzeni do startu i lądowania [21]. Poza standardowymi stosowanymi dotychczas typami bezzałogowych statków powietrznych projektuje się nowe, innowacyjne rozwiązania, nierzadko łączące korzyści płynące z obu typów. Dodatkowo, podczas projektowania i konstruowania nowych konstrukcji bierze się pod uwagę możliwość: wykorzystania dotychczas niestosowanych do ich budowy materiałów [22], analizuje się możliwość dodania dodatkowych urządzeń [23] lub modyfikuje się dotychczasową konstrukcję, poprzez dodanie dodatkowych wirników [24]. Do ich budowy wykorzystuje się innowacyjne materiały i techniki, np. elementy wykonane przy użyciu technologii druku 3D [25].

Planowanie lotu

Niezależnie od rodzaju stosowanego sprzętu, istotne jest prawidłowe zaplanowanie przebiegu lotu jeszcze przed jego startem. Celem prowadzonych badań w tym zakresie jest m.in. optymalizacja trajektorii lotu, po której porusza się dron w trakcie monitorowania postępu prac [26]. Ważnym zagadnieniem jest również prawidłowe zaplanowanie lotu dla grupy dronów (tzw. „roju”) poruszających się nad ob-

szarami zurbanizowanymi, gdzie istnieją przeszkody o różnej wysokości. Celem prowadzonych badań jest znalezienie najlepszych trajektorii przy jednoczesnym zapewnieniu bezkolizyjnej nawigacji [27]. Kolejnym celem prowadzonych badań jest optymalizacja prędkości lotu, która zapewni, że dron spędzi najefektywniej czas na monitorowanie placu budowy, a także ukończy trasę w określonym czasie i bez wyczerpania baterii [28]. Z kolei wykonując pomiary fotogrametryczne ważny jest stopień szczegółowości gromadzonych danych, która pozwala na rozpoznanie elementów konstrukcyjnych oraz wewnętrzną spójność i precyzję pomiarów [29].

Bezpieczeństwo pracy

Bezzałogowe statki powietrzne skutecznie wykorzystuje się, aby poprawić stan bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiska pracy. Stosowanie bezzałogowych statków powietrznych pozwala m.in. wyeliminować potrzebę przebywania pracowników w strefach niebezpiecznych, wchodzenia do zamkniętych przestrzeni lub wykonywania pracy na wysokości. Należy jednak pamiętać, że bezzałogowe statki powietrzne mogą stwarzać nowe, dotychczas niewystępujące na placu budowy zagrożenia [30]. Możliwe zagrożenia i sytuacje potencjalnie wypadkowe należy zidentyfikować, ocenić ich ryzyko i podjąć niezbędne działania profilaktyczne, mające na celu przeciwdziałanie ich powstawaniu [31]. Jest to niezbędne, aby zapewnić bezpieczeństwo pracownikom wykonującym pracę w ich otoczeniu. Kluczową rolę odgrywa tutaj identyfikacja stosowanych rozwiązań, praktyk bezpieczeństwa i obowiązujących wymagań technicznych przy użyciu systemów powietrznych [32]. Niestabilne warunki lotu, błędy operatora i awarie sprzętu mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla pracujących w pobliżu pracowników [33]. Źle dobrana trajektoria lotu bezzałogowego statku powietrznego może doprowadzić do kolizji, która może spowodować obrażenia u ludzi

lub zwierząt, znaczne uszkodzenie sprzętu lub nawet utratę urządzenia [34]. Należy również zwrócić uwagę, że bezzałogowe statki powietrzne są urządzeniami zasilanymi energią elektryczną, które z kolei mogą stanowić potencjalnie źródło zapłonu dla materiałów łatwopalnych i pyłów palnych [35]. Dodatkowo bezzałogowe statki powietrzne na placu budowy mogą rozpraszać uwagę pracowników, a to może pogorszyć ogólne wyniki w zakresie bezpieczeństwa pracowników, zwiększając przy tym liczbę wypadków przy pracy bez bezpośredniego udziału drona [36]. Dotychczasowe badania pokazują również, że stres i zmęczenie użytkownika/pilota drona są głównymi przyczynami wypadków tych urządzeń [37].

Studium przypadków

Głównym celem prac należących do tej grupy artykułów jest przedstawienie praktycznego zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji i zastosowaniach. I tak na przykład bezzałogowy statek powietrzny został zastosowany do weryfikacji jakości gromadzonych danych i otrzymanej trójwymiarowej chmury punktów przez interesariuszy, o różnych stopniu doświadczenia, dla części ściany osłonowej dużej placówki opieki zdrowotnej zlokalizowanej w południowo-wschodnich Stanach Zjednoczonych [38]. Ciekawym zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych było np. zbadanie możliwości monitorowania deformacji powierzchni na budowach dróg ekspresowych w Korei. Dzięki zastosowaniu fotogrametrii niskiego pułapu opracowano ortofotomapę, cyfrowy model powierzchni terenu i model informacji topograficznej 3D placu budowy [39]. Za pomocą obrazów i fotogrametrii możliwe jest np. wykrycie i określenie liczby pojazdów pracujących na placu budowy [40]. Nietypowym przykładem było wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do montażu przewodów elektrycznych i uziemiających ze światłowodami. W przytoczonej

pracy opisano zastosowaną metodę rozwijania liny (przewodu) podczas budowanej wysokonapięciowej 400 kV linii Ostrołęka-Olsztyn Matki [41].

Nie mniej jednak jednym z najczęściej opisywanych w literaturze praktycznych zastosowań bezzałogowych statków powietrznych jest wykorzystanie ich do inspekcji budowlanych dla wszystkich rodzajów obiektów budowlanych, w tym również historycznych. I tak np. celem przeprowadzonej inspekcji budynku w historycznej rezydencji Tan Swee Hoe była ocena ogólnego stanu technicznego budynku. Innowacyjnym rozwiązaniem było wykonanie inspekcji wspomaganą obrazem uzyskanym przy pomocy bezzałogowego statku powietrznego [42]. Podobne techniki mają zastosowanie również w inżynierii lądowej, a w szczególności podczas inspekcji obiektów mostowych [43], np. trójprzęsłowego dźwigara z drewna klejonego warstwowo z kompozytowym pokładem położonym w pobliżu miasta Keystone w stanie Dakota Południowa [44] lub mostu w Skodsborg, o długości 140-m, wykonanego z betonu sprężonego, w okręgu Viken we wschodniej Norwegii [45]. Jak wiadomo mosty są krytycznym elementem infrastruktury w sieci systemu transportu drogowego i kolejowego. Znaczna część mostów w Europie osiąga obecnie projektowany okres eksploatacji, dlatego regularne przeglądy i konserwacje mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa ich dalszej eksploatacji. Tradycyjne procedury kontrolne i wymagane zasoby są czasochłonne i kosztowne. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych pozwala na skrócenie czasu i kosztów inspekcji tego typu konstrukcji, przyczyniając się równocześnie do minimalizacji ryzyka prowadzenia prac na wysokości i w trudno dostępnych dla człowieka miejscach.

Podsumowanie przeglądu literatury

Największą liczbę artykułów stanowiły prace przeglądowe, które stanowiły

30% wszystkich analizowanych publikacji. Często poruszonymi zagadnieniami, o tej samej liczbie wystąpień (8 artykułów) stanowiły prace przedstawiające klasyfikację bezzałogowych statków powietrznych, zagadnienia bezpieczeństwa pracy oraz analizy przypadków. Najmniejsza liczba artykułów, wynosząca zaledwie 4 artykuły (10% wszystkich prac), zajmowała się zagadnieniami związanymi z prawidłowym zaplanowaniem operacji lotniczej oraz bezpieczną pracą/lotem drona.

Pierwsza część analizowanego okresu (2015-2017) przedstawia niewielką liczbę artykułów. W 2018 r. liczba publikacji wzrosła prawie dwukrotnie w stosunku do roku poprzedniego (7 publikacji). W kolejnych latach liczba artykułów stale rośnie i w 2021 roku osiągnęła już wartość 10 publikacji. Zauważalny jest wyraźny trend wzrostowy i rosnące zainteresowanie zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie.

Najwięcej wyników badań pochodzi ze Stanów Zjednoczonych. Artykuły te stanowią 45% wszystkich analizowanych prac. Kolejnymi państwami publikującymi artykuły w tym obszarze są: Korea Południowa, Wielka Brytania, Polska, Australia i Malesja (państwa, które opublikowały min. 2 artykuły) stanowią one 45% wszystkich artykułów. Pozostałe 10% artykułów to pojedyncze prace z pozostałych części świata.

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie

Bezzałogowe statki powietrzne już od wielu lat z powodzeniem wykorzystywane są w budownictwie. W zależności od docelowego przeznaczenia stosuje się drony o różnej konstrukcji i wadze. Urządzenia te mogą być wyposażone m.in. w kamery o wysokiej rozdzielczości, kamery termowizyjne, skanery laserowe i urządzenia odbiorcze GNSS. Dzięki takiemu wyposażeniu drony mają zastosowanie w:

- kontroli obiektów budowlanych do których dostęp jest utrudnio-

ny, np. mostów, kominów, dachów,

- ocenie stanu technicznego konstrukcji i ich elementów. Na obrazie transmitowanym przez kamery z drona można znaleźć pęknięcia i inne defekty zagrażające bezpieczeństwu konstrukcji.
- monitorowaniu postępów prac budowlanych. Nadzór z powietrza pozwala na większą kontrolę przebiegu prac na budowie dzięki możliwości wykonywania zdjęć i filmów z realizacji inwestycji,
- termowizyjnych badaniach obiektów budowlanych. Dzięki zastosowaniu kamer termowizyjnych możliwe jest dokonywanie pomiarów i identyfikowanie źródeł utraty ciepła w budynku,
- monitorowaniu i kontroli środowiska pracy, identyfikacji zagrożeń w realizacji obiektów, dzięki czemu zmniejszane jest ryzyko wypadków, a tym samym zwiększone bezpieczeństwo pracy,
- pozyskiwaniu obrazów do wyznaczania geometrii 3D obiektów przestrzennych, określaniu wymiarów przestrzennych (odległość, powierzchnia, objętość), tworzenia ortofotomapy, a także inwentaryzacji atrybutów obiektów.

Podsumowanie

Bezzałogowy statek powietrzny to nie tylko popularny gadżet wykorzystywany coraz częściej przez amatorów i hobbystów w celach prywatnych, lecz także nowoczesny system mający zastosowanie w wielu dziedzinach życia, w tym budownictwie, a także w prowadzonych badaniach naukowych. Zastosowanie dronów w budownictwie ma duże spektrum działania, począwszy od inspekcji budowlanych, oceny zniszczeń, pomiarów terenu, monitorowania postępów prac po inspekcje stanu bezpieczeństwa. Bezzałogowe statki powietrzne pozwalają na wykonanie nie tylko zdjęć z powietrza, lecz także dostarczają trójwymiarowych modeli czy ortofotomap. Pozyskana w ten sposób dokumentacja

pozwala z dużą dokładnością zbadać topografię terenu przeznaczonego pod inwestycję, a także zweryfikować zakres planowanych robót ziemnych, np. oszacować objętość wykopów, wymiary fundamentów czy głębokość osadzenia rurociągu. Sprzyja to dokładniejszemu planowaniu tempa prac i czasu trwania projektu inwestycyjno-budowlanego, ułatwia kontrolę postępów, a w rezultacie zapobiega opóźnieniom na budowie.

Wykorzystanie dronów w budownictwie może podnieść stopień bezpieczeństwa na budowie, pamiętać należy jednak, że bezzałogowe statki powietrzne mogą stwarzać również nowe, dotychczas niewystępujące na placu budowy zagrożenia. Niestabilne warunki lotu, błędy operatora i awarie sprzętu mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla pracujących w pobliżu pracowników. Źle dobrana trajektoria lotu bezzałogowego statku powietrznego może doprowadzić do kolizji, która może spowodować obrażenia u ludzi lub zwierząt, znaczne uszkodzenie sprzętu lub nawet utratę urządzenia.

Edukacja w zakresie bezpiecznego użytkowania bezzałogowych statków powietrznych, ale także właściwe użytkowanie dronów mają szansę poprawić bezpieczeństwo pracy z tymi urządzeniami. Szczególnie że zastosowanie dronów w budownictwie, o czym wcześniej wspomniano, niesie ze sobą wiele korzyści. Tego, że użycie bezzałogowych statków latających w szybkim tempie poszerza swój zakres zastosowań, są świadome także środowiska akademickie. Wychodząc naprzeciw najnowocześniejszym trendom, realizowany jest międzynarodowy projekt „Virtual reality immersive safety training environment for robotised and automated construction sites” przez konsorcjum: University of the West of England (UWE) Bristol, (United Kingdom); CTM -Centro Tecnológico del Marmol Piedra y Materiales (Spain); Bildungszentren des Baugewerbes e.V. (Germany); Wrocław University of Science and Technology (Poland). Głównym celem projektu jest opracowanie bardzo innowacyj-

nego, bezpiecznego i interaktywnego środowiska szkoleniowego opartego na technologii wirtualnej rzeczywistości (VR) w zakresie nowoczesnych technologii, w tym bezzałogowych statków powietrznych, aby przekazać pracownikom budowlanym niezbędne umiejętności i edukację w zakresie interakcji z maszynami i materiałami.

Podziękowania

Praca jest wynikiem realizacji przez autorów projektu badawczego nr 2020-1-UK01-KA202-079176 „Virtual reality immersive safety training environment for robotised and automated construction sites” finansowanego przez europejski program Erasmus+ (<https://safecrobot.pwr.edu.pl>). ◀

Materiały źródłowe

- [1] T. Nowobilski, M. Sawicki, M. Szóstak. Drony w ocenie stanu rusztowań, *Builder*, 2020, 24(1), 40-41
- [2] T. Nowobilski, M. Sawicki, M. Szóstak. Analiza rusztowań budowlanych z wykorzystaniem nowych technologii, *Builder*, 2020, 24(7), 32-34
- [3] I. Rybka, T. Nowobilski, M. Stolarz. Nowoczesne technologie monitorowania robót ziemnych: praktyczne wdrożenie na przykładzie budowy Kwatery Południowej OUOW Żelazny Most, *Builder*, 2020, 24(5), 44-47
- [4] P. Noszczyk. Zastosowania dronów w działaniach PSP, *W Akcji*, 2018, 6, 42-48
- [5] T. Nowobilski. Bezzałogowe statki powietrzne w kontroli obiektów budowlanych, *Builder*, 2020, 24(2), 18-20
- [6] M. Herrmann. Unmanned Aerial Vehicles in Construction: An Overview of Current and Proposed Rules, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, 2016, 588-596. doi:10.1061/9780784479827.060
- [7] J. Łukasiewicz. Unmanned aerial vehicle as a device supporting the physical protection system of critical infrastructure facilities: Nuclear power plant as a case in point, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2020, 108, 121-131. doi:10.20858/SJSUTST.2020.108.11
- [8] S. Zhou, M. Gheisari. Unmanned aerial system applications in construction: a systematic review, *Construction Innovation*, 2018, 18(4), 453-468. doi:10.1108/CI-02-2018-0010
- [9] C. Rao, K. Krishna, K. Rachanajali, V. Sravani. Unmanned flying vehicles for various applications and their future scope in India, *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 2019, 14(6), 747-760. doi:10.26782/JMCMS.2019.12.00055
- [10] J. Irizarry, D. Costa. Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks, *Journal of Management in Engineering*, 2016, 32(3), 05016001. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
- [11] M. Freeman, M. Kashani, P. Vardanega, "Aerial robotic technologies for civil engineering: established and emerging practice," *Journal Of Unmanned Vehicle Systems*, 2021, 9(2), 75-91.
- [12] D. Han, S. Lee, M. Song, J. Cho. Change Detection in Unmanned Aerial Vehicle Images for Progress Monitoring of Road Construction, *Buildings*, 2021, 11(4), doi:10.3390/BUILDINGS11040150
- [13] M. Tatum, J. Liu. Unmanned Aircraft System Applications in Construction, *Procedia Engineering*, 2017, 196, 167-175. doi:10.1016/J.PROENG.2017.07.187
- [14] K. Julge, A. Ellmann, R. Köök. Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthworks, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2019, 14(1), 1-17. doi:10.7250/BJRBE.2019-14.430
- [15] F. Elghaish, S. Matarneh, S. Talebi, M. Kagioglou, M. R. Hosseini, S. Abrishami. Toward digitalization in the construction industry with immersive and drones technologies: a critical literature review, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2020, doi:10.1108/SASBE-06-2020-0077
- [16] A. Entrop, A. Vasenev. Infrared drones in the construction industry: Designing a protocol for building thermography procedures, *Energy Procedia*, 2017, 132, 63-68. doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.09.636
- [17] R. Eiris, G. Albeaino, M. Gheisari, W. Benda, R. Faris. InDrone: a 2D-based drone flight behavior visualization platform for indoor building inspection, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2021, doi:10.1108/SASBE-03-2021-0036
- [18] H. Yang, Y. Lee, S. Jeon, D. Lee. Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation, *Intelligent Service Robotics*, 2017, 10(2), 79-93. doi:10.1007/S11370-017-0224-Y
- [19] Y. Li, C. Liu. Applications of multirotor drone technologies in construction management, *International Journal of Construction Management*, 2018, 19(5), 401-412. doi:10.1080/15623599.2018.1452101
- [20] S. Kim, S. Kim. Opportunities for site monitoring by adopting first person view (FPV) of a drone, *Smart Structures and Systems*, 2018, 21(2), 139-149. doi:10.12989/SSS.2018.21.2.139
- [21] G. Albeaino, M. Gheisari. Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: A survey study in the united states, *Journal of Information Technology in Construction*, 2021, 26, 84-111. doi:10.36680/J.ITCON.2021.006
- [22] D. Höche, W. Weber, E. Gizenbiller, S. Gavras, N. Hort, H. Dieringa. Novel Magnesium Based Materials: Are They Reliable Drone Construction Materials? A Mini Review, *Frontiers in Materials*, 2021, 8. doi:10.3389/FMATS.2021.575530
- [23] M. Sagraera, V. Tuyare, G. Compa-

- gnone, R. Sotelo. Design, construction and manually or autonomously control of an unmanned aerial vehicle, *Memoria-Investigaciones en Ingenieria*, 2015, 14
- [24]J. Hu, A. Lanzon. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control, *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 103, 162–174. doi:10.1016/J.ROBOT.2018.02.019
- [25]P. Szywalski, A. Waindok. Practical Aspects of Design and Testing Unmanned Aerial Vehicles, *Acta Mechanica et Automatica*, 2020, 14(1), 50–58. doi:10.2478/AMA-2020-0008
- [26]A. Keyvanfar, A. Shafaghat, M. Awanghamat. Optimization and Trajectory Analysis of Drone's Flying and Environmental Variables for 3D Modelling the Construction Progress Monitoring, *International Journal of Civil Engineering*, 2021, doi:10.1007/S40999-021-00665-1
- [27]A. Bahabry, X. Wan, H. Ghazai, H. Menouar, G. Vesonder, Y. Massoud. Low-Altitude Navigation for Multi-Rotor Drones in Urban Areas, *IEEE Access*, 2019, 7, 87716–87731. doi:10.1109/ACCESS.2019.2925531
- [28]W. Yi, M. Sutrisna. Drone scheduling for construction site surveillance, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36(1), 3–13. doi:10.1111/MICE.12593
- [29]J. Siwiec. Comparison of Airborne Laser Scanning of Low and High Above Ground Level for Selected Infrastructure Objects, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2018, 8(2), 89–96. doi:10.2478/JAES-2018-0023
- [30]I. Jeelani, M. Gheisari. Safety challenges of UAV integration in construction: Conceptual analysis and future research roadmap, *Safety Science*, 2021, 144, 105473. doi:10.1016/J.SSCI.2021.105473
- [31]H. Izadi Moud, I. Flood, X. Zhang, B. Abbasnejad, P. Rahgozar, M. McIntyre. Quantitative Assessment of Proximity Risks Associated with Unmanned Aerial Vehicles in Construction, *Journal of Management in Engineering*, 2021, 37(1), 04020095. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000852
- [32]M. Gheisari, B. Esmaeili. Unmanned Aerial Systems (UAS) for Construction Safety Applications, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, CRC 2016, 2016, 2642–2650. doi:10.1061/9780784479827.263
- [33]J. Howard, V. Murashov, C. Branche. Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety, *American Journal of Industrial Medicine*, 2018, 61(1), 3–10. doi:10.1002/AJIM.22782
- [34]V. Nguyen, K. Jung, T. Dang. DroneVR: A web virtual reality simulator for drone operator, in: *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*, AIVR 2019, 2019, 257–262. doi:10.1109/AIVR46125.2019.00060
- [35]K. Kas, G. Johnson. Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely, *Process Safety Progress*, 200, 39(1). doi: 10.1002/PRS.12066
- [36]M. Namian, M. Khalid, G. Wang, and Y. Turkan, "Revealing Safety Risks of Unmanned Aerial Vehicles in Construction" *Transportation Research Record*, 2021, 2675(11), 334-347. doi: 10.1177/03611981211017134
- [37]M. N. Sakib, T. Chaspari, A. Behzadan. A feedforward neural network for drone accident prediction from physiological signals, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2021, doi:10.1108/SASBE-12-2020-0181
- [38]J. Liu, M. Jennesse, P. Holley. Utilizing Light Unmanned Aerial Vehicles for the Inspection of Curtain Walls: A Case Study, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, CRC 2016, 2016, 2651–2659. doi:10.1061/9780784479827.264
- [39]S. Lee, M. Song, S. Kim, J. Won. Change monitoring at expressway infrastructure construction sites using drone, *Sensors and Materials*, 2020, 32(11), 3923–3933. doi:10.18494/SAM.2020.2971
- [40]W. Li, H. Li, Q. Wu, X. Chen, K. Ngan. Simultaneously detecting and counting dense vehicles from drone images, in: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12), 9651–9662. doi:10.1109/TIE.2019.2899548
- [41]K. Pawlak, D. Serek. High Voltage Transmission Line Stringing Operation. Usage of Unmanned Aerial Vehicles for Installation of Conductor and Grounding Wires with Optical Fibers, in: *15th International Conference On Electrical Machines, Drives And Power Systems (ELMA)*, 2017, 32–37
- [42]H. Yusof, M. Ahmad, A. Abdullah. Historical building inspection using the unmanned aerial vehicle (UAV), *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 2020, 11(3), 12–20. doi:10.30880/IJ-SCET.2020.11.03.002
- [43]H. Jung, J. Lee, I. Kim. Challenging issues and solutions of bridge inspection technology using unmanned aerial vehicles, in: *Proceedings. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018*, 2018, 1. doi:10.1117/12.2300957
- [44]J. Seo, L. Duque, J. Wacker. Drone-enabled bridge inspection methodology and application, *Automation in Construction*, 2018, 94, 112–126. doi:10.1016/J.AUTCON.2018.06.006
- [45]Y. Ayele, M. Aliyari, D. Griffiths, E. Droguett. Automatic crack segmentation for uav-assisted bridge inspection, *Energies*, 2020, 13(23). doi:10.3390/EN13236250

Wykorzystanie drona w identyfikacji uszkodzeń nawierzchni

Drone usage for pavement damage identification

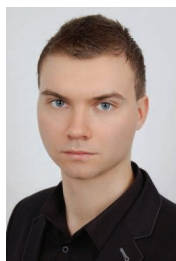


Piotr Mackiewicz

Dr hab. inż.

*Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk*

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl



Eryk Mączka

Mgr inż.

*Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk*

eryk.maczka@pwr.edu.pl

Streszczenie: Zastosowanie w odpowiednim czasie właściwych zabiegów remontowych pozwala skutecznie wydłużyć żywotność nawierzchni drogowych. W tym celu niezbędne jest przeprowadzenie dokładnej identyfikacji uszkodzeń, a następnie na jej podstawie ocena stanu nawierzchni drogowych. W związku z rozwojem zaawansowanych technik pomiarowych oraz aplikacji komputerowych można szybciej i dokładniej monitorować uszkodzenia w nawierzchniach. W niniejszym artykule zaprezentowano sposób identyfikacji uszkodzeń nawierzchni dużego obszaru placu z wykorzystaniem drona. Dzięki tej metodzie możliwe było lepsze i szybsze zobrazowanie i zróżnicowanie różnych defektów nawierzchni co ostatecznie pozwoliło lepiej określić przyczyny i genezę tych uszkodzeń.

Słowa kluczowe: Dron; Uszkodzenia nawierzchni; DJI SPARK; Identyfikacja uszkodzeń

Abstract: The timely use of appropriate renovation measures can effectively extend the life of road surfaces. For this purpose, it is necessary to carry out a detailed identification of damage, and then on its basis to assess the condition of road surfaces. Due to the development of advanced measurement techniques and computer applications, damage to pavements can be monitored faster and more accurately. This article presents a method of identifying damage to the pavement of a large area of the square with the use of a drone. The applied method allowed to visualize and differentiate various surface defects faster and more precisely. The method also enabled determine causes and genesis of damage more greatly.

Keywords: Drone; Pavement damage; DJI SPARK; Damage Identification

Wprowadzenie

Bez właściwych zabiegów remontowych degradacja nawierzchni dróg będzie następować szybciej, co w późniejszym okresie eksploatacji będzie wiązało się ze znacznymi stratami ekonomicznymi. W celu utrzymania dróg należy przeprowadzić odpowiedni przegląd stanu nawierzchni. Jednoznaczne zidentyfikowanie uszkodzeń w nawierzchni, ich sposobu powstania i perspektyw dalszego rozwoju, wymaga zaawansowanych, często skomplikowanych badań, a następnie analiz mechanistycznych. W procesie identyfikacji powierzchni stosuje się najczęściej techniki wizualne. Są one już od dłuższego czasu uzupeł-

niane przez techniki rejestracji obrazu [2], [5], [8], metody fotogrametryczne [17], rejestracje z wykorzystaniem samolotów [6].

Mimo iż, pierwsze latające obiekty stosowano w XIX wieku (małe balony w celach wojennych), a następnie bezzałogowe samoloty sterowane radiem to właściwy rozwój dronów (bezzałogowy statek powietrzny (ang. unmanned aerial vehicle, UAV)) rozpoczął się pod koniec XX wieku. Dzisiejszy rynek dronów można podzielić na drony do zastosowań wojskowych oraz cywilnych (potrzeby prywatne, przemysłowe, badania naukowe). W dziedzinie budownictwa drogowego drony są przydatne w miejscach niedostępnych dla ruchu kołowego lub

przy dużych identyfikacji rozległych obszarów. Stosuje się rejestrację zdjęciową oraz wideo za pomocą kamer/aparatów przymocowanych do dronów [7], [9], [12], [1], [13].

Na szczególną uwagę zasługuje dotychczasowa praca [18], w której stosowano drony (zbieranie danych w postaci obrazów) do oceny stanu dróg nieutwardzonych. Autorzy [11] stosowali drony i odpowiednie oprogramowanie w projektach robót ziemnych porównując wyniki z konwencjonalną metodą geodezyjną. Względy ekonomiczne wymagające skutecznej metody do monitorowania dużych obszarów budowlanych wskazują potrzebę stosowania dronów oraz interfejsu MATLAB GUI do wykrywania i oceny

pęknięć powierzchni różnych obiektów [10].

Systematyczna prowadzona dokumentacja pozwala na przyszłe analizowanie zmian zachodzących w rozwoju uszkodzeń nawierzchni i stosowanie odpowiedniego modelu.

Aktualnie w Polsce prowadzony jest monitoring nawierzchni, stosowanych jest wiele systemów w zakresie lokalnym oraz globalnym sieci dróg. Z wykorzystaniem różnego mobilnego sprzętu identyfikowana jest nośność nawierzchni, cechy powierzchniowe oraz stan uszkodzeń. Zastosowanie techniki wideo i kamer wysokiej rozdzielczości pozwala w sposób ciągły rejestrować różne typy uszkodzeń, a następnie z wykorzystaniem różnych algorytmów (np. sztucznych sieci neuronowych) klasyfikować je i określać ich parametry.

W Polsce przez wiele lat stosowane były ręczne lub półautomatyczne systemy rejestracji. W 1989 roku wprowadzono w Polsce System Oceny Stanu Nawierzchni (SOSN) [15]. Jego podstawą była inwentaryzacja uszkodzeń i pomiarów cech eksploatacyjnych nawierzchni asfaltowych. System o charakterze identyfikacji wizualnej przez kolejne lata rozwijano i aktualizowano [14], [16]. Do inwentaryzacji i oceny wizualnej zastosowano system SOWA, który opierał się na manualnej koncepcji kodowania uszkodzeń za pośrednictwem specjalnego rejestratora podczas jazdy. Z uwagi na bezpośrednią obsługę przez człowieka zawierał on pewne aspekty oceny subiektywnej. Wykorzystując opracowania SOSN, rozwój badawczy oraz doświadczenia zagraniczne, opracowano i zebrano szczegółowe wytyczne do diagnostyki stanu nawierzchni (DSN) [4], [3]. Mimo, iż w tym systemie nie uwzględnia się jeszcze techniki UAV, to aktualnie stosowany LCMS (Pavemetrics®) – Laser Crack Measurement System, pozwala w sposób ciągły, precyzyjny i powtarzalny identyfikować uszkodzenia na powierzchni. Ta automatyczna ocena

stanu nawierzchni opiera się na wykonaniu wysokiej rozdzielczości obrazu 3D nawierzchni drogowej oraz zdjęć z wykorzystaniem kamer rejestrujących ogólny widok jezdni z przodu i z tyłu pojazdu. Specjalistyczne, „szybkoklatkowe” kamery rejestrują obraz nawierzchni pasa drogowego wraz z obrazem linii laserowej, wygenerowanej przy pomocy projektorów laserowych. W wyniku zastosowania takiej techniki powstaje obraz 3D, który służy do automatycznych analiz ukierunkowanych na wykrywanie uszkodzeń nawierzchni (w tym ich szerokości i głębokości, jeśli dotyczy).

Stosowanie dronów w drogownictwie nie jest jeszcze powszechnie stosowane i wymagane w systemach zarządzania siecią drogową w Polsce. Mimo to wiele jednostek naukowych lub firm drogowych wykorzystuje drony do rejestracji zdjęciowej i filmowej, a w szczególności do monitoringu, kontroli robót, oceny stanu uszkodzeń, oceny warunków ruchu drogowego. Wdraża się także bardziej zaawansowane rejestracje, jak np. analizy termiczne lub rejestracje numeryczne 3D, służące następnie do opracowania cyfrowych modeli powierzchni (digital surface models DSM) i cyfrowych modeli terenu (digital terrain models DTM).

Wizja lokalna pozwala to na identyfikację obszarów terenu i dróg w jednym ujęciu. Okazuje się to skuteczne w zachowaniu bezpieczeństwa osób wykonujących inwentaryzację i dostępie do odległych miejsc, które w klasycznym podejściu mogą nie być uwzględnione. Technologia dronów jest wyjątkowo skuteczna, jeśli chodzi o rejestrowanie takich uszkodzeń nawierzchni, które są trudne do zlokalizowania i odniesienia na dużych obszarach, np. na drogach startowych, placach, parkingach, rozbudowanych sieciach dróg wewnętrznych.

Treści przechwycone przez drony w dalszym etapie powinny być odpowiednio obrobione pod względem

graficznym i skalibrowane w celu opracowania wizualnych map fotograficznych o wymaganej szczegółowości.

Należy jednak zwrócić uwagę, że w specyficznych sytuacjach (np. poszukiwanie przyczyn nietypowych uszkodzeń, analiza mniejszych lokalnych obszarów) nadal niezbędna jest identyfikacja i analiza uszkodzeń w systemie „ręcznym”. W niniejszym artykule zaprezentowano zastosowanie dronu jako narzędzie pozwalające skutecznie uzupełnić typową inwentaryzację uszkodzeń nawierzchni dużego placu.

Charakterystyka placu

Celem przeprowadzonych badań oraz inwentaryzacji przez autorów była analiza przyczyn powstania uszkodzeń warstwy ścieralnej (z prefabrykowanych elementów betonowych) oraz elementów odwodnienia liniowego na nawierzchni placu przed budynkiem użyteczności publicznej. Analizy wykonano na potrzeby opracowania programu naprawczego dla nawierzchni placu. Ocenie poddano stan spękań i równości nawierzchni, uszkodzeń dylatacji i spoin oraz elementów odwodnienia liniowego. W ramach późniejszego opracowania obserwacje terenowe zweryfikowano w modelu obliczeniowym. Przeprowadzono analizy numeryczne wskazujące na przyczyny uszkodzeń. Wskazano technologie naprawcze zabezpieczające plac przed dalszą degradacją

Przedmiotowa nawierzchnia zajmuje plac o powierzchni ponad 10 000 m² na płycie garażu podziemnego. Jest to konstrukcja sztywne i szczelna, dylatowana o następującym układzie warstw:

- warstwa ścieralna z płyt i kostek betonowych / granitowych, gr. 8 cm,
- podsypka piaskowo-cementowa, gr. 3-5 cm,
- warstwa ochrona hydroizolacji z betonu C12/15 o zmiennej grubo-

ści 5 – 31 cm

- hydroizolacja,
- warstwy betonowe płyty garażu.

Wypełnienie spoin stanowi zaprawa cementowa na głębokość min. 4 cm, szerokość większości spoin wynosi od 2 do 8 mm. Widok ogólny nawierzchni przedstawiono na rys. 1.

Zastosowany sprzęt

Do inwentaryzacji uszkodzeń wykorzystano stosunkowo mało zaawansowany jak na aktualne technologie dron DJI SPARK (rys. 2). Jest to urządzenie typu quadcopter, które ukazało się na rynku w 2017 roku. Jest o małych wymiarach 143 x 143 x 55 mm i co bardzo ważne posiada masę startową tylko 300 g (150 g bez pakietu napędowego). Dla przypomnienia ówczesne polskie przepisy administracyjne regulujące loty dronami dotyczyły maszyn o ciężarze w granicach 0,6 kg do 25 kg. Drony poniżej 0,6 kg nie posiadały restrykcji w zakresie lotów przy skupiskach ludzi i w terenie zabudowanym. Aktualnie każda osoba chcąc latać dronem o masie powyżej 250g będzie musiała przejść szkolenie online oraz zaliczyć test online potwierdzający zdobycie wymaganej wiedzy.

Mała masa drona jest korzystna, gdyż większa jest jego odporność na ew. mechaniczne uszkodzenia przy upadku i potencjalnie zagrożenia dla ludzi. Dron SPARK ma składane do transportu śmigła i posiada wygodne etui pozwalające na wygony transport. Do rejestracji ujęć do dyspozycji jest kilka zautomatyzowanych programów-funkcji ułatwiających wykonywanie profesjonalnych ujęć. Po przełączeniu w tryb Sport model może poruszać się z prędkością do 50km/h. Ten tryb można również wykorzystać do szybkiego przemieszczenia się do miejsca filmowania, aby tam po jego wyłączeniu wrócić docelowej rejestracji terenu. Maksymalny czas lotu



1. Fragment analizowanego placu



2. Dron DJI SPARK z pakietem wyposażenia

fabryczny wynosi 16 minut, a maksymalna prędkość wznoszenia/opadania 3m/s. W urządzeniu zastosowano rozszerzony zestaw Combo zapewniający większy zasięg sterowania, szybsze ładowanie pakietów napędowych, większą precyzję sterowania (nadajnik RC/Wideo) i bezpieczeństwo lotu (osłony na śmigła). Stosowano pakiet zasilający LiPol 1480 mAh / 3S. Podczas inwentaryzacji wymagane było jednokrotne doładowanie (czas ładowania pakietu ok. 1 h).

Do rejestracji obrazu zastosowano kamerę: 1/2.3" matryca, 12 Mpikseli, FHD format: 1920x1080 i 30fps, obiektyw kamery 25 mm, jasność obiektywu $f = 2,6$. Sterowanie odbywało się nadajnikiem RC/Wideo pozwalającym na zasięg do 500 m. Transmisja sygnałów między modelem a nadajnikiem odbywa się cyfrowo w paśmie 2,4 GHz

dla RC i 5,8 GHz dla wideo. Sterowanie w systemie WiFi pozwala na zasięg do 100 m odległości i 50 m wysokości.

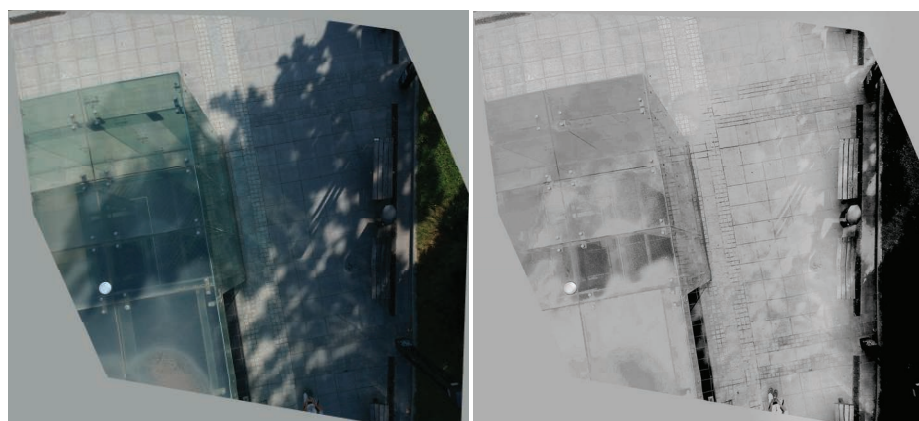
Dron wyposażony jest dodatkowo: w odbiornik GPS/Glonas, barometryczny czujnik wysokości, kompas magnetyczny, czujniki przeciw zderzeniu z przeszkodą przodem modelu, czujniki precyzyjnego lądowania i utrzymywania pozycji w pomieszczeniach zamkniętych, czujnik rozpoznawania twarzy i gestów operatora lub śledzenia wyznaczonego obiektu. W celu stabilności lotu dopuszczalna prędkość wiatru wynosi 28 km/h.

Identyfikacja uszkodzeń

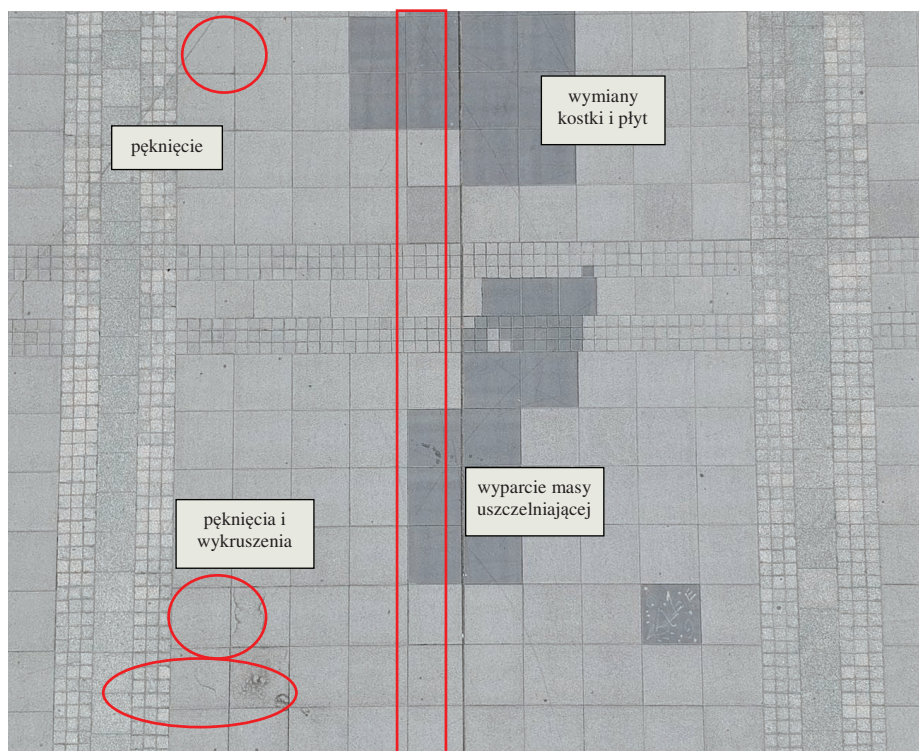
W celu szczegółowej identyfikacji uszkodzeń placu przeprowadzono serię zdjęć z wykorzystaniem drona DJI SPARK (rys. 3).



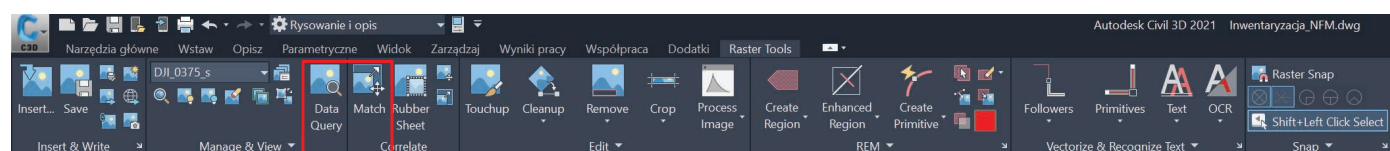
3. Przykładowe zdjęcia z drona



4. Przykładowe zdjęcia korekcy obrazu ze względu na zacienie obszaru



5. Zdjęcie fragmentu rejestrowanego placu ze zidentyfikowanymi uszkodzeniami



6. Interfejs nakładki Raster Design w środowisku Autocad Civil 3D

Rejestrację obszaru rejestrowano w postaci zdjęć o rozdzielczości 12 Mpikseli, uwzględniając „zakładkę” zdjęć co było przydatne w kolejnym etapie w kalibracji i łączeniu zdjęć. Dla analizowanego placu zarejestrowano około 400 zdjęć. Podczas inwentaryzacji panowały dobre warunki pogodowe, mały wiatr, bez opadów. Na pewnych obszarach występowało zacienie od drzew i obiektów, co wymagało w dalszym etapie dodatkowej obróbki graficznej obrazów (rys. 4).

Większość wykonanych obrazów posiadała zbliżoną charakterystykę tonalną i pozwalała na jednoznaczną identyfikację defektów nawierzchni. Przykład fragmentu placu z oznaczonymi uszkodzeniami przedstawiono na rys. 5.

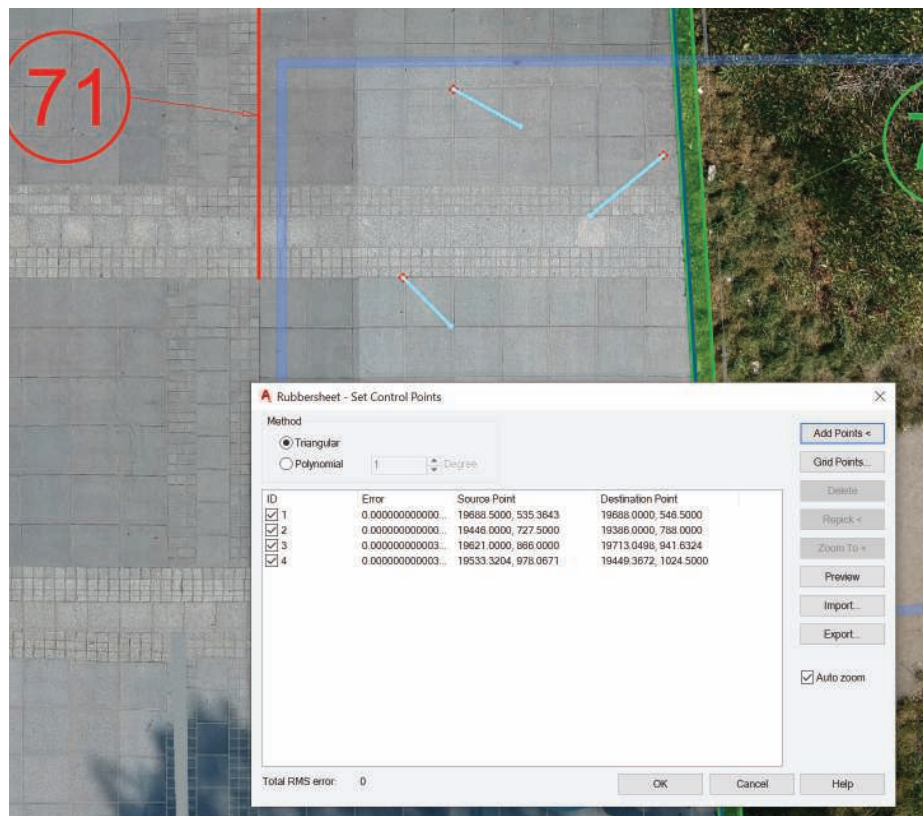
Celem stworzenia całościowej, szczegółowej mapy uszkodzeń niezbędna była także kalibracja każdego zdjęcia. Spowodowana była pewnymi zniekształceniami ze względu na krótszą ogniskową oraz aberrację na brzegach obrazu. Zastosowana krótsza ogniskowa obiektywu zapewniła na szerszy kąt obiektywu i wykonanie mniejszej liczny zdjęć. Istnieje wiele programów do obróbki zdjęć – Adobe Photoshop, Gimp, Google Picassa, jednak żaden z nich nie pozwala na bezpośrednią i sprawną modyfikację obrazów pod zastosowania inżynierskie. W środowisku Autodesk, istnieje rozszerzenie, które użytkownik może opcjonalnie doinstalować do podstawowego Autocada – Raster Design. Działa ono również w programach takich jak Autocad Map3D oraz Civil 3D. Pozwala ono na edycję zdjęć w zakresie tworzenia podkładów mapowych oraz umożliwia ich konwersję na obiekty wektorowe. Zastosowano to narzędzie do kalibracji i połączenia zarejestrowanych obrazów. W interfejsie

oprogramowania zamieszczonym na rys. 6 znajduje się wiele użytecznych opcji pozwalających na obróbkę wstawianego do środowiska CAD zdjęcia.

Jedną z ważniejszych opcji jest Match pozwalająca wskazać punkty początkowe oraz docelowe obrazu, tak aby w sposób jednoczesny wykonać przemieszczenie i skalowanie fotografii. Druga opcja Rubber Sheet umożliwia „naciągnąć” punkty charakterystyczne obrazu na stan projektowy zawarty w dokumentacji, tworząc w ten sposób widok rzeczywisty w skali 1:1. Zastosowano to m.in. przy łączeniu krawędzi jezdni, krawędzi elementów drobnowymiarowych, dyktacji, krawężników.

Przy kalibracji w narzędziu Raster Design użytkownik ma do dyspozycji dwie metody kalibrowania obrazu – „trójkątną” oraz „wielomianową”. Zastosowano metodę pierwszą, która należy do bardzo dokładnych. Przykładowy widok z użyciem opcji Rubber zaprezentowano na rys. 7.

Należy zaznaczyć, że aby stworzyć mapę stanu rzeczywistego bez deformacji, pierwotne obrazy należy kalibrować i odpowiednio kadrować na co pozwala rozszerzenie Raster De-



7. „Naciąganie” obrazu – opcja Rubbersheet

sign. Podczas rejestracji obrazów dronem każdy obszar częściowo nakładał się. Po wykonaniu kalibracji nachodzące na siebie fragmenty obrazów przycinano. W ten sposób uzyskano spójny obszar bez widocznych nieciągłości (rys. 8).

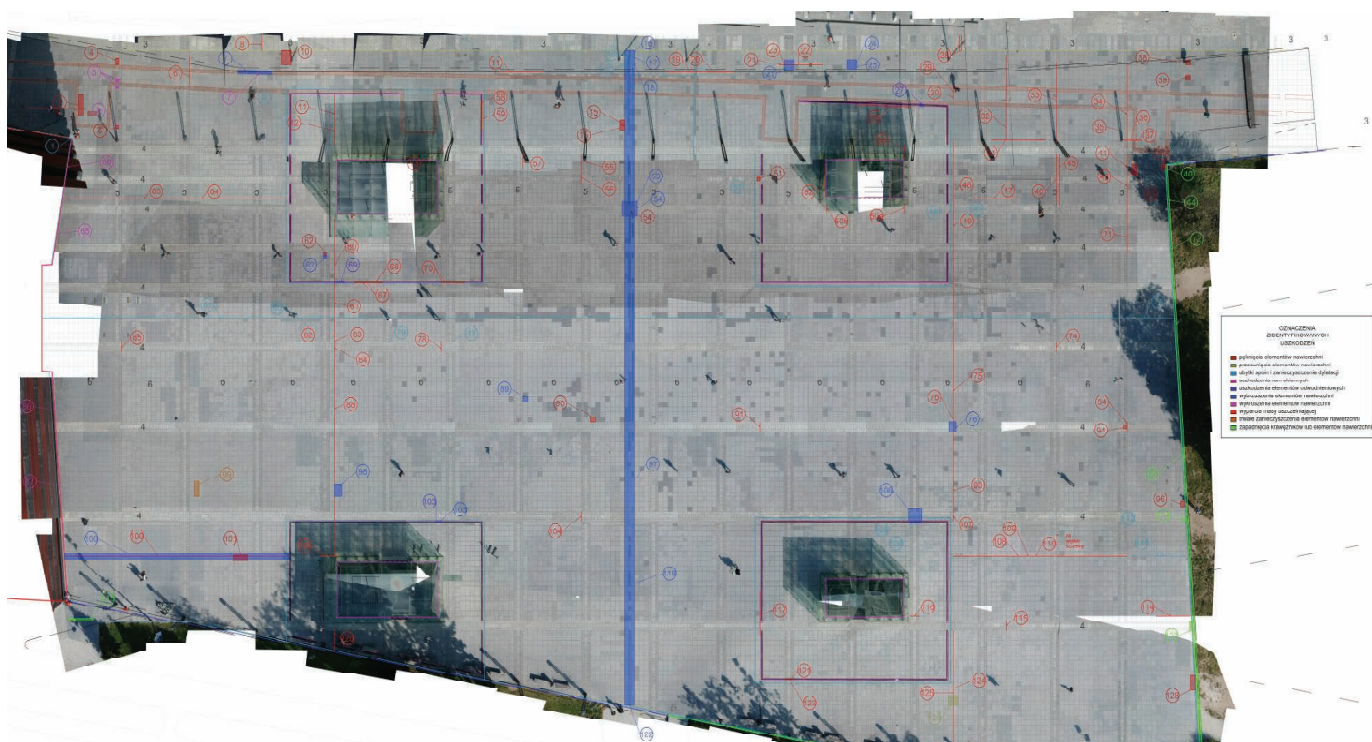
Omówione kroki postępowania

oraz możliwości oprogramowania Autocad – Raster Design pozwoliły to opracować plan sytuacyjny całego placu z uszkodzeniami oraz w dalszym etapie przeanalizować globalny charakter mechaniki pracy całego placu.

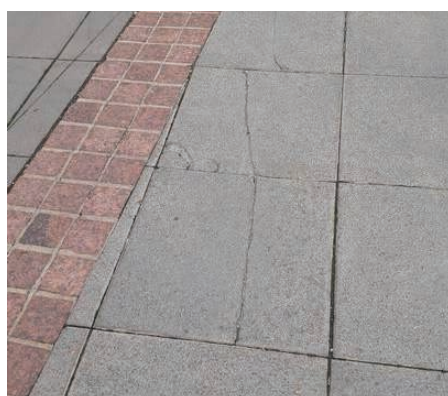
Rezultat skalibrowanego podkładu naniesiony na dokumentację projek-



8. Przykładowy rezultat skalibrowanej mapy obiektu z naniesionymi uszkodzeniami



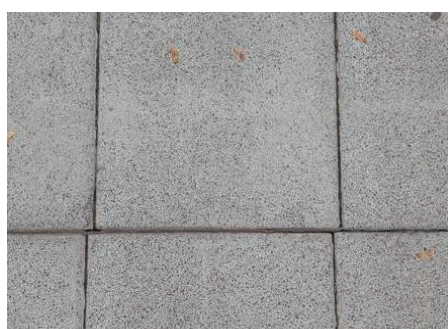
9. Plan sytuacyjny całego placu z naniesionymi uszkodzeniami



10. Przykładowe pęknięcia płyt (w środku i na krawędzi)



13. Przykładowe trwałe zanieczyszczenia elementów nawierzchni



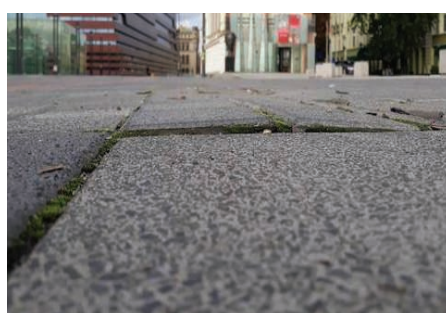
11. Przykładowe przesunięcie elementów nawierzchni



14. Przykładowe zapadnięcia/przesunięcia krawężników



12. Przykładowe wyparcia masy uszczelniającej



15. Przykładowe wyniesienie nawierzchni

ową z oznaczeniami uszkodzeń zamieszczono na rys. 9.

Analiza uszkodzeń

Wykonaną inwentaryzację uszkodzeń z drona uzupełniono i zweryfikowaną podczas klasycznej wizji lokalnej. Przeprowadzona inwentaryzacja wskazała na występowanie:

- pęknięć elementów nawierzchni
- przesunięcie elementów nawierzchni
- ubytków spoin i zanieczyszczenie dylatacji
- uszkodzeń ram okiennych
- uszkodzeń elementów odwodnienia liniowego
- wybrzuszeń elementów nawierzchni
- wykruszeń elementów nawierzchni
- wyparcia masy uszczelniającej
- trwałych zanieczyszczeń elementów nawierzchni
- zapadnięć/przesunięć krawężników lub elementów nawierzchni

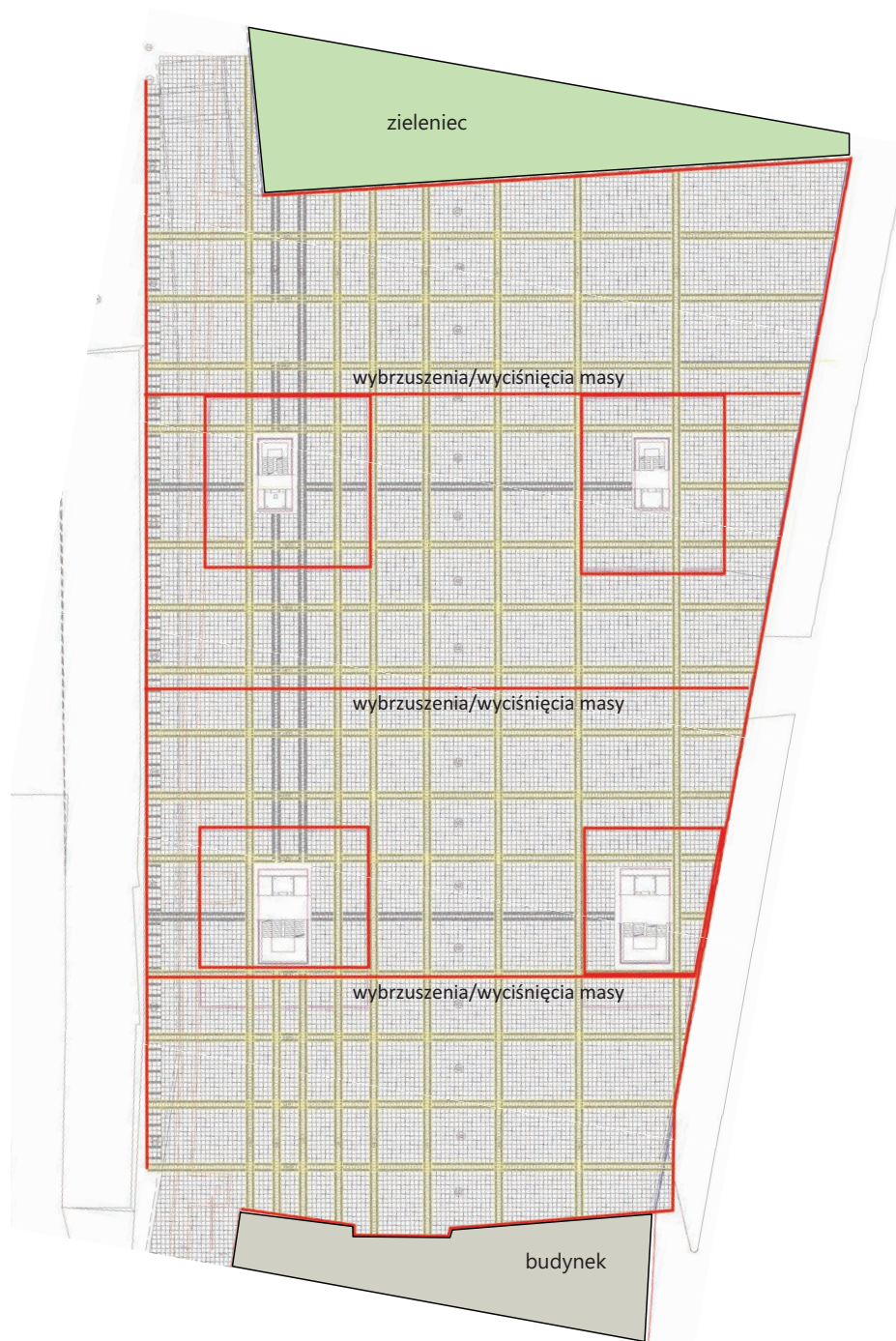
Przykładowe uszkodzenia wykonane techniką fotograficzną klasycznym aparatem zaprezentowano

na rys. 10 -15. Ta technika pozwoliła dokładniej pomierzyć różne uszkodzenia i wprowadzić je całościowy plan sytuacyjny.

Stwierdzono, że zidentyfikowane uszkodzenia są przede wszystkim następstwem oddziaływań termicznych (ograniczone możliwości przemieszczania się elementów drobnowymiarowych), a także częściowo oddziaływania pojazdów. Analiza globalna obszaru z wykorzystaniem zdjęć z drona wskazała na trzy wyraźne wybrzuszenia/wycięcia masy (1-3 cm), które określono na podstawie globalnej identyfikacji uszkodzeń (rys. 16). Należy zauważyć, że cały obszar placu aktualnie „podzielił się” na cztery płyty (o szerokościach około 40 m), z jednej strony ograniczone oddziaływaniem na budynek (bezpośrednio na ramy okienne), a z drugiej na krawężnik (który został przemieszczony w głąb zielenca). Następstwem znacznych przemieszczeń dochodzących do kilku centymetrów jest wyciskanie masy ze szczelin, lub jej wykruszanie. Uszkodzenia szczelin mogą powodować dalszą degradację niższych warstw w wyniku penetracji wody w głąb nawierzchni.

Na skutek przemieszczenia poziomego płyt nastąpiły również uszkodzenia elementów odwodnienia liniowego. Dla nich wyróżniono odrębne obszary podatne na oddziaływanie dużych sił poziomych. Stwierdzono uszkodzenia koryt oraz ściśnięcia krat rusztów, uniemożliwiające ich właściwą eksploatację.

Niektóre pęknięcia elementów nawierzchni są szersze niż 3 mm i stanowią niebezpieczeństwo wykruszenia z nawierzchni, co może stanowić zagrożenie dla ruchu pieszych. Stwierdzone przesunięcia nawierzchni (płyt) stanowią nieestetyczny element wizualny, podobnie jak plamy i inne zmiany kolorystyczne. Istotniejsze są kilkucentymetrowe deformacje krawężników, mogące mieć wpływ na zanieczyszczenie placu i wpływy wody.



16. Obszar placu wydzielony na obszary w wyniku oddziaływań termicznych

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych rozważań stwierdza się użyteczność oraz wysoką skuteczność zastosowania dronów do monitorowania uszkodzeń na dużych obszarach nawierzchni. Wykorzystanie tych urządzeń oraz odpowiedniego oprogramowania pozwala stworzyć całościowy plan sytuacyjny stanu istniejącego, który naniesiony jest na dokumentację projektową sta-

nowi kompletny materiał do analizy stanu i przyczyn uszkodzeń. Obraz ten pozwala także na opracowanie analizy kosztów oraz wdrożenia optymalnych zabiegów naprawczych na wybranych miejscach obszaru. Należy jednak pamiętać, iż urządzenia rejestrujące powinny cechować się odpowiednimi parametrami technicznymi, aby zapewnić odpowiednią dokładność obrazu. Zgodnie z aktualnymi przepisami należy przestrzegać zasad bezpieczeństwa oraz posiadać wyma-

gane szkolenia i zezwolenia w zakresie użytkowania dronów.

Zastosowanie techniki rejestracji obrazów z wykorzystaniem drona, było niewątpliwie pomocne w ocenie przyczyn uszkodzeń placu. Na nawierzchni z płyt betonowych brakowało właściwych rozwiązań technologicznych. Za przyczynę opisanych uszkodzeń o charakterze termicznym uznać należy przeszytwnienie wykonanej konstrukcji oraz nie zachowany stosunek grubości oddylatowanych płyt do ich wymiarów w planie. W wyniku zbyt dużego rozstawu szczelin dylatacyjnych, a praktycznie ich braku przekroczona została długość krytyczna płyty oraz ograniczona została przestrzeń na jej przemieszczanie.

Globalne zestawienie uszkodzeń na całociowym planie wskazało kumulację spękań, wybrzuszeń nawierzchni wydzielając obszar placu na cztery duże obszary wskazujące na mechanizm pracy. Uszkodzenia wypełnień szczelin, „wybrzuszenia” nawierzchni, uszkodzenia elementów odwodnieniowych, uszkodzenia ram okiennych i inne uszkodzenia powierzchniowe nastąpiły w wyniku znacznych przemieszczeń termicznych, z powodu niewłaściwie zdylatowanego placu. W niektórych obszarach placu przyczynić się mogły do tego warunki niskiej temperatury, w których układano nawierzchnię. Taka sytuacja również spowodowała większą różnicą temperatur od okresu budowy do okresu eksploatacji w okresie letnim.

Podziękowanie Panu Leszkowi Ziolkowskiemu za udostępnienie sprzętu technicznego i wykonanie rejestracji obrazów z wykorzystaniem drona DJI SPARK. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Brooks C., Dean D., Roussi C., Colling T., Characterization of Unpaved Road Condition Through the Use of Remote Sensing, Michigan Technological University, May 2013
- [2] Cheng H.D., Miyojim M., Novel system for automatic pavement distress detection, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 12, No. 3, 1998, 145–152
- [3] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa 2019
- [4] Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, GDDKiA, Warszawa 2015
- [5] Fukuhara T., Terada K., Nagao M., Kasahara A., Ichihashi S., Automatic pavement-distress-survey system, Journal of Transportation Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990, 280–286
- [6] Herold M., Roberts D., Smadi O., Noronha V., Road Condition Mapping with Hyperspectral Remote Sensing, 2004
- [7] Nappo N., Mavrouli O., Nex F., Westen C., Gambillara R., Michetti A.M., Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas, Engineering Geology 294, 2021, 106363
- [8] Obaidat M.T., AL-Kheder S.A., Integration of geographic information systems and computer vision systems for pavement distress classification, Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 9, 2006, 657–672
- [9] Pan Y., Zhang X., Cervone G., Yang L., Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multi-spectral Imagery, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 11, No. 10, October 2018
- [10] Sankarasrinivasan, S., Balasubramanian, E., Karthik, K., Chandrasekar, U., and Gupta, R., Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System, Proceedings of 11th International Multi-Conference on Information Processing, 2015
- [11] Siebert S., Teizer J., Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system, Automation in Construction, Vol. No.14, 2014, pp. 1-14
- [12] Silva L.A., San Blas H.S., García D.P., Mendes A.S., González G.V., An Architectural Multi-Agent System for a Pavement Monitoring System with Pothole Recognition in UAV Images Sensors, 2020, 20(21), 6205, October 2020
- [13] Singh C., Brooks C., DOBSON R.J., ROUSSE C., COLLING T., DEAN D., WATKINS M., Evaluating, mapping, and managing unpaved road networks using high-resolution remote sensing data, Asian Conference on Remote Sensing 2014
- [14] System oceny stanu nawierzchni SOSN, Wytyczne Stosowania, Aktualizacja związana z wykorzystaniem wyników pomiarów ugięć nawierzchni, GDDKiA, Warszawa 2010
- [15] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 1989
- [16] System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania, GDDP, Warszawa 2002
- [17] Szpinek S., Koncepcja metody inwentaryzacji stanu uszkodzeń nawierzchni lotniskowej na podstawie komputerowej analizy zdjęć lotniczych, IBDiM, z. 2/93. Warszawa
- [18] Zhang C., An UAV-Based Photogrammetric Mapping System For Road Condition Assessment, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, Vol. XXXVII, Part B5, Beijing

Wykorzystanie dronów w inspekcjach morskich farm wiatrowych OFFSHORE

Use of drones in offshore wind farm inspections



Hanna Dzido

Dr

Katedra Transportu i Logistyki
Wydział Nawigacyjny
Uniwersytet Morski w Gdyni

h.dzido@wn.umg.edu.pl

Streszczenie: Wraz ze wzrostem globalnych inwestycji w morską energetykę wiatrową i szybkim wdrażaniem technologii wiatrowych w niebezpiecznych środowiskach głębokowodnych, inspekcja eksploatacyjna turbin wiatrowych i związanej z nimi infrastruktury odgrywa ważną rolę w bezpiecznej i wydajnej eksploatacji morskich farm wiatrowych. W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych (BSP) i zdalnie pilotowanych bezzałogowych statków powietrznych (RPA) powszechnie określanych jako „drony”, do zdalnej inspekcji infrastruktury z zakresu OZE (odnawialnych źródeł energii) tj. farm fotowoltaicznych oraz lądowych farm wiatrowych. Drony posiadają znaczący potencjał, aby zmniejszyć nie tylko liczbę operacji lotniczych (zaangażowania statków powietrznych i załóg lotniczych) oraz transportu personelu dokonującego przeglądu i naprawy morskich turbin wiatrowych, ale także ilość ciężkiego sprzętu transportowanego do wykonywania niebezpiecznych prac kontrolnych. Zaangażowanie BSP skraca również czas przestoju elektrowni potrzebny do wykrycia usterek i zebrania informacji diagnostycznych z całej farmy wiatrowej. Korzyści z technologii inspekcji w branży morskiej energetyki wiatrowej opartej na dronach, potwierdzają dotychczasowe testy, a perspektywa rozwoju energetyki morskiej zachęca do dalszych prac z wykorzystaniem BSP. Jednocześnie należy mieć na uwadze, iż każda nieprzewidziana awaria systemu dronowego podczas jego misji może spowodować przerwanie prac kontrolnych (podczas inspekcji), a tym samym ograniczenie energii elektrycznej generowanej przez turbiny wiatrowe. W artykule przedstawiono potencjał dronów w procesie inspekcji farm wiatrowych, w tym morskich, przedstawiono przykładowe modele BSP używane do inspekcji, wskazano sposoby prowadzenia kontroli z użyciem dronów oraz zwrócono uwagę na znaczące obniżenie kosztów procesu eksploatacji morskich farm wiatrowych wskutek ograniczenia wykorzystania lotnictwa załogowego (śmigłowców i załóg lotniczych) oraz eliminacji ryzyka związanego z zaangażowaniem personelu do wykonywania inspekcji elektrowni wiatrowych na morzu. Wskazano również na potencjał bezzałogowych platform pływających w ramach współpracy z BSP w procesie dokonywania inspekcji morskich farm wiatrowych.

Słowa kluczowe: Energetyka wiatrowa; Drony; Farmy wiatrowe; Inspekcje dronem; Lotnictwo morskie; Offshore; Analiza ryzyka

Abstract: With the increase in global investments in offshore wind energy and the rapid implementation of wind technologies in hazardous deep water environments, operational inspection of wind turbines and related infrastructure plays an important role in the safe and efficient operation of offshore wind farms. In recent years, much attention has been paid to the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and remotely piloted unmanned aerial vehicles (RPAs) commonly referred to as "drones" for remote inspection of renewable energy infrastructure, i.e. photovoltaic farms and onshore wind farms. Drones have significant potential also in offshore wind energy. Inspection with drones allows for to reduce not only the number of flight operations (involvement of aircraft and flight crews) and the transport of personnel carrying out the maintenance and repair of offshore wind turbines. With drones is possible carry the equipment transported for hazardous inspection work. The involvement of UAVs also reduces the plant downtime needed to detect faults and collect diagnostic information from the entire wind farm. The benefits of inspection technology in the offshore wind energy industry based on drones are confirmed by the previous tests, and the prospect of offshore energy development encourages further work with the use of UAVs. At the same time, it should be borne in mind that any unexpected failure of the drone system during its mission may interrupt control works (during inspections), and thus reduce the electricity generated by wind turbines. The article presents the potential of drones in the process of inspecting wind farms, including offshore wind farms, presents examples of UAV models used for inspections, indicates methods of conducting inspections with the use of drones and highlights a significant reduction in the costs of the operation of offshore wind farms as a result of limiting the use of manned aviation (helicopters and flight crews) and the elimination of the risk associated with the involvement of personnel to perform inspections of wind farms at sea. The potential of unmanned floating platforms as part of cooperation with UAV in the process of inspecting offshore wind farms was also indicated.

Keywords: Wind energy; Drones; Wind farms; Drone inspections; Aviation, Offshore; Risk analysis

W ostatnich latach technologie morskiej energetyki wiatrowej zyskały powszechną uwagę i doświadczyły szybkiego rozwoju ze względu na wiele zalet jakie oferują. Sytuacja geopolityczna związana z konfliktem rosyjsko – ukraińskim oraz decyzjami społeczności międzynarodowej w kontekście dywersyfikacji źródeł energii (ograni-

czenia uzależnienia poziomu dostaw gazu z Federacji Rosyjskiej), stała się dodatkowym bodźcem dla rozwoju morskich farm wiatrowych offshore.

W 2020 roku w Europie dokonano kolejnych inwestycji w morską energetykę wiatrową – na dziewięciu farmach wiatrowych podłączono do sieci 356 nowych morskich turbin

wiatrowych co przyniosło dodatkowe 2,9 GW mocy. Tym samym całkowita zainstalowana moc morskiej energii wiatrowej Europy wynosi obecnie 25 GW, co odpowiada 5402 turbinom wiatrowym podłączonym do sieci w 12 krajach [7]. Przyglądając się rejonom geograficznym, Morze Północne pozostaje najbardziej ugruntowanym

basenem morskim w Europie, pod względem skumulowanych instalacji morskich turbin wiatrowych z prawie 20 GW (79%) wszystkich morskich mocy wiatrowych w Europie. Pozostałą resztę stanowią Morze Irlandzkie (12%), Morze Bałtyckie (9%) i Ocean Atlantycki (<1%). Światowa Rada Energetyki Wiatrowej (GWEC) szacuje, że do końca 2030 r. całkowita moc morskiej energii wiatrowej na świecie wzrośnie do ponad 234 gigawatów (GW) [3].

W porównaniu z wiatrami na lądzie zasoby wiatru na obszarach morskich są bardziej obfite, silniejsze i więcej bardziej konsekwentnie. Ponadto morskie turbiny wiatrowe, poprzez środowisko w którym pracują względnie są mniej hałaśliwe, a przez to bardziej przyjazne dla środowiska niż ich odpowiedniki na lądzie. Morskie turbiny wiatrowe nie powodują zanieczyszczenia środowiska naturalnego, a wytwarzanie energii nie generuje emisji do atmosfery jakichkolwiek szkodliwych związków, ani żadnych odpadów. Energję

pochodzącą z elektrowni wiatrowych charakteryzuje stały koszt, co wpływa na wzrost konkurencyjności ekonomicznej względem konwencjonalnych źródeł energii.

Podczas działania elektrowni wiatrowej części ruchome ulegają ścieraniu oraz różnym awariom. Koszty związane z eksploatacją (O&M ang. operation i konserwacją ang. maintenance) zarówno lądowych jak i morskich elektrowni wiatrowych, stanowią dużą część całkowitego kosztu cyklu życia tych projektów. Szacuje się, że dla nowych urządzeń udział ten w całkowitych kosztach utrzymania wynosi 10 do 15 procent i zwiększa się wraz ze zużywaniem się turbiny nawet do wartości 35 procent [5]. W przypadku morskich farm wiatrowych dodatkowymi czynnikami są falowania morskie i sól. Ponadto zarówno elementy konstrukcji powyżej poziomu wody jak również elementy zanurzone oraz morskie stacje elektroenergetyczne, wymagają odpowiedniego nadzoru i bieżącego monitorowania ich funk-

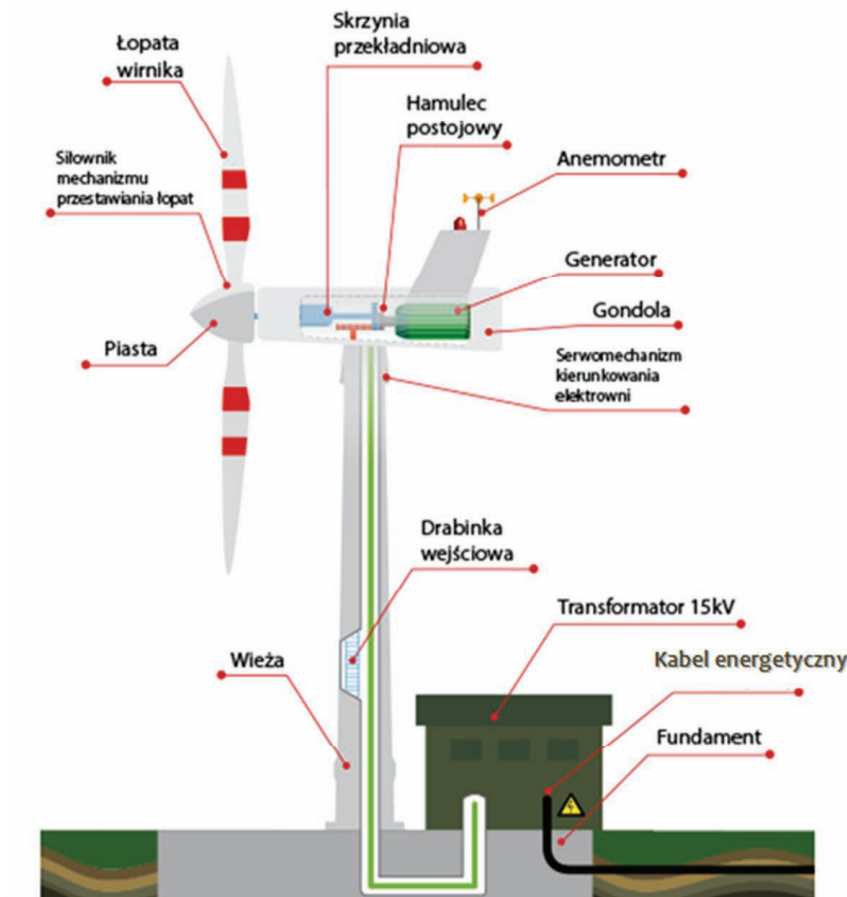
cjonowania [6].

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w procesie inspekcji i napraw morskich elektrowni wiatrowych jest zaangażowanie lotnictwa załogowego śmigłowców HHO (ang. Helicopter Hoist Operation) transportujących personel techniczny.

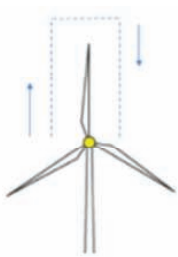
Śmigłowce HHO (ang. Helicopter Hoist Operation) wykorzystywane w operacjach śmigłowcowych z ładunkiem na zaczepie zewnętrznym w ramach zarobkowego transportu lotniczego. Lot HHO oznacza lot śmigłowcem wykonywany zgodnie z zaawizowaniem HHO, w celu ułatwienia transportu osób i/lub ładunku przy użyciu urządzeń dźwigowych śmigłowca (definicje zgodne z Rozporządzeniem Komisji (UE) nr 965/2012 z 5 października 2012 r. ustanawiające wymagania techniczne i procedury administracyjne odnoszące się do operacji lotniczych).

Kontrola wizualna niektórych komponentów, takich jak wieża, łopaty wirnika, piasta i ramy, wymaga bardzo dużych zasobów i często zajmuje dużo czasu. Operacja ta również stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia i bezpieczeństwa personelu ją wykonującego, w szczególności w przypadku trudnych warunków pogodowych (np. silny wiatr lub wysokie fale). Aby przeprowadzić pewne prace kontrolne na wewnętrznych elementach gondoli sięgającej na wysokość ok. 80 - 120 m nad poziomem morza, personel musi wspiąć się na wieżę turbiny wiatrowej. W celu sprawdzenia elementów wirnika (łopat i piasty) konieczne jest wykorzystanie lin zwisających od szczytu turbin wiatrowych. Personel pracuje przez kilka godzin na dużych wysokościach (często ponad 100 m) w warunkach morskich, co zdecydowanie zwiększa zagrożenie dla bezpieczeństwa a nawet życia.

Na całym świecie poczyniono duże postępy w automatyzacji procesu serwisowania farm wiatrowych. Przy obecnym charakterze i skali rozwoju a tym samym zakresie inspekcji farm wiatrowych, oczywistym jest fakt, iż



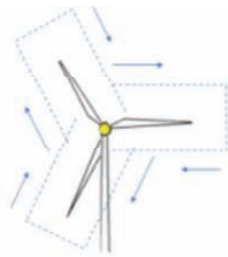
1. Główne elementy elektrowni wiatrowej. Źródło: <https://zielonestrefy.pl/zielone-strefy/odnawialne-zrodla-energii/energia-wiatru/>



Pozycja łopaty na godzinie 12



Pozycja łopaty na godzinie 6



Pozycja stała

2. Inspekcje turbiny wiatrowej na godzinie 12, 6 i w pozycji stałej. Źródło: opracowanie własne

metody obsługi i utrzymania z bezpośrednim udziałem ludzi, będą coraz częściej zastępowane robotami i dronami. Zaangażowanie bezzałogowych statków powietrznych (BSP) do przeprowadzania inspekcji morskich farm wiatrowych stanowi racjonalne i uzasadnione rozwiązanie dla dywersyfikacji ryzyka załogowych operacji lotniczych oraz ograniczenia kosztów. Opłacalność używania BSP do inspekcji będzie się różniła w zależności od liczby dziennej kontroli turbin, liczby personelu wymaganego dla każdej inspekcji oraz czasu pomiędzy poszczególnymi inspekcjami. Przeprowadzone dotychczas inspekcje wykazały, że półautomatyczne drony mogą skontrolować około 12 - 15 turbin wiatrowych dziennie, podczas gdy konwencjonalnymi metodami możliwe jest sprawdzenie do 2 - 3 turbin dziennie. Jeśli proces zostanie w pełni zautomatyzowany, potencjał dronów w inspekcji wzrasta do 20 turbin dziennie. Prace kontrolne morskich farm wiatrowych prowadzone są w okresach dobrej pogody i spokojnego stanu morza. Praktyka branżowa pokazuje, że inspekcje są często przeprowadzane w dwóch odstępach czasowych, raz w roku (zwykle w lipcu) lub dwa razy w roku (zwykle w maju i październiku) [4]. Częstotliwość przeglądów morskich farm wiatrowych zależy od wielu czynników, takich jak m.in.:

- rodzaje systemów lub komponentów zastosowanych w elektrowniach,
- potencjalnych trybach awaryjnych i prawdopodobieństwa ich wystąpienia,

- wpływu awarii na funkcjonalność systemu, dostępności statków serwisowych, dostępności do lokalizacji morskiej,
- warunków pogodowych itp.

Zadania tradycyjnie wykonuje się na dwa sposoby używając „dostępu linowego” lub „kamery naziemnej”. Kontrola dostępu linowego obejmuje dwóch lub więcej pracowników wspinających się na szczyt turbiny wiatrowej i schodzących po każdej łopacie z pomocą lin lub podwyższonych platform w celu zidentyfikowania i wychwycenia defektów. Zagrożeniem stosowania tej metody jest ryzyko wypadnięcia do morza. Podczas inspekcji kamera stoi na łodzi około 70 - 80 m od turbiny wiatrowej i robi zdjęcia elementów. W celu inspekcji morskich turbin wiatrowych wyłącznie z użyciem drona, BSP są transportowane statkiem (np. łodzią) lub helikopterem, a następnie lecą na szczyt turbin wiatrowych z pomocą pilota (operatora BSP). Operacje kontrolne z użyciem dronów w morskich farmach wiatrowych obejmują co najmniej dwóch pracowników, jeden do sterowania dronem (pilot/operator), a drugi do sterowania łodzią (kapitan jednostki pływającej).

Kontrola łopat elektrowni wiatrowej z użyciem drona może być przeprowadzona na trzy sposoby (rys. 2)

- pozycja ostrza na godzinie 12
- podczas inspekcji każda łopata jest ręcznie ustawiona w kierunku do góry. Dron leci manualnie lub automatycznie wzdłuż boków łopaty, obejmując w całości powierzchnię łopaty i utrzymując kamerę w na-

chyleniu 0 stopni, skierowaną pionowo do jej powierzchni. Manewr wykonywany jest z przodu i z tyłu łopaty.

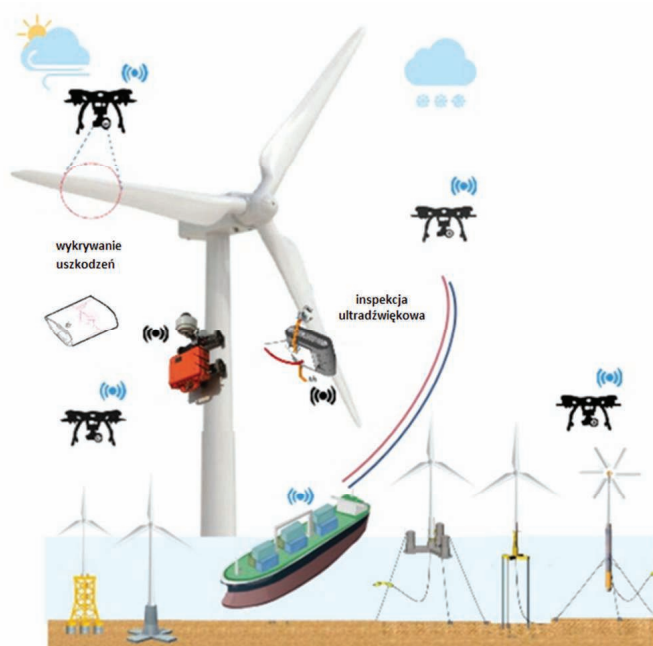
- pozycja łopat na godzinie 6
- w trakcie inspekcji każda łopata jest ręcznie ustawiona w kierunku do dołu. Dron leci manualnie lub automatycznie wzdłuż boków łopaty, utrzymując kamerę w nachyleniu 0 stopni skierowaną pionowo do jej powierzchni.
- pozycja stała
- turbina wiatrowa na czas inspekcji jest ręcznie zatrzymywana w określonej lub losowej pozycji (wyłączając pozycję na godzinie 6 i 12). Dron w trybie automatycznego lotu z misją przelatuje wokół stron łopaty, rejestrując dane wzdłuż powierzchni. Manewr wykonywany jest z przodu i z tyłu łopaty.

Wśród uszkodzeń farm wiatrowych wykrywanych przez drony należy wskazać:

- pęknięcia zmęczeniowe,
- zmęczenia korozyjne spowodowane rozwojem pęknięć przy jednoczesnym działaniu korozji,
- korozję (jednolitą, zlokalizowaną),
- korozję wżerową prowadzącą do powstawania małych otworów w poszyciu łopat/wieży/gondoli turbin,
- naprężenia cykliczne,
- uszkodzenia mechaniczne,
- ekstremalne obciążenia powodowane wiatrem/falami.

Wraz z przewidywanym wzrostem w nadchodzących latach rynku inspekcji z wykorzystaniem dronów w sektorze morskiej energetyki wiatrowej, technologia ta stanie się bardziej przystępna cenowo, szybsza i łatwiejsza.

Na czas inspekcji drony mogą zawisnąć w jednym miejscu i wykonywać wysokiej jakości zdjęcia elementów turbin wiatrowych z różnych pozycji i pod różnymi kątami (rys. 3). Następnie obrazy te mogą być (są) analizowane



3. Platformy zrobotyzowane w procesie inspekcji morskich farm wiatrowych. Źródło: [8]

przez system komputerowy w celu zidentyfikowania wczesnych oznak defektów lub uszkodzeń turbin oraz zidentyfikowania odpowiednich działań konserwacyjnych, aby zapobiec

występowaniu trybów awaryjnych. W tym celu używane są kamery o wysokiej rozdzielczości zainstalowane na pokładzie drona. Dodatkowo mogą być również instalowane czujniki

optoelektroniczne (OE ang. Optoelectronic) pracujące w podczerwieni (IR ang. Infrared) oraz w bliskiej podczerwieni (NIR ang. Near-Infrared), a także hiperspektralne w celu przechwytywania różnych rodzajów danych, w tym wizualnych i termowizyjnych.

Uzyskiwanie wysokiej jakości danych w inspekcjach elektrowni wiatrowych z wykorzystaniem dronów potwierdza wyższą efektywność BSP wobec inspekcji wykonywanych przez personel techniczny. Urządzenia te (drony) mogą latać 3-10 metrów nad łopata i krążyć wokół niej, aby objąć całą powierzchnię turbiny, są często wyposażone w kamerę cyfrową, kamerę termowizyjną lub kombinację obu. Dzięki inspekcji termograficznej można uzyskać dokładniejsze dane dotyczące temperatury na dużych powierzchniach, wad ukrytych, korozji i innych nieprawidłowości. Testy wykazały, jak defekty w kompozytowych łopatach turbiny wiatrowej można wykryć za pomocą drona wyposażonego w kamerę termowizyjną [2]. Oprogra-

Tab. 1. Metody badań nieniszczących (NDT) turbin wiatrowych

NDT	Zalety	Wady
Badania ultradźwiękowe UT (ang. Ultrasonic Testing)	- wysoka czułość - wykrywanie wad powierzchni - informacja o głębokości defektów - powtarzalne wykrywanie wad - możliwość czystości trybu - niska złożoność sygnałów - kontrola na żądanie	- wymaga rozległej wiedzy technicznej - wymaga przygotowania powierzchni - trudności w sprawdzaniu nieregularnych kształtów - wysoka penetracja - czasochłonne - krótkoterminowa inspekcja terenowa - potrzebny jest nadzór - wysokie tłumienie sygnału
Emisja akustyczna AE (ang. Acoustic Emission)	- wysoka czułość - wysoki stosunek sygnału do szumu (SNR) - lokalizacja wady - potrafi wykryć awarie na wczesnym etapie - kontrola pasywna i eksploatacyjna - przenośna lub wysoce zautomatyzowana praca - możliwość dostosowania do bezprzewodowych sieci czujników - nie jest potrzebny nadzór - zakres częstotliwości jest daleki od zaburzeń obciążenia - długoterminowa inspekcja terenowa - brak konieczności demontażu i czyszczenia próbki - wymaganych jest kilka punktów dostępu	- niepowtarzalne wydarzenie - oparte na wydarzeniach - wymagana jest bardzo wysoka częstotliwość próbkowania - brak wyników ilościowych dotyczących rozmiaru i głębokości - wysokie tłumienie sygnału
Światłowody (ang. Fibre optics)	- wysoka czułość - brak tłumienia na długich dystansach - mały rozmiar i niewielka waga - wysokie możliwości multipleksowania - odporność na zakłócenia elektromagnetyczne	- niepraktyczne dla dużych farm wiatrowych - wymaga szczególnej dbałości o bezpieczną instalację - podatność na uszkodzenia fizyczne - czułość termiczna
Badania termograficzne TT (ang. Thermographic Testing)	- kontrola na dużą skalę - pełne pokrycie w krótkim czasie - może być używany w niedostępnych miejscach - wymagany jest dostęp z jednej strony - nie jest wymagane żadne szczególne bezpieczeństwo	- ograniczone do wad powierzchniowych lub przypowierzchniowych - obsługa ręczna i kosztowna - trudne w użyciu na obracających się ostrzach - trudne do wykrycia uszkodzenia wnętrza - opiera się na regularnych inspekcjach - krótkoterminowa inspekcja terenowa - potrzebny jest nadzór
Badania radiograficzne RT (ang. Radiographic Testing)	- informacja o głębokości defektów - nadaje się do złożonych konstrukcji i różnych materiałów - kontrola na dużą skalę - pełne pokrycie w krótkim czasie - obrazy 2D i 3D - dobra wrażliwość na kontrast	- obsługa ręczna (kosztowna), potrzebny jest nadzór - wymagany jest dwustronny dostęp - trudne w użyciu na obracających się ostrzach - zagrożenia dla zdrowia i bezpieczeństwa - opiera się na regularnych inspekcjach - krótkoterminowa inspekcja terenowa

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [1]



4. Dron kwadrokopter, model Matrice 300 RTK. Źródło: <https://enterprise.dji-ars.pl/inspekcje-turbin-wiatrowych-z-wykorzystaniem-dronow-zwieksza-wydajnosci-i-niezawodnosci-farm-wiatrowych/>



5. Dron ze skrzydłem stałym, model Quantix. Źródło: <https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/sprzet/quantix-przemyslowy-dron-od-aerovironment/g53xj9z>

mowanie fotogrametryczne do wykrywania defektów łopat turbin wiatrowej na podstawie zdjęć lotniczych wykonywanych przez drona stanowi element budowania biblioteki danych, które następnie można oznaczyć metatagami i wykorzystywać do skonstruowania trójwymiarowego modelu ostrza łopaty z dokładnością trudną do osiągnięcia metodami ręcznymi.

Najpowszechniejsze metody badań nieniszczących NDT (ang. Non-Destructive Testing) możliwe do wykonania z użyciem BSP w trakcie inspekcji turbin wiatrowych również morskich zostały przedstawione w tabeli 1 [1].

Rodzaje dronów używanych w inspekcjach farm wiatrowych

Bezzałogowe statki powietrzne, możliwe do zastosowania przy operacji inspekcji farm wiatrowych można ogólnie podzielić na trzy rodzaje urządzeń latających: jednowirnikowych, wielowirnikowych i wielowirnikowych ze skrzydłem stałym.

- Multirotor lub multicopter

- to rodzaj drona, który składa się z trzech wirników (znanych jako trikoopter), czterech wirników (kwadrokopter), sześciu wirników (heksakopter) lub ośmiu wirników (oktokopter).

Kwadrokoptery są najpopularniejszymi i najszerzej stosowanymi dronami wielowirnikowymi, ponieważ zapewniają najlepszą równowagę między unoszeniem, kontrolą, zwrotnością i kosztem. Drony wielowirnikowe to najtańszy rodzaj dronów na rynku, jednak wymagają dużo energii do działania, a ich wytrzymałość i szybkość jest ograniczona. Przy obecnej technologii akumulatorów drony wielowirnikowe są w stanie latać tylko przez około 20 do 30 minut na raz, niosąc lekki ładunek kamery.

- Dron ze stałym skrzydłem
- rodzaj drona zaprojektowanego z jednym sztywnym skrzydłem, takim jak samolot, które zapewnia unoszenie, a nie pionowymi wirnikami podnoszącymi. Drony stałopłaty potrzebują energii tylko do

poruszania się do przodu, ale nie do zawisu w powietrzu, przez co są znacznie wydajniejsze niż drony wielowirnikowe, są również w stanie pokonywać duże odległości i mapować duże obszary. Niemniej jednak ich główne wady to wysoki koszt i niemożność wykonania zawisu w jednym miejscu.

- Dron jednowirnikowy - posiadający tylko jeden wirnik, który utrzymuje maszynę w górze, i wirnik ogonowy, który kontroluje kierunek lotu. Może zawisać z dużym ładunkiem (np. lotniczy skaner laserowy LIDAR) lub mieć mieszankę zawisu z dużą wytrzymałością lub szybkim lotem do przodu. Drony jednowirnikowe to skomplikowane urządzenia, a ich obracające się ostrza mogą być niebezpieczne. LIDAR (od ang. akronimu, utworzonego od wyrażenia: Light Detection and Ranging) jest to metoda pomiaru odległości poprzez oświetlanie celu światłem laserowym i pomiar odbicia za pomocą czujnika. Pod względem trudności w użyciu drony jednowirnikowe plasują się pomiędzy wielowirnikowcami a dronami stałopłatowymi.



6. Dron jednowirnikowy, model TD112-G. Źródło: <https://tianda.en.made-in-china.com/product/YN-dxutarheVY/China-12kg-Load-Full-Autonomous-Single-Rotor-Oil-Power-Plant-Protection-Drone.html>

Wnioski

Wraz ze wzrostem liczby instalowanych elektrowni morskich w celu zwiększenia mocy morskiej energetyki wiatrowej na świecie, podejmo-

wane są prace badawczo-rozwojowe dla obniżenia uśrednionego kosztu energii, aby morska energetyka wiatrowa była bardziej konkurencyjna i atrakcyjna dla inwestorów. Eksploatacja i konserwacja (O&M) stanowią dużą część całkowitego kosztu cyklu życia i są najdłuższą fazą rozwoju projektów morskiej energetyki wiatrowej. W związku z tym skrócenie czasu, kosztów obsługi i utrzymania stanowi najwyższy priorytet dla operatorów, producentów oraz firm ubezpieczeniowych w sektorze morskiej energetyki wiatrowej. Według niektórych badań wysokie wydatki na O&M morskich farm wiatrowych wynikają głównie z ograniczonego dostępu do infrastruktury turbin w celu kontroli i konserwacji. Aby pokonać bariery dostępności i obniżyć koszty, w ostatnich latach w branży morskiej energetyki wiatrowej wiele uwagi poświęcono wykorzystaniu dronów i technologii zdalnego wykonywania inspekcji. Oprócz potwierdzonej optymalizacji kosztów, ograniczenia zagrożenia dla ludzi i załogowych statków powietrznych wykorzystywanych do misji na morzu, zaletą jest fakt, że drony mogą zmniejszyć zapotrzebowanie na ciężki sprzęt do podnoszenia do wykonywania zadań kontrolnych. Drony inspekcyjne wyposażone w potężną kamerę cyfrową zdolną do przechwytywania obrazów lotniczych w wysokiej rozdzielczości z wieży, gondoli, łopat wirnika i połączeń śrubowych stanowią doskonałe rozwiązanie dla dywersyfikacji ryzyka inspekcji z bezpośrednim udziałem człowieka. Obrazy i dane zebrane przez BSP można analizować za pomocą techniki uczenia maszynowego (ang. machine learning) w celu tworzenia algorytmów służących wykrywaniu wczesnych oznak degradacji i identyfikowania odpowiednich działań konserwacyjnych, aby zapobiec występowaniu trybów awaryjnych i przestojów w pracy elektrowni wiatrowych. Dzięki temu drony mogą skrócić czas potrzebny na wykrycie usterek i zebranie informacji diagnostycznych ze wszystkich turbin wiatrowych.

Jednocześnie pomimo wszystkich potencjalnych korzyści, technologia kontroli morskich turbin wiatrowych z użyciem dronów wciąż pozostaje na etapie rozwoju i konieczne są dalsze badania w celu zidentyfikowania potencjalnych luk technologicznych, możliwości i przyszłych wymagań technologii w zakresie sprzętu, oprogramowania oraz danych gromadzonych w trakcie procesu przygotowania i prowadzenia inspekcji. Wskaźnik awaryjności dronów jest znacząco niższy niż w lotnictwie załogowym. Aby zidentyfikować, przeanalizować i złagodzić ryzyko, a także obniżyć koszty utrzymania związane z awarią dronów dedykowanych do inspekcji morskich farmach wiatrowych, konieczne jest opracowanie metodologii, które będą w stanie określić niezawodność drona zarówno na poziomie systemu, jak i jego komponentów. Niezawodność, która jest definiowana jako prawdopodobieństwo bezawaryjnego funkcjonowania systemu przez określony czas w zaprojektowanym środowisku, jest kluczowym wskaźnikiem wydajności systemów dronów. Zapewnienie dostępności dronów w trybie misji jest wyzwaniem, ponieważ każda nieprzewidziana awaria systemu drona podczas jego lotu może spowodować przerwanie prac inspekcyjnych, a tym samym znaczne ograniczenie energii elektrycznej wytwarzanej przez turbiny wiatrowe. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bouzid, O.M., In-Situ Health Monitoring for Wind Turbine Blade Using Acoustic Wireless Sensor Networks at Low Sampling Rates, Ph.D. Thesis, Newcastle University, Newcastle, UK, 2013
- [2] Galleguillos, C.; Zorrilla, A.; Jimenez, A.; Diaz, L.; Montiano, Á.L.; Barroso, M.; Viguria, A.; Lasagni, F. Thermographic nondestructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems. *Plast. Rubber Compos.* 2015, 44, s. 98-103

- [3] Global Wind Energy Council (GWEC). Global Offshore Wind Report 2020, <https://gwec.net/global-offshorewind-report-2020/> (dostęp 15 January 2022)
- [4] Karyotakis, A. On the Optimisation of Operation and Maintenance Strategies for Offshore Wind Farms. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University College London, London, UK, 2011.
- [5] Problemy eksploatacyjne elektrowni wiatrowych, <https://swiatoze.pl/problemy-eksploatacyjne-elektrowni-wiatrowych/>
- [6] Raport o oddziaływaniu na środowisko dla zmiany decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla przedsięwzięcia Morska Farma Wiatrowa MFW Bałtyk II, Tom II, Sekcja 4, Warszawa, styczeń 2021 r., s.6
- [7] Wind Europe, Raport Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics 2020, luty 2021, s. 6
- [8] Shafiee M., Zhou Z., Mei L., Dinmohammadi F., Karama J., Flynn D., Unmanned Aerial Drones for Inspection of Offshore Wind Turbines: A Mission-Critical Failure Analysis,
- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, Dz. Urz. UE L 328/82
- [10] Europejska strategia na rzecz energii z morskich źródeł odnawialnych, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS_ATA\(2022\)698909](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS_ATA(2022)698909)
- [11] P. Meinschmidt, J. Aderhold, Thermographic Inspections of Rotor Blades, ECNDT, 2006.
- [12] Strategia UE na rzecz morskiej energii odnawialnej, listopad 2020, <https://ec.europa.eu>

Perspektywy rozwoju i wykorzystania Bezzałogowych Systemów Latających

Prospects for the development and use of Unmanned Aerial Systems



Leszek Cwojdzinski

Dr hab. inż. pil.

Airbus Poland S.A.

samolot221@wp.pl

Streszczenie: W niniejszej artykule zaprezentowano podstawowe założenia dotyczące perspektyw wykorzystania i rozwoju bezzałogowych systemów latających. Przedstawiono dane dotyczące użycia bojowych platform latających. Jednocześnie zaprezentowano kierunki rozwoju i wykorzystania cywilnych i bojowych systemów powietrznych w zadaniach na rzecz gospodarki narodowej i przyszłych konfliktach zbrojnych. Wskazano że bezzałogowe systemy powietrzne, użycie których przynosi znaczne korzyści finansowe, są typem uzbrojenia, które w najbardziej spektakularny sposób zmienia podejście użytkowników BSL przekształcając przy tym oblicze cywilnego i militarnego ich zastosowania. Użycie bezzałogowych platform latających w ramach zadań i misji bojowych wymusza nieustanny rozwój personelu w zakresie umiejętności realizacji skomplikowanych zadań dotyczących zarówno cywilnego jak i militarnego wykorzystania. Wpływając jednocześnie na zmianę taktyki użycia bezzałogowych systemów walki. Autor na podstawie analiz i porównań proponuje także aby prace rozwojowe i budowa elementów oraz systemów bezzałogowych platform latających stały się szansą dla rozwoju krajowych instytutów naukowo - badawczych i przemysłu zbrojeniowego, który powinien być w konsekwencji głównym dostawcą podstawowych typów nowoczesnego uzbrojenia.

Słowa kluczowe: Bezzałogowy statek powietrzny; Bsl; Kwadrokopter; Dron; Technologie multisensorowe; AI; UAV; Stealth

Abstract: This article presents the basic assumptions concerning the prospects for the use and development of unmanned flying systems. Data on the use of combat flying platforms are presented. At the same time, the directions of development and use of civil and combat air systems in tasks for the benefit of the national economy and future armed conflicts were presented. It was indicated that unmanned aerial systems, the use of which brings significant financial benefits, are a type of weapon that changes the approach of UAV users in the most spectacular way, transforming the face of their civil and military application. The use of unmanned aerial vehicles as part of combat tasks and missions forces continuous development personnel in terms of the ability to perform complex tasks related to both civil and military use. At the same time influencing the change of tactics of using unmanned combat systems. On the basis of analyzes and comparisons, the author also proposes that the development work and construction of elements and systems for unmanned aerial platforms become an opportunity for the development of national research institutes and the defense industry, which should consequently be the main supplier of basic types of modern weapons

Keywords: Unmanned aerial vehicle; UAV; Quadrocopter; Drone; Multisensor technologies; AI; UAV; Stealth

Na proces rozwoju Bezzałogowych Systemów Latających (BSL) i jego dynamikę, podobnie jak w innych rodzajach uzbrojenia wojskowego, ma wpływ szereg czynników natury politycznej, ekonomicznej, gospodarczej, społecznej i naukowej. Układ i siła poszczególnych czynników powoduje różne natężenie, proporcje oraz kierunki zmian w układzie wyposażenia sił zbrojnych w systemy załogowe i bezzałogowe. Na przestrzeni ostatnich lat presja finansowa oraz uwarunkowania polityczne stały się wiodącymi czynnikami dla wielu państw wobec rewizji wielkości wydatków obronnych, a przez to kształtowania polityki obronnej, pociągając za sobą zmiany w organizacji i strukturach sił zbrojnych oraz ich wyposażaniu. Przy

zachowaniu co najmniej aktualnego potencjału bojowego dąży się do zaspokojenia wyznaczonego poziomu ambicji obronnych i rozpoznawczych poprzez zapewnienie większej efektywności i skuteczności BSL stosując mniej kosztowne środki walki. W trend ten wpisują się znakomicie bezzałogowe systemy, które dzięki swoim wciąż zwiększającym się możliwościom, coraz częściej zastępują tradycyjne załogowe systemy walki.

W ostatnim dziesięcioleciu wzrósł znacząco udział ilościowy bezzałogowych platform latających w działaniach operacyjnych, ale nie tylko.

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną bezzałogową platformą latającą jest kwadrokopter (rys. 1). Ta najprostsza wielowirnikowa konstrukcja jest zdolna

nie tylko do latania po zaprogramowanej trasie, czy też realizacji poleceń operatora w celu zmiany parametrów lotu, ale również dzięki zastosowaniu śmigieł o zmiennym skoku, posiada zdolność wykonywania dynamicznych manewrów oraz figur akrobacyjnych. Inżynierowie Mark Cutler i Jonathan P. Howe zaprezentowali opracowane przez siebie nowe możliwości zdalnie sterowanych latających platform wirnikowych. Kwadrokoptery posiadają nieosiągalne dotychczas możliwości manewrowe. Rozszerzono zdolność dronów ze śmigłami o stałym skoku o manewr obracania się śmigłami do dołu.

Kilka lat temu kwadrokoptery wykorzystywano np. do dostarczania pizzy. Amerykański Massachusetts Institu-



1. Kwadrokopter ANAFI WORK 4k

te of Technology (MIT) udowodnił, że kwadrokoptery mogą realizować misje przewodników oprowadzających gości i studentów po kampusie uczelni, który zdaniem studentów i gości jest prawdziwym labiryntem. System o nazwie SkyCall składa się z kwadrokopterów i zainstalowanej w smartfonie aplikacji. W przypadku utraty orientacji na terenie uczelni, wystarczy wezwać drona. Kwadrokopter przyleci do miejsca wezwania, a dzięki wprowadzonemu w aplikacji punktowi docelowemu wyznaczy trasę i rozpocznie prowadzenie do celu. Prototypowe kwadrokoptery używają w tym celu m.in. modułu WiFi, GPS i kamery. Co istotne, podczas lotu dron posiada funkcjonalność dostosowania prędkości lotu do osoby podążającej za nim oraz omijania przeszkód na torze przemieszczania się. W razie potrzeby dron potrafi cofnąć się lub zatrzymać, gdy prowadzona przez niego osoba zatrzyma się, np. by porozmawiać lub przeczytać coś na tablicy ogłoszeń. Ponadto, choć za wezwanie i ustalenie miejsca docelowego odpowiada odpowiednia aplikacja, dron obsługuje również komunikaty głosowe. Istotną funkcją drona jest możliwość działania wewnątrz budynków. W tym przypadku przeszkodą mogą okazać się tradycyjne drzwi. Problem ten można wyeliminować za pomocą zastosowania czujników, które otwierałyby drzwi przed nadlatującym przewodnikiem. Dzięki zastosowaniu kwadrokoptera wraz z bieżącym połączeniem z aplikacją mobilną problem utraty orientacji i straty czasu na poszukiwanie właściwej drogi, został rozwiązany.

Doświadczenie zdobyte podczas prac nad SkyCall zaprocentuje zapewne przy innym projekcie, w którym rój kwadrokopterów ma zostać wykorzystany do zbierania danych środowiskowych, działań poszukiwawczych i militarnych w obiektach budowlanych czy w obszarze zurbanizowanym. Pozwoli to na drobiazgową analizę terenu objętego badaniem, z uwzględnieniem m.in. :

stanu zanieczyszczenia powietrza, wód czy występujących na danej przestrzeni roślin. Przedstawiony przez MIT pomysł wydaje się więc nie tylko ciekawy, ale również na tyle dopracowany, że podobne urządzenia w niedalekiej przyszłości mogłyby zastąpić przewodników wycieczek lub przewodników osób niedowidzących oraz niepełnosprawnych na wózkach, a także ratowników w rejonach dotkniętych klęskami żywiołowymi.

Działania bojowe w terenie zurbanizowanym uważane są za jedno z najtrudniejszych. Wsparcie żołnierzy przez przystosowane do tego bezzałogowe platformy latające - kwadrokoptery wyposażone w hybrydowe systemy pozycjonowania wydaje się być nieodzownym. Przewiduje się, że w najbliższym dziesięcioleciu udział bezzałogowych systemów powietrznych w potencjale sił zbrojnych - szczególnie państw NATO - wzrośnie czter-, pięciokrotnie, co pozwala sądzić, że wykorzystanie w pozostałych rodzajach sił zbrojnych Bezzałogowych Systemów Walki przyjmie podobną tendencję.

W perspektywie najbliższej dekady czy dwóch, postęp technologiczny w zakresie materiałów, nanomateriałów, systemów łączności i pozycjonowania, napędów oraz uzbrojenia będzie stymulował rozszerzenie pakietu możliwych obszarów podwójnego zastosowania BSP obniżając koszty ich pozyskania i eksploatacji.

Spodziewać się można również, że Bezzałogowe Systemy Powietrzne będą w jeszcze szerszym zakresie wzmacniać zdolności obserwacji i rozpoznania powietrznego. W szczególności rozpoznania z dużej (a zatem bezpiecznej) odległości. Zakres prowadzonej działalności rozpoznawczej, dzięki zastosowaniu multisensorowych układów zdecydowanie się poszerzy. Obecnie przewiduje się umieszczenie na pokładzie bezzałogowego statku powietrznego (BSP) stacji radiolokacyjnej lub

radaru z aperturą syntetyczną (SAR). Radar z syntetyczną aperturą (ang. SAR; Synthetic Aperture Radar) służy do uzyskiwania obrazów nieruchomych obiektów o wysokiej rozdzielczości, wykorzystywany jest do tworzenia obrazów powierzchni terenu Ziemi oraz innych planet z zastosowaniem technik teledetekcji. Lotnictwo wojskowe używa takie radary do rozpoznania Przypuszczalnie, szczególnie w odniesieniu do dużych BSP, uwidoczni się konstruowanie wielozadaniowych platform rozpoznawczych i komunikacyjnych, które dzięki umiejscowionej na podkładzie platformy szerokiej gamie urządzeń technicznych będą w stanie zasilać informacyjnie wojsko, służby ratowniczo-poszukiwawcze i służby porządku publicznego w zakresie wszystkich kategorii informacji rozpoznawczych, od optoelektronicznych poprzez elektroniczne, oraz sygnałowe wykrywanie czynników skażeń i broni masowego rażenia. Posiadanie wielu źródeł zdobywania informacji wpłynie na uniezależnienie procesu ich pozyskiwania np. od warunków atmosferycznych (zachmurzenie, zapylenie itp.).

Ze względu na zróżnicowany zakres i charakter potrzebnej informacyjnej na poszczególnych szczeblach dowodzenia, widoczne są znaczące różnice w wyposażeniu, zdolnościach taktyczno-technicznych przeznaczeniu bezzałogowych statków powietrznych, ale przede wszystkim w układzie aerodynamicznym i rozwiązaniu problemów napędu. Coraz powszechniejsze stają się bezzałogowe platformy latające (UAV) w układzie kwadro i multikoptera na uwięzi. Takie rozwiązanie umożliwia praktycznie nieprzerwane przebywanie platformy w powietrzu, gdyż przewodem więziowym dostarczana jest jednocześnie energia elektryczna. UAV tego typu mogą oczywiście mieć również zastosowanie cywilne, zmniejszając tym samym koszty ich wytwarzania i eksploatacji. Konstrukcje, wykorzystywane do wsparcia bezpośredniego walczących wojsk, będą wymagały posiadania zdolności zwiększonego przetrwania w środowisku działań wysoko nasyconym środkami walki. Stąd, wiele projektowanych konstrukcji BSP wykonywanych jest w technologii „stealth”. Na przestrzeni ostatniej dekady dostrzega się dynamiczny rozwój bezzałogowych statków

powietrznych różnych klas i w różnych układach aerodynamicznych co wynika głównie z liczby firm, które je projektują i produkują, oferując rozwiązania wychodzące naprzeciw wymaganiom przyszłych konfliktów zbrojnych i potrzeb służb porządku publicznego.

Analiza materiałów źródłowych pozwala wnioskować, że podobnie jak w przypadku załogowych, również rozwój bezzałogowych statków powietrznych będzie zachodzić w dwóch zasadniczych kierunkach, mianowicie: udoskonalanie i doposażenie już eksploatowanych BSL oraz projektowanie, budowa i wdrażanie nowych jakościowo i operacyjnie konstrukcji latających.

Kolejne generacje bezzałogowych statków powietrznych charakteryzować się będą zwiększeniem niezawodności i poziomu bezpieczeństwa lotu (przewiduje się, że czas bezawaryjnej pracy systemu wzrośnie z 300 do 1 000 godzin lotu). Co więcej, dzięki mniejszej masie startowej bezzałogowe statki powietrzne staną się bardziej mobilne i nie będą wymagać stałych baz i dróg startowych oraz rozbudowanej infrastruktury. Liczebność personelu obsługowego może zostać zredukowana do kilku osób obsługi naziemnej i operatorów, przy utrzymaniu zdolności do prowadzenia operacji lotniczej przez całą dobę. Jednocześnie w perspektywie najbliższych dwóch dekad można spodziewać się wykształcenia nowych wyspecjalizowanych bezzałogowych statków powietrznych. Najprawdopodobniej ten rodzaj środka walki będzie obecny w działaniach walki elektronicznej (WE), zarówno w zakresie osłony elektronicznej, jak i oddziaływania ofensywnego - niszczenia systemów elektronicznych bądź zakłócania ich pracy. Przewiduje się również, że działania BSP walki elektronicznej będą łączone w celu uzyskania kompletności systemu oddziaływania elektronicznego z wyspecjalizowanymi platformami załogowymi, w szczególności współpracując w niebezpiecznej strefie konfliktu zbrojnego, w bliskości zakłócanych obiektów. Pogląd ten zgodny jest z planami rozwojowymi systemów bezzałogowych wyartykułowanymi przez planistów amerykańskich. W dalszej perspektywie rozwoju Bezzałogowych Systemów Walki wskazują oni na potrzebę łączenia działań platform i systemów załogowych z częścią bezza-

łogową. Nowy jakościowo system określany jako *Manned-Unmanned System Teaming (MUM-T)* będzie posiadał zdolności do realizacji następujących grup zadań:

- zwalczanie sił ofensywnych naziemnych, nawodnych z większych odległości (*Stand-off Distance*);
- zapewnienie mobilności wojsk w operacji wejścia na teatr działań (*Initial Entry*);
- zapewnienie zdolności do przemieszczania i wykonania manewrów podczas prowadzenia działań ofensywnych;
- zapewnienie środków na rozwinięcie i podtrzymanie linii komunikacyjnych oraz logistycznych;
- zapewnienie osłony rozmieszczonych elementów wojsk;
- zapewnienie ciągłej obserwacji i rozpoznania teatru działań oraz neutralizacja wykrytych i zidentyfikowanych zagrożeń.

Wyszczególniona lista zadań pozwala na zidentyfikowanie kolejnego obszaru rozwoju bezzałogowych środków powietrznych, a mianowicie wsparcie transportu wojsk i zaopatrzenia realizowanego w różnym wymiarze: strategicznym, operacyjnym i taktycznym. Zadania tego typu będą wykonywane w oparciu o różnorodną pod względem parametrów techniczno-taktycznych bezzałogową platformę latającą. Obecnie w bezzałogowe statki powietrzne do zadań transportu lotniczego wyposażane są przede wszystkim pododdziały sił specjalnych, czyli jednostki działające z dużym stopniem autonomii, we wrogim otoczeniu oraz w oderwaniu od własnych źródeł zaopatrzenia. Przewiduje się jednak rozszerzenie kręgu potencjalnych użytkowników transportowych bezzałogowych statków powietrznych, doprowadzając do wykształcenia się różnych klas tego sprzętu. Beneficjentem dzięki tym rozwiązaniom stanie się zapewne także gospodarka narodowa, a szczególnie ważna jej czyli transport i logistyka. Zgodnie z Planem Modernizacji Technicznej Sił Zbrojnych, na początku trzeciej dekady XXI wieku, Siły Zbrojne RP mają dysponować 5 podstawowymi kategoriami bezzałogowych systemów powietrznych (BSP):

- mini BSP bardzo krótkiego zasięgu (kryptonim „Wizjer”, do 40 zesta-

wów), dedykowane do wykorzystywania na szczeblu batalionu

- mini BSP pionowego startu i lądowania (kryptonim „Ważka”, do 15 zestawów), dzięki możliwością wykonania zawisu i prowadzenia obserwacji punktowej zdolnym do działań w terenie zurbanizowanym
- taktycznymi BSP krótkiego zasięgu (kryptonim „Orlik”, do 15 zestawów), dedykowane do wykorzystywania na szczeblu brygady
- taktycznymi BSP średniego zasięgu (kryptonim „Gryf”, do 10 zestawów).
- bojowymi bezzałogowymi systemami powietrznymi 2. generacji, wykonanych w technologii utrudnionej wykrywalności, zdolnych do operowania w warunkach intensywnego przeciwdziałania systemów obrony powietrznej przeciwnika. Będą to przede wszystkim systemy rozpoznawczo - uderzeniowe, zdolne do wspólnego operowania z załogowymi platformami powietrznymi, czyli prowadzenia działań pół autonomicznych.

Program zakupu samolotu F-35 powiązany jest ściśle z pozyskaniem bezzałogowego systemu rozpoznawczo - uderzeniowego, zdolnego do wspólnego operowania z załogowymi platformami powietrznymi - Loyal Wingman [1]. Konstrukcja tego poddźwiękowego BSP będzie dostosowana do działania w wielodomenowym środowisku pola walki (odpowiednie zabezpieczenia w domenie cyber oraz łączność z satelitami systemu dedykowanego do współpracy z rojem BSP), a także dostosowane do działań samodzielnych, w tym w roju bezzałogowców, dokonujących wymiany informacji o sytuacji w przestrzeni walki pomiędzy sobą i o obiektach uderzenia. Program Loyal Wingman (rys. 2.) rozwijają intensywnie Stany Zjednoczone. Do tej pory zapoczątkowano kilka programów naukowo - badawczych prowadzonych m. in. przez firmy:

- Kratos Defense & Security Solution – program XQ-58 Valkyrie;
- Lockheed Martin – program NextGen;
- Boeing - Airpower Teaming System, program rozwijany dla Australii;
- FCAS - europejska koncepcja Loyal Wingman rozwijana wspólnie przez Dassault i Airbus Defence & Space;

- Tempest, program rozwijany przez Wielką Brytanię.

Łączność pomiędzy stacją kontroli oparta zostanie o łączą laserowej transmisji danych (zmniejszenie śladu elektromagnetycznego).

Na pokładzie BSP Loyal Wingman, zaimplementowany zostanie multilateralny system sterowania i nawigacji oparty o algorytmy sztucznej inteligencji (AI). BSP będzie działał w oparciu o algorytmy zobrazowania predykcyjnego YOLO (*You Only Look Ones*) (przeprowadzanie uderzeń wyprzedzających, bazując na danych pozyskanych od systemów sztucznej inteligencji).

Docelowo jedną z tego typu konstrukcji (prawdopodobnie rozwiązania amerykańskiego) ma zakupić Polska w ramach programu „Harpi Szpon”.

Wnioski

Użycie wyspecjalizowanych bezzałogowych platform latających przynosi znaczne korzyści, w tym m.in.: ograniczenie wydatków finansowych, obniżenie kosztów szkolenia i utrzymania gotowości systemu do realizacji zadań, zmniejszenie ryzyka strat niezamierzonych, moralnych i politycznych skutków przechwycenia załogi statku powietrznego. Dotychczasowe doświadczenia pokazują iż wiele misji wykonywanych dotąd przez samoloty lub śmigłowce, może z powodzeniem być realizowanych przez systemy bezzałogowe. Niemniej jednak, załogowy statek powietrzny pozostanie jeszcze częścią arsenału militarnego, gdyż w możliwej do przewidzenia przyszłości BSP z uwagi na niewystarczające zaawansowanie technologiczne do zwycięzania w walkach powietrznych i wywalczenia panowania w powietrzu, nie wyprą systemów zało-

gowych, a raczej będą stanowić ich uzupełnienie. Powagę długoterminowych strategii planowania w celu osiągnięcia zakładanych rezultatów, pokazują amerykańskie koncepcje rozwoju systemów bezzałogowych zawarte w opublikowanym w lutym 2014 r. „*US Air Force RPA Vector: Vision and Enabling Concepts 2013 - 2038*” [3]. Ten szczegółowy dokument zastąpił koncepcję rozwoju bezzałogowych systemów walki USAF na lata 2009 - 2047 (*United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047*) [2]. Tendencja rozwojowa Bezzałogowych Systemów Powietrznych wskazuje, że proces nasycenia sił zbrojnych tym rodzajem środków walki będzie postępował dynamicznie szczególnie w obrębie środków rozpoznawczo - uderzeniowych.

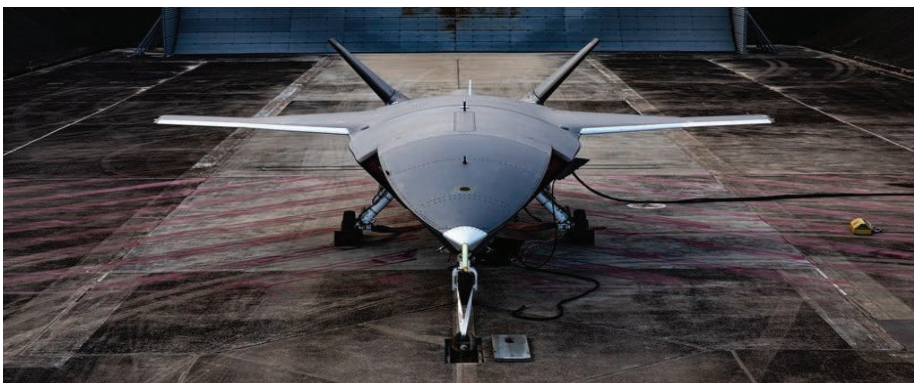
Mając na uwadze geopolityczne położenie Polski – niezależnie od tego jak oceniamy prawdopodobieństwo konfliktu zbrojnego, który mógłby nas dotknąć – w procesie opracowania planów modernizacji technicznej Sił Zbrojnych, należy koncentrować się na zapewnieniu zdolności do odparcia ataku na terytorium Polski. O ile konflikt zbrojny w klasycznej formie obecnie nie wydaje się scenariuszem prawdopodobnym, o tyle nie powinno być poddawane w wątpliwość innego rodzaju użycie sił zbrojnych. Zdolność do prowadzenia działań (uderzeń) o charakterze odwetowym należy zatem traktować jako nieodłączny element potencjału odstraszania, jaki powinny posiadać Siły Zbrojne RP. Zdefiniowanie wymaganych zdolności poszerzy gamę dostępnych możliwości reagowania w sytuacji kryzysu i konfliktu poniżej progu wojny. Osłabienie nieprzyjacielskiego potencjału uderzeniowego, jest rozwiązaniem bardziej ryzykownym politycznie, jednakże z operacyjnego punktu widzenia dają-

cym większe korzyści niż podjęcie próby zniszczenia nadlatujących pocisków balistycznych czy rakiet samosterujących. Teoretycznie, Federacja Rosyjska mogłaby zdecydować się na zaatakowanie określonego członka NATO jedynie w przypadku braku zdecydowanej postawy pozostałych sygnatariuszy Traktatu Waszyngtońskiego.

Polskie Siły Powietrzne (również: Wojska Lądowe i Marynarka Wojenna) powinny zatem posiadać systemy uzbrojenia umożliwiające rażenie obiektów pola walki na głębokości od 100 do co najmniej 500 km., czyli pociski AGM-158 JASSM (*Joint Air-to-Surface Standoff Missile*) i JASSM ER. Brak tej zdolności stanowi obecnie jedną z głównych słabości SZ RP. Konflikt o ograniczonej skali, w tym poniżej progu wojny, wydaje się dziś być scenariuszem, najmniej prawdopodobnym choć oczywiście nie można go wykluczyć, tym bardziej przyjmując około 20 letni horyzont czasowy. ◀

Materiały źródłowe

- [1] <https://geekweek.interia.pl/raporty/raport-wojna-przyszlosci/wiadomosci/news-boeing-odpalil-silnik-loyal-wingman-to-bezzałogowy-dron-przy,nld,4735000>
- [2] United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047, Headquarters, United States Air Force Washington DC, maj 2009,
- [3] US Air Force RPA Vector: Vision and Enabling Concepts 2013–2038, Headquarters, United States Air Force, luty 2014
- [4] Cwojdzinski L., Bezzałogowe Systemy Walki - charakterystyka, wybrane problemy użycia i eksploatacji, Wyd. WAT, Warszawa, 2014
- [5] Cwojdzinski L., Eksploatacja bezzałogowych statków powietrznych, systemy antykolizyjne, Logistyka, nr 3, 2015, s. 801—808
- [6] Cwojdzinski L., Zadania wykonywane przez systemy platform bezzałogowych i powody ich stosowania, <http://www.5zywiolow.pl/>
- [7] Cwojdzinski L., Lewitowicz J., Żyłuk A., Kolizje bezzałogowych statków powietrznych z załogowymi statkami powietrznymi WydITWL, Warszawa, 2012



2. Loyal Wingman firmy Boeing. Źródło: [1]



REKMA Sp. z o.o.

ul. Szlachecka 7

32-080 Brzezie

tel. +48 12/633 59 22

fax +48 12/397 52 20

www.rekma.pl

- Dylatacje bitumiczne EDM typ Rekma
- Dylatacje mechaniczno-asfaltowe
SILENT-JOINT^{RESA}
- Szczeliny dylatacyjne w nawierzchniach betonowych i asfaltowych
- Naprawa spękań nawierzchni
- Specjalistyczne cięcie nawierzchni betonowych i asfaltowych
- Wypełnianie szczelin dylatacyjnych w torowiskach tramwajowych
- Natrysk środkami hydrofobowymi i hydrofilowymi
- Rowkowanie (grooving) nawierzchni
- Specjalistyczne wiercenie otworów pod kotwy i dyble
- Kruszenie nawierzchni betonowych metodą ultradźwiękową – RMI



SPECJALISTYCZNE PRACE DROGOWE