

mgr inż. Judyta Bąk
Katedra Transportu Lotniczego
Wydziału Transportu i Inżynierii Lotniczej
Politechnika Śląska
e-mail: judyta_bak@wp.pl

dr inż. Robert Konieczka
Katedra Transportu Lotniczego
Wydziału Transportu i Inżynierii Lotniczej
Politechnika Śląska
e-mail: robert.konieczka@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-1095-2973

PERSPEKTYWA ZASTOSOWANIA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH W TRANSPORCIE MEDYCZNYM

Abstrakt

Obecnie wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do celów innych niż militarne zyskuje na znaczeniu. Rozwój technologii lotniczych pozwala na odnalezienie nowych zastosowań dla tego typu statków powietrznych. Drony wykorzystywane są do celów transportowych, ratowniczych, przemysłowych, komercyjnych, rekreacyjnych, hobbyistycznych itp. Nikt jednak nie stosuje ich do szeroko rozumianego transportu medycznego.

Artykuł stanowi próbę przedstawienia propozycji zastosowania bezzałogowych statków powietrznych do celów związanych z medycyną. Cele te należy rozumieć jako transport komponentów medycznych, w tym: krwi do transfuzji, narządów do przeszczepów, leków czy szczepionek. W opracowaniu wskazano na czynniki mające wpływ na powodzenie realizacji takiej misji oraz przedstawiono wstępne założenia konstrukcji drona o przeznaczeniu medycznym. Ponadto zdefiniowano korzyści, jakie mogą płynąć z wdrożenia tejże koncepcji.

Aktualnie transport jakichkolwiek produktów czy komponentów może odbywać się w sposób szybki i bezpieczny. Dlatego wiele firm stawia na rozwój technologii związanych z dronami. Opracowywane są technologie pozwalające na transport przesyłek czy paczek kurierskich z wykorzystaniem właśnie tego typu środków transportu. Również w medycynie bezzałogowe statki powietrzne zyskują na znaczeniu. Niezbędne są szybkie reakcje na pojawiające się problemy. Dla niektórych pacjentów każda sekunda może być na wagę życia, a drony pod względem szybkości stanowią konkurencję dla konwencjonalnych środków transportu.

Celem pracy było określenie możliwości i zasadności wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do celów medycznych. Wykorzystano przy tym analizę SWOT i FMEA, określając mocne i słabe strony oraz szanse i zagrożenia związane z tą koncepcją. Ponadto przeprowadzono badanie ankietowe mające na celu poznanie opinii osób związanych ze środowiskiem medycznym i technicznym.

Jak wskazano w opracowaniu potencjalnie, pod pewnymi warunkami, możliwe jest wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do celów przewozu narządów, krwi oraz leków, jednak transport ten obciążony jest pewnym ryzykiem związanym zarówno z warunkami technicznymi, jak i błędami ludzkimi. Opracowanie definiuje te problemy, wskazując na możliwości przeciwdziałania im.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny, dron, medycyna, transport medyczny

PROSPECTS FOR THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN MEDICAL TRANSPORT

Abstract

Currently, the use of UAVs for non-military purposes is gaining importance. The development of aviation technology allows finding new applications for this type of aircraft. Drones are used for purposes like: transportation, industrial, rescue, commercial, recreational, hobbyist, etc. However, no one uses them for widely understood medical transport.

The article is an attempt to present suggestions for the use of unmanned aerial vehicles for medical purposes. These purposes should be understood as the transport of medical components including blood for transfusion, organs for transplantation, medicines or vaccines. The paper points out the factors that affect the success of such a mission and presents the initial assumptions for the design of a drone for medical purposes. In addition, the benefits that may arise from the implementation of this concept are defined.

Currently, the transport of all kinds products or components can be done quickly and safely. Therefore, many companies are focusing on the development of drone-based technologies. Technologies are being developed to allow the transport of parcels or courier packages using this type of transport. Unmanned aerial vehicles are also gaining importance in medicine. Quick reactions to emerging problems are necessary. For some patients every second can be vital and drones compete with conventional means of transport in terms of speed.

The purpose of this study was to determine the feasibility and validity of using unmanned aerial vehicles for medical purposes. SWOT analysis and FMEA were conducted identifying the strengths, weaknesses, opportunities and threats associated with this concept. In addition, a survey was conducted to find out the opinions of those in the medical and technical community.

As indicated in the study, it is potentially possible, under certain conditions, to use UAVs for the transport of organs, blood, and medicines; however, this transport entails some risks associated with both technical conditions and human factor. The study defines these problems indicating possibilities of counteracting them.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, medicine, medical transport

Wstęp

Przedmiotem niniejszego opracowania jest przedstawienie możliwości i zasadności wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych (BSP¹) do celów medycznych oraz perspektyw ewolucji tej koncepcji.

¹ BSP – bezzałogowy statek powietrzny.

Rozwój lotnictwa oraz technologii lotniczych pozwolił na wprowadzenie licznych modyfikacji i ulepszeń w zakresie efektywności i ekonomii transportu powietrznego. W związku z tym w ostatnim okresie można zaobserwować również znaczący wzrost wykorzystania środków bezpilotowych w różnorodnych dziedzinach. Statki powietrzne ulegają wielu usprawnieniom poprzez zmniejszenie ich masy, poprawę osiągow i parametrów pracy. Podobne zmiany wprowadza się w odniesieniu do bezzałogowych statków powietrznych. Wprowadzane ulepszenia pozwalają na ich adaptację do nowych ról i zadań.

Podstawową ideą działania bezzałogowych statków powietrznych jest możliwość ich zdalnego sterowania lub przeprowadzania lotów automatycznych – bez nadzoru. Drony nie posiadają ujednoczonej konstrukcji, w związku z czym występuje wiele wariantów ich budowy. Różnią się m.in.: wielkością, liczbą ramion (w przypadku wielowirnikowców), układem śmigieł oraz zastosowanym napędem.

Drony, tak jak inne statki powietrzne, podlegają określonym regulacjom prawnym. Przepisy odnoszące się do bezzałogowych statków powietrznych zawarte są między innymi w konwencji chicagowskiej, rozporządzeniach Komisji Europejskiej oraz ustawie Prawo lotnicze. W ostatnich latach dla poprawy bezpieczeństwa zostały wprowadzone nowe przepisy definiujące poszczególne klasy bezzałogowych statków powietrznych, określające obowiązki producentów i dystrybutorów oraz precyzujące zasady przemieszczania się w przypadku lotów z widocznością i w ograniczonej widoczności [2].

Aby określić możliwość wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do celów medycznych, koniecznym było przeprowadzenie wieloaspektowej analizy, która ujawniła mocne i słabe strony koncepcji, potencjalne możliwości i zagrożenia, wskazała krytyczne elementy bezzałogowego statku powietrznego oraz umożliwiła poznanie opinii ekspertów związanych z branżą medyczną i konstruktorską. Opracowanie zawiera także ocenę zasadności wprowadzania nowego środka transportu do celów medycznych. Pozwala na określenie, czy jest on konkurencyjny wobec innych dostępnych środków transportu medycznego: karettek lub śmigłowców. Ponadto definiuje poziom spełnienia oczekiwania odbiorców.

Zastosowanie kilku metod badawczych ma na celu poddanie tematu wieloaspektowej analizie. Analiza literatury pozwala na poznanie nomenklatury oraz przepisów prawnych, jakie stosowane są w odniesieniu do bezzałogowych statków powietrznych. Analiza SWOT wskazuje jednocześnie mocne i słabe strony przedstawionej koncepcji oraz szanse i zagrożenia. Analiza FMEA określa natomiast krytyczne elementy konstrukcji dronów. Natomiast badanie opinii publicznej wskazuje stanowisko osób zainteresowanych wobec postawionej tezy. Wszystkie wskazane metody badawcze pozwalają na interdyscyplinarne podejście do problematyki artykułu.

1. Bezzałogowe statki powietrzne – typy, wyposażenie, przepisy prawne

Bezzałogowe statki powietrzne mogą przybierać różne formy konstrukcyjne w zależności od ich przeznaczenia. Wyróżnia się zasadniczo trzy podstawowe typy konstrukcyjne BSP:

- płatowcowe (których kształt kadłuba zbliżony jest konstrukcyjnie do klasycznego samolotu, cechuje je daleki zasięg i wytrzymałość),
- wirnikowe (których zasada działania polega na wytwarzaniu siły nośnej z wykorzystaniem wirnika nośnego tak jak następuje to w śmigłowcu, cechuje je łatwość przeprowadzania procedury startu i lądowania (bez rozbiegu i dobiegu) oraz wysoka stabilność lotu i precyzyjna kontrola),
- hybrydowe (połączenie konstrukcji płatowcowych i wirnikowych, posiadają one kombinację cech obu powyższych rodzajów) [5].

Istotnym elementem konstrukcyjnym drona jest rama, której kształt uzależniony jest m.in. od: rodzaju zastosowanego napędu, liczby wirników, wyposażenia dodatkowego oraz oczekiwanych osiągnięć i parametrów pracy. Oprócz tego bezzałogowe statki powietrzne wyposaża się w napęd zależny od rodzaju misji i wymagań, które ma on realizować. W przypadku wielowirnikowców niezbędnymi elementami są śmigła, które powinny być wykonane z materiałów o podwyższonej wytrzymałości i odporności na niekorzystne warunki zewnętrzne. Aby umożliwić nieprzerwaną łączność z operatorem drona, możliwość kontroli parametrów pracy i sterowania bezzałogowym statkiem powietrznym, wyposaża się go w komputer wraz z niezbędnym oprogramowaniem oraz podzespoły kontroli. W zależności od przeznaczenia drony mogą mieć wyposażenie dodatkowe, gdy realizują misje o specjalnym przeznaczeniu. Wśród wyposażenia dodatkowego można wyróżnić: kamery, czujniki, systemy emitowania, radary, czujniki podczerwieni itd. [4, 5, 8, 11, 12, 13].

Zasada działania napędu bezzałogowego statku powietrznego jest zbliżona do zasady działania wirnika nośnego śmigłowca. Wirnik główny wytwarza siłę nośną na łopatach, oprócz niej powstaje siła reakcyjna, która oddziałuje i jest równoważona przez śmigło ogonowe w śmigłowcu. W przypadku *multikopterów* (wielowirnikowców) siła reakcyjna kompensowana jest przez napęd na przeciwnym ramieniu i obrót śmigieł w przeciwnym kierunku [11].

Aby zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa i niezawodność przeprowadzania operacji lotniczych, muszą być one prawnie uregulowane. Bezzałogowe statki powietrzne, podobnie jak tradycyjne samoloty czy śmigłowce, obowiązują ustalone normy i zasady wynikające z Prawa lotniczego i przepisów wykonawczych. Każdy operator lub posiadacz drona zobowiązany jest do przestrzegania prawa zarówno międzynarodowego, jak i krajowego. Wśród norm regulujących operacje

związane z bezzałogowymi statkami powietrznymi wyróżniamy m.in.: aneks drugi Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, rozporządzenia delegowane i wykonawcze Komisji Europejskiej oraz wszelkie inne akty normatywne określające przepisy w odniesieniu do działań związanych z dronami [2].

2. Transport medyczny – dostępne metody transportu, przechowywanie, regulacje prawne

W transplantologii najistotniejszym czynnikiem, który wpływa na zdolność jej realizacji, jest czas. Transport narządów wymaga płynnej koordynacji między miejscem poboru tkanek lub narządów a szpitalem, w którym ma nastąpić przeszczep. Oprócz zapewnienia płynności transportu ważne są również aspekty, takie jak: niezawodność, bezpieczeństwo, zapewnienie optymalnych warunków transportu dla komponentów medycznych oraz koordynacja w przypadku wystąpienia jakichkolwiek komplikacji.

Narządy, które mogą zostać wykorzystane do transplantacji, to m.in.: serce, płuca, nerki, wątroba, trzustka i jelita. Po ich pobraniu następuje proces transportu, który może być realizowany z użyciem karettek, śmigłowców i samolotów. Czas, w jakim transport może zostać zrealizowany, jest bardzo krótki i różny dla poszczególnych narządów.

Cała sieć pobierania i przeszczepiania narządów ma ściśle określone reguły w zakresie ich konserwacji i pakowania. Organy umieszcza się w specjalnych rozтворach, często pakuje się je do opakowań zawierających lód. Oprócz specjalnych procedur dotyczących pakowania, narządy wymagają również odpowiedniego oznakowania, które zawiera informacje o rodzaju pobranej tkanki, czasie, miejscu pobrania, miejscu docelowym transportu itp. [9, 10].

Wśród dostępnych środków transportu do transportu medycznego wykorzystuje się: ambulanse z oznaczeniem T (transportowe), które służą do przewozu poszkodowanych i chorych oraz do transportu krwi do transfuzji lub narządów do przeszczepów. Oprócz tego wykorzystywane są śmigłowce i samoloty Lotniczego Pogotowia Ratunkowego oraz środki transportu wojskowe, policyjne i prywatne [9, 14].

Zarówno proces transplantacji, jak i transport komponentów medycznych podlega licznym regulacjom, zarówno krajowym, jak i europejskim. Wśród norm i przepisów prawnych wyróżnić należy dyrektywy Parlamentu Europejskiego, rozporządzenia Ministra Zdrowia oraz ustawę z 1 lipca 2005 r. o pobieraniu i przeszczepianiu, komórek tkanek i narządów [1].

3. Analiza wstępna – określenie czynników mających wpływ na realizację transportu medycznego

Transport krwi, komórek, narządów ludzkich czy leków jest przedsięwzięciem logistycznym obciążonym bardzo dużym ryzykiem. Podczas tego działania personel medyczny, kierowcy oraz piloci, a także przewożone narządy, tkanki lub krew narażeni są na szereg niebezpieczeństw. Zagrożenia te związane są zarówno ze środkami transportu wykorzystywanymi do przewozu komponentów, ich wyposażeniem oraz niezawodnością, ale także z błędami popełnianymi przez samych ludzi. Oprócz wspomnianych błędów i zagrożeń związanych bezpośrednio z człowiekiem i ze środkami transportu istnieje szereg czynników zewnętrznych mających wpływ na realizację zadania transportowego.

Biorąc pod uwagę środki transportu, niepowodzenie przewozu komponentów medycznych może być spowodowane np. przez:

- niewłaściwie przeprowadzone prace serwisowe pojazdu, samolotu lub śmigłowca,
- zły stan techniczny środka transportu,
- brak odpowiedniego oświetlenia i sygnałów dźwiękowych w pojeździe uprzywilejowanym,
- brak wymiany płynów eksploatacyjnych i ogumienia,
- występowanie zdarzeń losowych i wypadków drogowych na trasie przejazdu,
- niedbałość o podzespoły pojazdu oraz o wymagane wyposażenie transportowe,
- uszkodzenie systemów chłodzących komponenty lub pojemników transportowych,
- ukryte wady konstrukcyjne urządzeń służących do transportu,
- złe dopasowanie cykli obsługowych i diagnostycznych,
- przekroczenie dopuszczalnych norm czasu eksploatacji elementów,
- problemy z lokalizatorami GPS² i mapami nawigacyjnymi itp. [6].

Wymienione tu przyczyny niepowodzenia nie wyczerpują otwartego katalogu niepowodzeń.

Kolejna istotna grupa czynników mających wpływ na realizację transportu to grupa czynników zewnętrznych. Wśród uwarunkowań, jakie mogą uniemożliwić przewóz komponentów, można wymienić: drgania, hałas oraz warunki atmosferyczne. Wśród warunków atmosferycznych możemy wyróżnić: wszelkiego rodzaju opady (deszcz, grad, mżawka), wiatr, mgłę (podwyższona wilgotność), słońce, burze (wyładowania atmosferyczne), ciśnienie atmosferyczne itp.

Ostatnia grupa czynników związana jest z bezpośrednią działalnością człowieka i określana jako czynnik ludzki. Do tej grupy należą m.in.: stres, zmęcze-

² GPS – *Global Positioning System* – System nawigacji satelitarnej.

nie, niewłaściwa komunikacja, brak doświadczenia i odpowiednich kwalifikacji, nadmierna prędkość, niestosowanie się do przepisów ruchu drogowego i lotniczego, kierowanie po spożyciu alkoholu lub innych środków, brak koncentracji, pośpiech itd.

3.1. Analiza SWOT³

Analiza SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats* – Mocne strony, Słabe strony, Szanse, Zagrożenia) jest jedną z metod badawczych pozwalających na zestawienie pozytywnych i negatywnych cech strategii. Zakłada ona określenie mocnych i słabych stron pomysłu oraz szans i zagrożeń związanych z jego realizacją. Mocne strony określane są jako zasoby, umiejętności, konkurencyjność wobec innych środków transportu itd. Wśród słabych stron wyróżnia się czynniki hamujące rozwój koncepcji i wpływające na całokształt przedsięwzięcia. Przez szanse rozumie się pozytywne przewidywania odnośnie pomysłu i potencjalne osiągnięcia z nim związane. Wszelkie negatywne zmiany i prognozy dotyczące przyszłości to zagrożenia.

Głównym problemem poddanym analizie jest zasadność wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do celów medycznych. Użycie bezzałogowego statku powietrznego rozważane jest jako alternatywny środek transportu zastępujący pojazdy samochodowe, samoloty, śmigłowce oraz inne jednostki transportowe. Cele medyczne to przede wszystkim transport niezbędnych komponentów medycznych, w tym krwi do transfuzji, leków, narządów oraz tkanek, ale również dotarcie z pomocą medyczną do poszkodowanych w trudno dostępne miejsca.

Dla ilustracji i zestawienia wymienionych cech stworzono tabelę (tab. 1).

Po określeniu mocnych i słabych stron koncepcji oraz szans i zagrożeń przeprowadzono kolejny krok analizy, na podstawie którego wybrano strategię, jaką należy się kierować przy wprowadzaniu koncepcji transportu medycznego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych do życia. Jest to strategia konkurencyjna, która zakłada przewagę słabych stron, ale również szans. Należy postarać się wyeliminować jak największą liczbę słabych stron pomysłu poprzez wprowadzenie modyfikacji konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego, udoskonalenie procesu transportowego, szkolenie operatorów oraz zdobywanie doświadczenia przez personel obsługujący itp. Szanse powinny być wykorzystywane w przyszłości w celu popularyzacji nowoczesnych rozwiązań transportu artykułów medycznych.

³ SWOT – Technika analizy informacji w oparciu o mocne i słabe strony koncepcji oraz potencjalne szanse i zagrożenia (S – *Strengths*, W – *Weaknesses*, O – *Opportunities*, T – *Threats*).

Tab. 1. Analiza SWOT

Mocne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> • Szybki czas transportu • Brak uczestnictwa w ruchu drogowym (korki, wypadki, zdarzenia drogowe) • Bezpieczeństwo przeprowadzania operacji • Zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne • Długi czas działania bezzałogowego statku powietrznego w przypadku zastosowania konkretnych napędów (turbinowy, tłokowy) • Niewielkie koszty związane z eksploatacją • Precyzyjność przeprowadzania manewrów • Łatwa kontrola nad BSP • Dostępność różnego rodzaju UAV⁴ na rynku • Zastępowalność 	<ul style="list-style-type: none"> • Odpowiedzialność za komponenty medyczne przeniesiona na statek powietrzny • Brak kontroli nad komponentami w trakcie transportu w powietrzu • Wysokie koszty zakupu bezzałogowego statku powietrznego • Eksploatacja wymagająca odpowiedniego poziomu wiedzy i umiejętności • Ograniczony zasięg w przypadku BSP o napędzie bateryjnym • Dodatkowe wymagania w zakresie dostosowania infrastruktury do możliwości lądowania drona • Brak określonych interwałów między obsługami technicznymi • Złożoność konstrukcji BSP
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none"> • Ratunek dla życia ludzkiego • Dotarcie wsparcia medycznego do trudno dostępnych miejsc • Alternatywa dla konwencjonalnych środków transportu • Rozwinięcie infrastruktury związanej z dronami • Odnalezienie nowych zastosowań dla BSP 	<ul style="list-style-type: none"> • Wpływ warunków atmosferycznych • Możliwość wystąpienia awarii • Możliwość zaistnienia kolizji z udziałem ludzi lub innych statków powietrznych • Możliwość przejęcia BSP • Generowanie hałasu i zanieczyszczeń mających negatywny wpływ na dzikie zwierzęta i środowisko

Źródło: [3]

Wśród dostępnych zagranicznych pozycji literaturowych analiza SWOT jest również wykorzystywana w kontekście bezzałogowych statków powietrznych. Autorzy za pomocą wspomnianej metody badawczej analizują m.in.: możliwość wykorzystania do różnorodnych zadań zgrupowanych dronów, tzw. rojów. Wskazują na możliwości dostosowania wyposażenia bezzałogowych statków powietrznych w odniesieniu do powierzonych misji, podkreślają również możliwość wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do celów związanych ze zdrowiem publicznym i medycyną. Autorzy opracowań wskazują jednocześnie, że koncepcja ma słabe strony i zagrożenia, jednak możliwym jest ich przezwyciężenie z wyko-

⁴ UAV – *Unmanned Aerial Vehicle* – Bezzałogowy statek powietrzny

rzystaniem nowoczesnych technologii. Niezbędnym jest przeprowadzenie licznych badań nad bezpieczeństwem dronów oraz edukacja ludzi w celu zmniejszenia obaw związanych z bezzałogowymi statkami powietrznymi.

3.2. Analiza FMEA⁵

Analiza FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Analiza rodzajów i skutków możliwych błędów) jest wykorzystywana do określania związków przyczynowo-skutkowych powstawania awarii i uszkodzeń podzespołów lub ich występowania w procesach. Metoda ta określa również czynniki krytyczności. Celem analizy jest zidentyfikowanie wad oraz zminimalizowanie lub całkowite ograniczenie ryzyka związanego z eksploatacją elementów lub realizacją procesów. FMEA pozwala na identyfikację zagrożeń na etapie projektowania lub użytkowania komponentów. Określenie ryzyka ma za zadanie umożliwić wprowadzenie niezbędnych poprawek i udoskonaleń, tak aby funkcjonowanie podzespołu lub procesu odbywało się w sposób jak najmniej awaryjny [7].

Na potrzeby analizy założono, że bezzałogowy statek powietrzny jest *quadrocopterem* (czterowirnikowcem) z napędem akumulatorowym, bez specjalistycznego wyposażenia. W celu realizacji analizy FMEA stworzono schemat blokowy (rys. 1) ilustrujący elementy składowe bezzałogowego statku powietrznego. Składa się on z dwóch poziomów. Pierwszy poziom to grupy elementów, z kolei na drugim poziomie znajdują się już wyszczególnione podzespoły BSP.

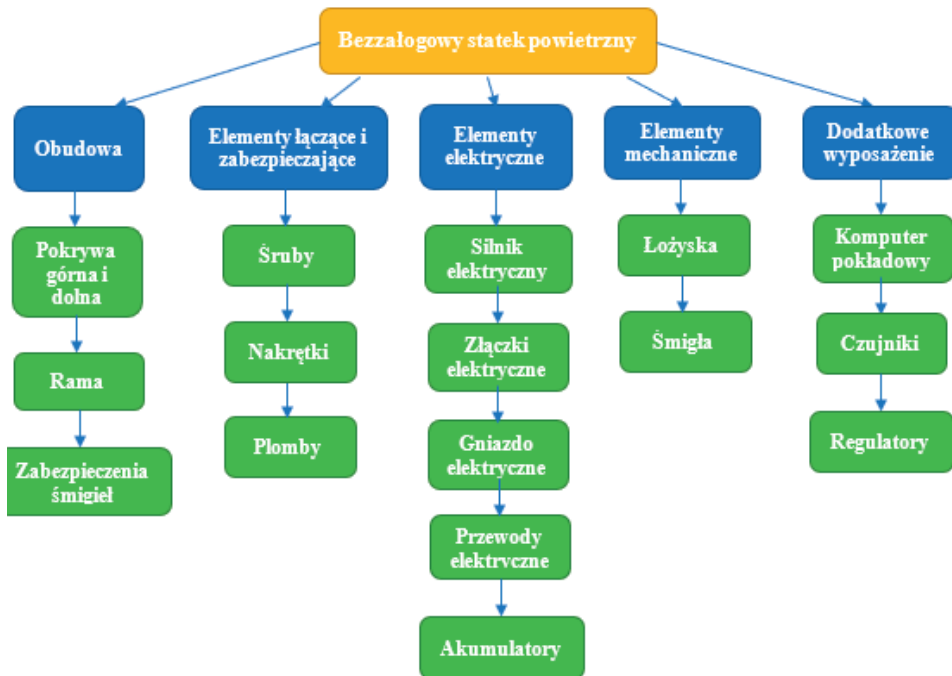
Na pierwszym poziomie zamieszczono grupy elementów: mechaniczne, na które składają się podzespoły, takie jak łożyska i śmigła. Kolejna grupa to elementy ściśle związane z prądem elektrycznym, czyli: silnik elektryczny, złączki, gniazda, przewody, baterie lub akumulatory. Następna grupa to elementy łączące i zabezpieczające. Są to śruby, nakrętki i plomby. Kolejną grupę stanowią elementy obudowy: pokrywa górna i dolna, rama, zabezpieczenia śmigieł. Ostatnia grupa to dodatkowe niezbędne wyposażenie, czyli: komputer pokładowy, czujniki i regulatory.

Analiza FMEA została przeprowadzona w celu określenia uszkodzeń, jakie występują dla poszczególnych podzespołów, ich skutków, przyczyn oraz metod wykrywania. Ponadto zaproponowano zalecenia umożliwiające ograniczenie wystąpienia awarii.

Ocena ryzyka wystąpienia uszkodzeń zawierała trzy elementy:

- S (*severity*) – dotkliwość skutków uszkodzenia,
- O (*occurrence*) – możliwość wystąpienia uszkodzenia,
- D (*detection*) – możliwość wykrycia uszkodzenia (przed wystąpieniem skutków).

⁵ FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis* – Analiza rodzajów i skutków możliwych błędów.



Rys. 1. Struktura bezzałogowego statku powietrznego

Źródło: [3]

Na podstawie wspomnianych trzech elementów możliwe było określenie miary znaczenia uszkodzenia funkcji (funkcjonalności) obiektu z uwzględnieniem wcześniej stworzonego schematu oraz wskazanie możliwych działań serwisowych lub naprawczych.

Oceny przydzielane są w skali 1–10, gdzie:

S–1 – skutek najmniej dotkliwy, 10 – skutek najbardziej dotkliwy,

O–1 – najmniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia, 10 – największe prawdopodobieństwo wystąpienia,

D – skala odwrócona, 1 – najłatwiej wykrywalne, 10 – najtrudniej wykrywalne.

RPN⁶ (*Risk Priority Number*) – jest to iloczyn poszczególnych elementów (S, O, D), ustala on tzw. poziom krytyczności. Na jego podstawie określa się uszkodzenia tolerowane oraz wymagania do podjęcia działań zapobiegawczych.

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

gdzie: S (*severity*) – dotkliwość skutków, O (*occurrence*) – możliwość wystąpienia,

D (*detection*) – możliwość wykrycia.

⁶ RPN – *Risk Priority Number* – Numer poziomu ryzyka.

Po przeprowadzeniu analizy wysunięto następujące wnioski. Największy możliwy poziom ryzyka uzyskano dla elementów elektrycznych oraz mechanicznych. Wśród nich najszybciej mogą ulec uszkodzeniu: silnik elektryczny, akumulator oraz śmigła. Wspomniane podzespoły narażone są na szereg działań, które w znaczący sposób obniżają ich sprawność i niezawodność. Silnik elektryczny może ulec przegrzaniu, mogą wystąpić przeciążenia oraz uszkodzenia wynikające z działania wibracji i zanieczyszczeń. Poziom krytyczności dla tych czynników prezentuje się w następujący sposób:

- przegrzanie silnika elektrycznego – $(7 S \cdot 8 O \cdot 6 D = 336 \text{ RPN})$,
- przeciążenie silnika elektrycznego – $(8 S \cdot 6 O \cdot 6 D = 288 \text{ RPN})$,
- uszkodzenia wynikające z wibracji – $(7 S \cdot 6 O \cdot 8 D = 336 \text{ RPN})$,
- uszkodzenia wynikające z zanieczyszczeń – $(5 S \cdot 7 O \cdot 8 D = 280 \text{ RPN})$.

Dla elementów mechanicznych najwyższy poziom krytyczności wyznaczono dla śmigła – deformacja kształtu profilu $(9 S \cdot 6 O \cdot 7 D = 378 \text{ RPN})$.

Ostatnim krokiem w analizie FMEA było określenie środków zaradczych mających na celu obniżenie współczynnika krytyczności RPN odpowiednio dla:

- przegrzania silnika elektrycznego – zastosowanie specjalistycznego systemu chłodzenia napędu bezzałogowego statku powietrznego i systemu informacji o przegrzaniu $(7 S \cdot 3 O \cdot 2 D = 42 \text{ RPN})$,
- przeciążenia silnika elektrycznego – zastosowanie regulatorów napięcia oraz ograniczników i systemu informującego (czujniki) o przepływie prądu przez poszczególne elementy $(6 S \cdot 4 O \cdot 2 D = 48 \text{ RPN})$,
- uszkodzenia wynikające z wibracji – zastosowanie osłon i podkładek tłumiących wibracje, odpowiednie wyważenie całego statku powietrznego $(5 S \cdot 4 O \cdot 6 D = 120 \text{ RPN})$,
- uszkodzenia wynikające z zanieczyszczeń – zastosowanie obudowy o wysokim stopniu szczelności i regularna kontrola stanu BSP $(5 S \cdot 5 O \cdot 6 D = 150 \text{ RPN})$,
- deformacji kształtu profilu śmigła – unikanie zderzeń z przedmiotami i innymi statkami powietrznymi, zastosowanie specjalnych osłon na śmigła, regularne inspekcje kształtu profilu aerodynamicznego śmigła, stosowanie materiałów o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych $(7 S \cdot 4 O \cdot 5 D = 140 \text{ RPN})$.

Wprowadzone zmiany pozwolą na uniknięcie błędów konstrukcyjnych oraz zapobieganie zdarzeniom lotniczym i zachowanie najwyższego poziomu bezpieczeństwa lotniczego. Najmniejsze ryzyko wystąpienia dotyczy możliwości przypadkowego resetu całego urządzenia $(\text{RPN} = 12)$. Jest to sytuacja sporadyczna i wynika z działania czynnika ludzkiego w postaci podłączenia nieprawidłowego oprogramowania do danego typu bezzałogowego statku powietrznego lub poprzez przypadkowe wciśnięcie przycisku reset.

3.3. Badanie opinii ekspertów, osób związanych z branżą konstruktorską i medyczną

W celu poznania stanowiska osób związanych z branżą medyczną oraz technologiami medycznymi wobec postawionej koncepcji przewozu komponentów medycznych drogą powietrzną z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych przeprowadzono badania ankietowe. Ankieta składała się z 15 pytań. Odpowiedzi na postawione w niej pytania pozwoliły na szerszą analizę przedstawionego problemu. Na podstawie tego badania wysnuto następujące wnioski. Większość osób biorąca udział w badaniu to kobiety, jednak różnica między liczbą kobiet a liczbą mężczyzn była niewielka.

Wśród ankietowanych najliczniejsze grupy wiekowe to grupa między 26–35 oraz między 36–45 rokiem życia, co oznacza, że w sondażu wzięli udział w większości młodzi ludzie. Pozostałe grupy wiekowe nie są aż tak liczne.

Respondenci w większości wykonują zawody związane z medycyną. Wśród nich są lekarze, pielęgniarki, ratownicy medyczni, specjaliści techniczni w zakresie sprzętu medycznego, pracownicy naukowcy, ale również osoby wykonujące inne zawody.

Wśród większości ankietowanych panuje przekonanie, że transport realizowany przez ambulanse jest skuteczny. Transport śmigłowiecowy lub samolotowy jest również postrzegany jako niezawodny i bezpieczny. Opinie o konwencjonalnych środkach transportu wykorzystywanych do transportu medycznego mogą sugerować, że nie ma potrzeby wprowadzania jakichkolwiek zmian w tym zakresie.

Ryzyko związane z przewozem komponentów medycznych zostało zidentyfikowane przez respondentów jako raczej niewielkie. Główne cechy, jakimi powinien charakteryzować się transport medyczny według osób poddanych badaniu, to: szybkość i bezpieczeństwo. Oprócz nich istotne są również niezawodność, skuteczność i dostępność.

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych według respondentów związane jest głównie z działalnością wojskową lub militarną. Niewiele osób opowiedziało się za przeznaczeniem: hobbystycznym, komercyjnym, przemysłowym czy medycznym. Wśród respondentów panuje więc przekonanie, że drony są najczęściej wykorzystywane w misjach wojskowych.

Respondenci określili zagrożenia, na jakie narażone są BSP w trakcie ich eksploatacji. Wśród nich znalazły się: awarie, niesprzyjające warunki atmosferyczne, kolizje, błędy związane z czynnikiem ludzkim itd.

Ostatnie trzy pytania ankiety były ściśle związane z badanym zagadnieniem. Pierwsze z nich dotyczyło możliwości wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do transportu komponentów medycznych. Większość respondentów wypowiedziała się pozytywnie o wspomnianej koncepcji, co daje nadzieję na pozytywne wprowadzenie jej w życie.

Kolejne pytanie było bardzo osobiste i odnosiło się do wyrażenia zgody na transport własnych narządów, krwi lub tkanek drogą powietrzną z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych. Ankietowani w większości, gdyby istniała taka sytuacja, wyraziliby zgodę na taki typ transportu. Biorąc pod uwagę ten fakt, potencjalnie możliwe jest wzięcie pod uwagę możliwości przewozu komponentów medycznych drogą powietrzną z wykorzystaniem dronów.

Ostatnie pytanie dotyczyło hipotetycznej konkurencyjności transportu powietrznego z wykorzystaniem BSP względem konwencjonalnych środków transportu w obrębie dużej aglomeracji. Większość osób biorąca udział w badaniu uznała bezzałogowe statki powietrzne jako teoretycznie konkurencyjne wobec standardowych metod przewozu komponentów medycznych w dużej aglomeracji.

Wnioski

Głównym celem niniejszego opracowania było określenie zasadności wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych do celów medycznych wraz ze zidentyfikowaniem potencjalnych zagrożeń mających wpływ na powodzenie misji transportowej. Rozwiązanie problemu badawczego możliwe było dzięki przeprowadzeniu szeregu badań takich jak analiza SWOT, analiza FMEA oraz badanie eksperckie.

Wykorzystanie analizy SWOT pozwoliło na zapoznanie się z mocnymi i słabymi stronami koncepcji oraz potencjalnymi szansami i zagrożeniami. Metoda ta okazała się dostatecznie skutecznym narzędziem. Wśród mocnych stron należy wymienić: szybki czas transportu, brak uczestnictwa w ruchu drogowym, bezpieczeństwo operacji, długi czas działania itd. Słabe strony to m.in.: brak kontroli nad komponentami w trakcie lotu, wysokie koszty zakupu BSP, obowiązek szkolenia personelu odpowiedzialnego za realizację zadania transportowego, złożoność konstrukcji dronów. Najbardziej znaczące szanse związane z koncepcją to: ratunek dla życia ludzkiego oraz dotarcie do miejsc o utrudnionym dostępie. Do zagrożeń zaliczyć można: wpływ warunków atmosferycznych, możliwość wystąpienia awarii lub kolizji oraz przechwycenie BSP. Na podstawie wyżej wymienionych czynników określono, jaką strategię należy obrać przy wprowadzaniu pomysłu do realizacji. Wybrano strategię konkurencyjną, która zakłada eliminację słabych stron i wykorzystanie szans w celu popularyzacji koncepcji.

Analiza FMEA pozwoliła na określenie krytycznych elementów konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego. Dron najbardziej narażony jest na awarie podzespołów, takich jak: silnik elektryczny, akumulatory oraz śmigła. Silnik elektryczny może ulec przegrzaniu lub przeciążeniu oraz awariom wynikającym z wpływu wibracji i zanieczyszczeń. Akumulatory ulegają głównie uszkodzeniom spowodowanym niewłaściwym przechowywaniem, a wśród śmigieł dominuje de-

formacja kształtu profilu. Wskazano rozwiązania mające na celu minimalizację lub całkowite wykluczenie występujących wad konstrukcji. W przypadku silnika elektrycznego należy rozważyć zastosowanie dodatkowego systemu chłodzenia i informacji o przegrzaniu oraz regulatorów napięcia, które ograniczą możliwość wystąpienia przeciążenia. Minimalizacja wpływu wibracji możliwa jest poprzez zastosowanie specjalnych elementów tłumiących oraz odpowiednie wyważenie całego statku powietrznego. Wpływ zanieczyszczeń może być ograniczany poprzez wykorzystanie obudowy statku powietrznego, zapewniającej wysoki poziom szczelności oraz przeprowadzanie regularnych kontroli BSP. Specjalne osłony na śmigła oraz stosowanie do ich budowy materiałów o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych gwarantuje ograniczenie wystąpienia deformacji kształtu profilu śmigła.

Kolejno posłużono się badaniem opinii ekspertów, którzy wyrazili swoje zdanie na temat postawionej tezy pracy. Według nich wykorzystanie dronów do celów transportowych jest jak najbardziej możliwe. Co więcej, według respondentów możliwe będzie w przyszłości ich stosowanie, właśnie do celów medycznych. Ankietowani wyrazili się w sposób pozytywny na temat przedstawionego problemu badawczego oraz wskazali potencjalne zagrożenia, m.in.: awarie, niekorzystne warunki atmosferyczne, kolizje, błędy ludzkie itd. Określili również najważniejsze cechy, jakimi powinien charakteryzować się transport medyczny, tzn. szybkość, bezpieczeństwo, niezawodność, skuteczność i dostępność.

Biorąc pod uwagę przeprowadzone badania, istnieje możliwość zastosowania bezzałogowych statków powietrznych do realizacji transportu medycznego. Warto rozwijać technologie związane z dronami i odnajdywać nowe zastosowania dla tego typu środków transportu. Obecnie możliwości bezzałogowych statków powietrznych są konkurencyjne wobec ambulansów, samolotów czy śmigłowców. Niewielkie rozmiary dronów pozwalają na stosowanie ich w miejscach o utrudnionym dostępie. Mnogość dostępnych napędów umożliwia ich eksploatację w różnych przedziałach czasowych. Konstrukcja bezzałogowych statków powietrznych może być dostosowana w zależności od misji, jakie mają pełnić. Zastosowanie szeregu dodatkowych czujników oraz innych akcesoriów sprawia, że poprawie ulegają własności wytrzymałościowe, niezawodnościowe i bezpieczeństwa BSP. Możliwym jest wprowadzenie tego typu środków transportu do floty ratownictwa medycznego, a zautomatyzowanie ich dyspozycji zagwarantowałoby szybką reakcję na zdarzenia. Koszty eksploatacji dronów są zdecydowanie mniejsze niż samolotów czy śmigłowców, a ich obsługa techniczna zabiera o wiele mniej czasu. Największym problemem w trakcie adaptacji bezzałogowych statków powietrznych do transportu komponentów medycznych może okazać się kwestia zapewnienia odpowiedniego poziomu chłodzenia ich przestrzeni bagażowych. Przy zastosowaniu niezależnego systemu chłodzącego zwiększa się masa drona, a tym samym ograniczone zostają jego możliwości precyzyjnego manewrowania. Koncepcja realizacji

transportu medycznego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych ma zdecydowanie więcej korzyści niż wad, dlatego warto rozważyć zastosowanie tego typu środków transportu jako alternatywy do konwencjonalnych środków transportu medycznego.

Stosowanie się do zaleceń określonych na podstawie poszczególnych badań pozwoli w przyszłości na opracowanie konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego dedykowanego celom medycznym. Aby było to możliwe, bardzo istotnym jest zapoznanie się z: zagrożeniami, na jakie narażone są drony w przestrzeni powietrznej, ich krytycznymi podzespołami, awariami, wpływem czynnika ludzkiego podczas ich eksploatacji, oczekiwaniami osób zainteresowanych wdrożeniem tego typu środków transportu oraz obowiązującymi przepisami zarówno krajowymi, jak i międzynarodowymi.

Bibliografia/References

1. Guzik-Makaruk E.M., *Transplantacja organów, komórek i tkanek w ujęciu prawnym i kryminologicznym*, Temida 2, Białystok 2008.
2. Konert A., *Bezzałogowe statki powietrzne. Nowa era w prawie lotniczym. Zagadnienia cywilno-prawne*, C.H. Beck, Warszawa 2020.
3. Bąk J., *Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do celów medycznych*. Praca magisterska. Promotor: Robert Konieczka. Politechnika Śląska, Katowice, 2021.
4. Becmer D., Duchaczek A., Skorupka D., *Trendy rozwojowe bezzałogowych systemów latających*, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Zielonka 2015, s. 23–26.
5. Christophe G., Laurent F., *A Business approach for the use of drones in the Engineering & Construction industries*, Accenture 2016.
6. Fellner A., Mańka A., Mańka I., *Analiza zagrożeń wynikających z użytkowania bezzałogowych statków powietrznych (dronów)*, „TTS Technika Transportu Szynowego” 2015, R. 22, nr 12, s. 489–490.
7. Fellner A., Mańka A., *Dostosowanie metody FMEA do wymagań branży lotniczej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Katowice 2015, s. 20–24.
8. Griffis C., Wilson T., Schneider J., Pierpont P., *Unmanned Aircraft System Propulsion Systems Technology Survey*, Embry-Riddle Aeronautical University, Florida 2009, DOT/FAA/AR-09/11 s. 1, 4, 9–53.
9. Janik P., Zawistowski M., Fellner R., Zawistowski G., *Unmanned Aircraft Systems Risk Assessment Based on SORA for First Responders and Disaster Management*, “Applied Sciences” 2021; 11(12): 5364. DOI: 10.3390/app11125364.
10. Kasprzyk P., Konert A., *UAS Safety Operation – Legal Issues on Reporting UAS Incidents*, “Journal of Intelligent & Robotic Systems”, Volume 103, Issue 3, Article Number 51, NOV 2021. DOI: 10.1007/s10846-021-01448-5.
11. Kasprzyk P., Konert A., *Reporting and Investigation of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Accidents and Serious Incidents. Regulatory Perspective*, “Journal of Intelligent & Robotic Systems”, Volume 103, Issue 1, Article Number 3, SEP 2021. DOI: 10.1007/s10846-021-01447-6.

12. Konert A., Smereka J., *The Use of Drones in Emergency Medicine: Practical and Legal Aspects*, "Emergency Medicine International", Volume 2019, Article Number 3589792, DEC 2 2019. DOI: 10.1155/2019/358979.
13. Masternak M., Napiórkowska J., *Transport organów, czyli gdy liczy się każda sekunda*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014, s. 15–20, 25–33.
14. Pullen L.C., *Tackling the Growing Problem of Transporting Organs*, "American Journal of Transplantation" 2019, p. 1603–1604.
15. Rabajczyk A., Zboina J., Zielecka M., Fellner R., *Monitoring of Selected CBRN Threats in the Air in Industrial Areas with the Use of Unmanned Aerial Vehicles*, "Atmosphere" 2020; 11(12):1373. DOI: 10.3390/atmos11121373.
16. Tuśnio N., Wróblewski W., *The Efficiency of Drones Usage for Safety and Rescue Operations in an Open Area: A Case from Poland*, "Sustainability" 2022; 14(1):327. DOI: 10.3390/su14010327.
17. Zwęgliński T., *The Use of Drones in Disaster Aerial Needs Reconnaissance and Damage Assessment – Three-Dimensional Modeling and Orthophoto Map Study*, "Sustainability" 2020; 12(15):6080. DOI: 10.3390/su12156080.
18. <https://abc-rc.pl/Podstawy-wiedzy-o-smiglach-modelarskich-blog-pol-1542270254.html> (dostęp: 2.04.2022).
19. <https://aeromind.pl/Budowa-drona-ccms-pol-52.html> (dostęp: 2.04.2022).
20. <https://szewo.com/rama-wielowirnikowca> (dostęp: 3.04.2022).
21. <https://www.medfinance.pl/jakie-sa-rodzaje-karetek-w-polsce> (dostęp: 3.04.2022).