

Silesian University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Department of Fundamentals of Machinery Design

# Poszerzone Streszczenie Rozprawy Doktorskiej

## The Method of Increasing the Flight Endurance of Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle

MSc, Eng. Krzysztof Mateja

Promotor:

PhD, DSc, Eng. Wojciech Skarka, Prof. SUT

Gliwice, 2023

# Spis treści

1. Wstęp.....	3
2. Cel pracy i teza pracy.....	4
3. Publikacje autora .....	5
4. Zakres pracy.....	5
5. Metodyka.....	7
6. Dostrojenie modeli stymulacyjnych.....	9
7. Wnioski.....	9
Bibliografia.....	11

# 1. Wstęp

Statki powietrzne od ponad 100 lat, czyli od momentu pierwszego udanego lotu braci Wright w 1903 roku rozwijają się pod kątem aerodynamiki, napędów, lekkich struktur materiałowych, zasięgu oraz czasu lotu. W ostatnich dekadach szczególną uwagę skupiono na Bezzałogowych Statkach Powietrznych (BSP, z ang. Unmanned Aerial Vehicle, UAV). Ten kierunek wynika przede wszystkim z braku konieczności obecności pilota na pokładzie statku latającego. Ma to zarówno korzyści finansowe — brak konieczności opłacania pilotów i załogi — a w przypadku zastosowań wojskowych możliwość uratowania życia w trakcie ostrzału, gdyż na pokładzie BSP nie ma żołnierzy, załogi, reporterów. BSP można podzielić na wiele kategorii dzięki czemu część z nich jest w stanie latać na bardzo wysokich pułapach, wykonywać operacje o dużej zwrotności i mobilności, które nie są możliwe dla masywnych pojazdów z pilotem na pokładzie np. w wysoko zurbanizowanych obszarach miejskich.

Implementacja sztucznej inteligencji, algorytmów, uczenia maszynowego pozwala BSP nie tylko na zdalne pilotowanie z ziemi przez użytkownika, ale coraz częściej pojazdy te mają możliwość lotu autonomicznego lub wykonania części lotu w taki sposób. Tak dopracowany układ sterujący pozwala na wewnętrzne zintegrowanie systemów ścieżki planowania lotu, kontroli warunków lotu, ograniczeń i wprowadzenia koniecznych zmian w trakcie wykonywania zaplanowanej misji.

Wyposażone w aparaty fotograficzne BSP pozwalają na filmowanie i kręcenie scen z lotu ptaka. Takie zastosowanie powoduje, że Bezzałogowe Statki Powietrzne zyskują w ostatnich latach coraz większą popularność nie tylko w przemyśle komercyjnym, ale również wśród hobbystów, którzy wykorzystują je w celach zabawy, filmowania, robienia zdjęć.

Wojsko za ich pomocą może kontrolować granice i monitorować zdarzenia niebezpieczne z punktu widzenia interesów Państwa. Zastosowania BSP są bardzo szerokie. Można do nich również zaliczyć dystrybucję przesyłek, kontrolę upraw, monitorowanie zagrożeń np. pożarów, mapowanie terenów, prace poszukiwawcze oraz ratunkowe. W zależności od ich konstrukcji, geometrii, sposobu przenoszenia napędu, długości lotu docelowe przeznaczenie może ulegać zmianie.

Kwestią, która najbardziej organiczna BSP oraz inne pojazdy latające jest czas oraz zasięg lotu. Ograniczony czas lotu BSP powoduje konieczność lądowania i związaną z tym stratę czasu w zakresie przerwania misji, lądowania czy wymiany akumulatorów. W celu wydłużenia misji konstruktorzy szukają możliwości na pozyskanie energii z zewnątrz. Celem jest osiągnięcie pełnej autonomii energetycznej umożliwiającej ciągły lot bez konieczności zbędnych lądowań. Autonomia energetyczna UAV jest ważnym kierunkiem w dziedzinie kosmonautyki, ponieważ oprócz możliwości ciągłej pracy dodatkową zaletą jest niższy koszt tego rodzaju aplikacji niż przy użyciu satelity.

Jednym z najczęściej wykorzystywanych źródeł energii jest ogniwo słoneczne. UAV zasilany energią słoneczną nie jest nową koncepcją statku powietrznego. Możemy wyróżnić wiele typów statków powietrznych zasilanych energią słoneczną: Atlantic Solar, Solar Impulse 2, Airbus zephyr, PHASA-35, Odysseus, pathfinder plus, Helios, centurion, patffinder, global observer, Solong UAV. Każdy z powyższych samolotów oparty jest na lekkiej konstrukcji kompozytowej, energooszczędnych układach napędowych oraz wyposażony w panele fotowoltaiczne, które umożliwiają w trakcie lotu produkcję energii,

która następnie jest spożytkowana przez układy napędowe i awionikę lub pozostaje zmagazynowana w akumulatorach.

Większość BSP zasilanych energią słoneczną jest klasyfikowana jako obiekty latające klasy High-Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) nazywane również "stratosphere drone" lub High-Altitude Long-Endurance (HALE). HALE UAV można zaliczyć do BSP latających na wysokościach 15-20 km z niską prędkością.

W przeciwieństwie do HAPS i HALE, mniejsze BSP zasilane energią słoneczną są głównie przeznaczone do zastosowań długodystansowych na małych wysokościach. Nazywa się je Low-Altitude Long-Endurance (LALE) UAV. Obiekty klasy LALE z uwagi na niższe pułapy lotów znacznie bardziej są narażone na działanie warunków atmosferycznych oraz wpływ warunków pogodowych na realizację misji.

Zarówno pojazdy latające klasy HALE lub LALE to w większości stałopłaty. Powodem jest zaleta zastosowania tego typu konstrukcji BSP. Skrzydła zapewniają powierzchnie na, których mogą zostać umieszczone panele fotowoltaiczne. Dodatkowo w niektórych konstrukcjach występuje również usterzenie na którym również można umieścić dodatkowe ogniwa słoneczne. Inne konstrukcje, które nie mają wystarczającej powierzchni skrzydeł rzadko są brane pod uwagę w przypadku wydłużenia lotu za pomocą fotowoltaiki.

Jednym z takich rodzajów Bezzałogowych Statków Powietrznych są pionowzloty (z ang. Vertical Take-off and Landing, VTOL). Możliwość pionowego startu pozwala na rozpoczęcie lotu w dowolnym miejscu bez konieczności korzystania z pasa startowego. Zaletą VTOL-i jest również dobra manewrowość w mocno zurbanizowanych terenach, dostęp do odległych obszarów oraz obserwacji w trudnych warunkach pogodowych. Te UAV są bardziej odporne na awarie, dzięki czemu są bardziej niezawodne niż inne konfiguracje. Do przykładów VTOL-i można zaliczyć: SkyX, E-flite Convergence, VALAQ Patrol, WingtraOne oraz SkyEye Sierra.

Do tej grupy możemy zaliczyć drony wielowirnikowe, tilt-wing UAV, tail-sitter UAV i inne konstrukcje hybrydowe. Hybrydowe VTOL-e łączą w sobie cechy stałopłatów (skrzydła i kadłub) oraz dronów wielowirnikowych (śmigła poziome). Po osiągnięciu zadanego pułapu BSP jest w stanie „przekształcić się” do pozycji poziomej i kontynuować lot za pomocą skrzydeł. Konstrukcja taka pozwala na wydłużenie wytrzymałości UAV i uzyskanie lepszych osiągnięć podczas lotu.

## 2. Cel pracy i teza pracy

Celem pracy jest opracowanie metody pozwalającej na wydłużenie czasu lotu Bezzałogowego Statku Powietrznego w szczególności Pionowego Startu i Lądowania. Metoda ze względu na swoją uniwersalność powinna być możliwa do zastosowania w różnych typach BSP wliczając w to m.in. fixed-wing UAV klasy HALE, LALE oraz w innych rodzajach BSP.

Jako tezę rozprawy doktorskiej przyjęto:

Metoda oparta na modelowaniu Model-Based Design (MBD) pozwala na zaprojektowanie bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania o znacznie zwiększonej długości lotu.

### 3. Publikacje autora

W rozprawie doktorskiej autor opiera się w głównej mierze na trzech swoich publikacjach w czasopiśmie naukowych o światowym zasięgu, które są ciągiem prac związanych z opracowaniem układu zasilania solarnego BSP. Publikacje te uwzględniają badania przeprowadzone na ogniwach słonecznych oraz spadku ich sprawności po procesie laminacji, która wydłuża żywotność ogniw, zwiększa ich odporność mechaniczną oraz pozwala na umieszczenie na konstrukcji BSP [1].

Opracowana metoda zwiększenia długotrwałości lotu BSP jest znacznie bardziej popularna i wykorzystywana w obiektach typu fixed-wing UAV. Publikacja [2] uwzględniała ten rodzaj BSP do przeprowadzenia symulacji numerycznej badającej bilans energetyczny oraz możliwości osiągnięcia przez fixed-wing UAV klasy HALE nawet pełnej autonomii energetycznej.

Ostatnią publikacją jest artykuł, który miał na celu zbadanie wpływu ogniw słonecznych na poszyciu drona typu tail-sitter [3]. Celem było sprawdzenie czy panele PV umieszczone na konstrukcji VTOL-a wydłużą czas lotu BSP.

### 4. Zakres pracy

Praca koncentruje się na modelu symulacyjnym opartym o metodykę Model-Based Design (MBD). W zależności od warunków pogodowych (nasłonecznienia, zachmurzenia) model jest w stanie obliczyć czas pracy układu dla zadanego scenariusza lotu. W rozprawie poruszono zagadnienia z zakresu astronomii, geografii, inżynierii mechanicznej, elektrotechniki.

W rozprawie skupiono się na dwóch typach BSP. Pierwszym był fixed-wing UAV należący do rodziny BSP o nazwie Twin Stratos (TS) (Rysunek 1), drugim VTOL typu tail-sitter. UAVs Twin Stratos zostały zaprojektowane jako dwukadłubowiec z dwoma silnikami elektrycznymi. Usterzenie jest oparte na ogonie w kształcie odwróconej litery V (an inverted-v-shaped). Na skrzydłach TS umieszczono ogniwa fotowoltaiczne, które pozwalają na wydłużenie czasu pracy UAV. W celu badań, testów oraz weryfikacji poszczególnych podsystemów opracowano kilka jednostek w różnych skalach.

1. Twin Stratos 110 (TS110) – w skali 1:10 – BSP do testów układu sterowania oraz zapoznania się ze specyfiką kontroli tego typu drona;
2. TS18 – BSP do testowania układu zasilania oraz układu zużycia energii;
3. TS17 – BSP do testowania układu zasilania, weryfikacji modelu symulacyjnego układu zasilania oraz technologii montażu;
4. TS12 – BSP do długotrwałych lotów, weryfikacji parametrów lotnych oraz wydajności dot. autonomii energetycznej. Przeznaczony do testów badawczych;
5. TS – docelowy BSP przeznaczony do badań i realizacji usług komercyjnych.



**Rysunek 1.** Twin Stratos

W rozprawie do obliczeń posłużono się dwoma modelami Twin Staratosa: TS17 oraz TS12. Celem było poznanie jak różnica skali wpłynie na zużycie oraz pobieranie energii. Jaki stosunek wyprodukowanej energii oraz zapotrzebowania energetycznego zostanie zachowany przy uwzględnieniu różnicy maksymalnych pułapów z uwagi na inną klasę obiektu. TS17 można zaliczyć do LALE UAV, z kolei TS12 do HALE UAV.

Drugim z rozpatrywanych przypadków BSP jest VTOL. W oparciu o istniejące rozwiązania i produkty opracowano model koncepcyjny VTOL-a tail-sittera. Koncepcyjny BSP oparty na istniejącej konstrukcji posłużył do zbadania możliwości wydłużenia czasu lotu poprzez zainstalowanie na jego konstrukcji paneli PV. Konstrukcja bazuje na komercyjnym VTOL-u firmy SkyX (Rysunek 2). Różnica polega jednak na zastosowaniu dwóch a nie jak w przypadku SkyX czterech silników elektrycznych. Takie zestawienie zostało skonfigurowane poprzez połączenie dwóch VTOL-i: SkyX oraz WingtraOne. Tail-sitter jest zbliżony wymiarowo do TS17. Rozpiętość skrzydeł wynosi 2.5m, a cięciwa nieco ponad 0.5m.



**Rysunek 2.** SkyX; [www.skyx.com](http://www.skyx.com)

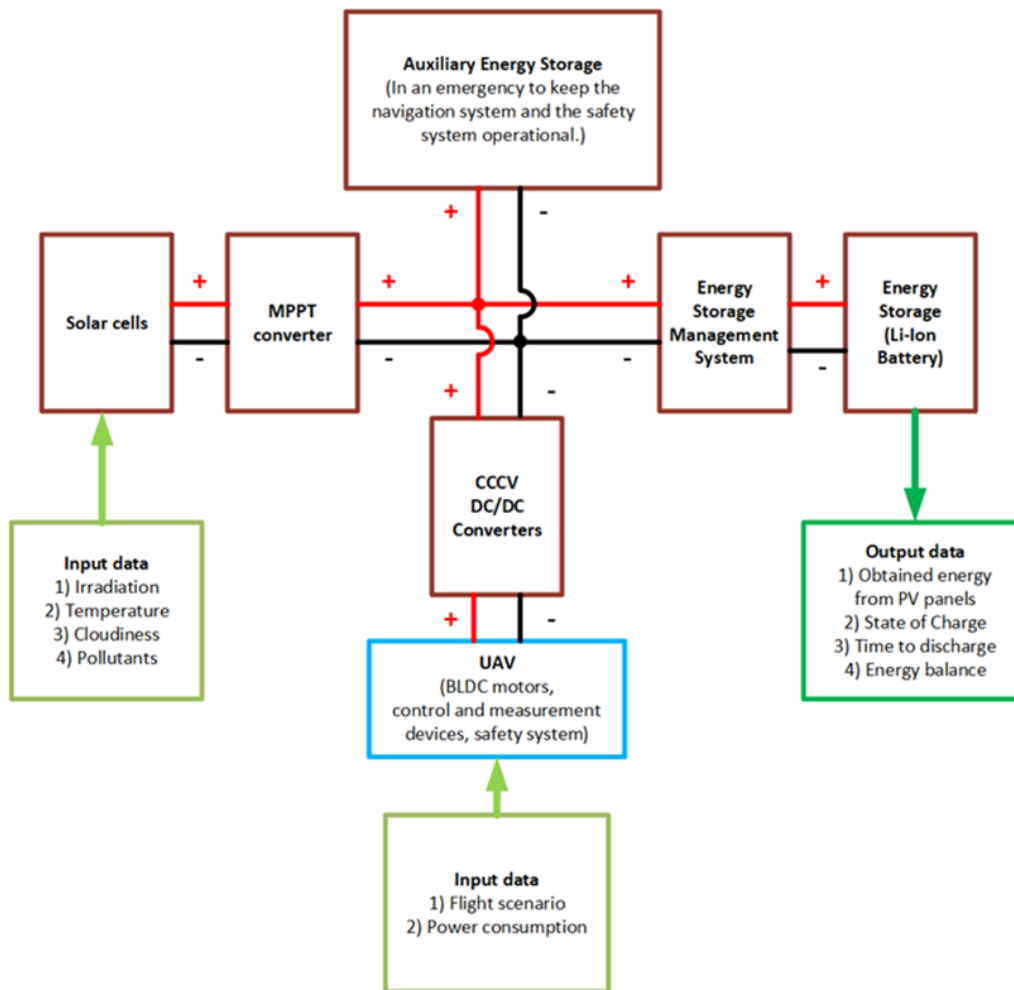
Podstawowe parametry TS17, TS12 oraz VTOL-a zostały przedstawione w Tabeli 1. Wartości poszczególnych parametrów zostały obliczone przez konstruktorów lotniczych i były uwzględniane podczas prac związanych z projektowaniem układu zasilania oraz modelowania środowiska symulacyjnego.

**Tabela 1.** Parametry studiów przypadków

<b>Parametr</b>	<b>TS17</b>	<b>TS12</b>	<b>VTOL</b>
Maksymalna masa startowa (MTOW)	12	45	10
Rozpiętość skrzydeł (m)	3.6	12.4	2.5
Udźwig (kg)	2.5	2.5	0
Szacunkowa waga baterii (kg)	2.5	12.5	4
Powierzchnia skrzydeł (m <sup>2</sup> )	0.896	8.6	1.25
Średnica śmigła (m)	0.4	0.9	0.75
Liczba silników elektrycznych	2	2	2
Maksymalna wysokość lotu (km)	8	20	4

## 5. Metodyka

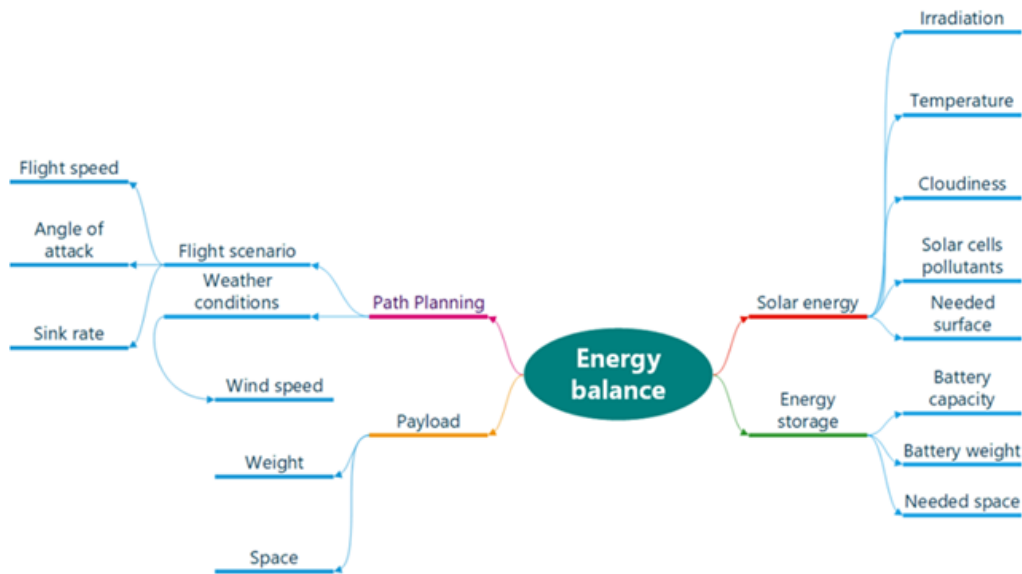
Budowa modeli symulacyjnych miała na celu opracowanie narzędzia, które umożliwiłoby obliczanie rezultatu związanego ze stanem naładowania baterii, bilansem energetycznym, szacowanym czasem lotu. Ogólny schemat modelu układu zasilania został przedstawiony na Rysunku 3.



**Rysunek 3.** Schemat układu zasilania BSP energią słoneczną.

Głównym celem modelu symulacyjnego jest możliwość pozyskania wyników dotyczących stanu naładowania akumulatora, informacji jaki czas będzie w stanie latać BSP dla konkretnego scenariusza lotu. Całość opiera się o ciągłe porównywanie bilansu energetycznego, który jest zależny od warunków zewnętrznych — niezależnych od konstruktorów, operatorów BSP a także od warunków wewnętrznych, które należy zdefiniować w trakcie trwania prac. Są to m.in. pojemność akumulatorów uwzględniająca dostępną przestrzeń wewnątrz UAV, ścieżka planowania lotu. Zależności dotyczące bilansu energetycznego solarnego BSP przedstawiono na Rysunku 4.





Rysunek 4. Schemat zależności bilansu energetycznego

## 6. Dostrojenie modeli stymulacyjnych

Celem dostrojenia modeli symulacyjnych oraz ich poszczególnych składowych jest możliwie jak najbardziej realne odzwierciedlenie zachowania się układów podczas pracy. W tym celu przeprowadzono szereg badań i analiz, które zostały opisane w poniższych podrozdziałach. Dostrojenie miało na celu:

- Zaplanowanie przykładowych scenariuszów lotów BSP;
- Zbadanie ogniw fotowoltaicznych pod kątem sprawności oraz podstawowych parametrów elektrycznych w warunkach STC (Standard Test Conditions) — napromieniowanych mocą  $1000\text{W}/\text{m}^2$  w temperaturze  $25^\circ\text{C}$ , widmo masy powietrza 1.5 (AM 1.5G) określone przez normę europejską IEC 60904-3;
- Zbadanie folii do laminowania ogniw słonecznych pod kątem odbicia, transmitancji oraz absorpcji widma promieniowania słonecznego;
- Zbadanie zalaminowanych ogniw fotowoltaicznych pod kątem sprawności oraz podstawowych parametrów elektrycznych w warunkach STC. Celem porównania jest poznanie wartości spadku sprawności zalaminowanych ogniw;
- Zbadanie charakterystyk ogniw bateryjnych w zależności od prądu rozładowania.

## 7. Wnioski

Wyniki badań zaprezentowane w niniejszej rozprawie doktorskiej potwierdzają słuszność tezy przyjętej w pracy. Potwierdzono, że metoda oparta na modelowaniu Model-Based Design (MBD) pozwala na zaprojektowanie bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania o znacznie zwiększonej długotrwałości lotu.

Ogólne wnioski dotyczące badanych studiów przypadku to m.in.:

- Im większa skala BSP, tym łatwiejsza możliwość osiągnięcia dodatniego bilansu energetycznego i pełnej autonomii energetycznej;

- Dla badanych BSP proporcja zużycia energii do jej produkcji przez panele fotowoltaiczne umieszczone na skrzydłach nie jest proporcjonalna – w miarę zwiększania skali proporcja przemawia na korzyść produkcji energii;
- Ważne jest zapewnienie jak największej powierzchni skrzydeł, przy jednoczesnej minimalizacji ciężaru poprzez zastosowanie nowoczesnych, ultralekkich materiałów kompozytowych, zastosowanie energooszczędnych napędów i wydajnych akumulatorów;
- Wpływ warunków atmosferycznych jest znacznie większy w przypadku LALE UAV oraz VTOL-i niż w przypadku BSP klasy HALE. Aby poznać dokładną wartość energii wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne, obliczyć bilans energetyczny i poziom stanu naładowanie baterii, niezbędna jest dokładna prognoza pogody;
- Latanie na dużych wysokościach pozwala zminimalizować zużycie energii przez układ napędowy. Lot przelotowy należy wykonywać na największych wysokościach ze względu na mniejsze zapotrzebowanie energetyczne układów napędowych UAV, jednakże należy go zweryfikować pod kątem mocy i sprawności silników elektrycznych;
- Jeżeli celem misji lotniczej jest nieprzerwany lot przez 24 godziny na dobę, ważne jest dokładne opracowanie scenariusza lotu. Latanie na małych wysokościach z całkowicie naładowanym akumulatorem w słoneczny letni dzień to strata. Dodatni bilans energetyczny należy wykorzystać np. do wzniesienia BSP na wyższą wysokość;
- W przypadku lotów całodobowych najlepiej wystartować o wschodzie słońca. Start i wznoszenie to etapy zużywające najwięcej energii, dlatego duże zużycie energii warto zrekompensować energią wyprodukowaną w systemie fotowoltaicznym;
- Jednym ze sposobów osiągnięcia 24-godzinnego lotu jest ciągłe, stopniowe zwiększanie wysokości w ciągu dnia i utrzymywanie jej na jak najwyższym poziomie aż do zachodu słońca lub nawet dłużej, w zależności od rodzaju misji;
- W zależności od możliwości BSP, czasu trwania lotu i sprzyjających warunków pogodowych, lepszym rozwiązaniem może być ciągły lot w nocy na jednej stałej wysokości;
- W przypadku BSP energię można magazynować na dwa sposoby: w bateriach i/lub na wysokości. Energię potencjalną zgromadzoną w postaci wysokości należy wykorzystać jako bufor czasu, który najlepiej wykorzystać w nocy, gdy instalacja fotowoltaiczna nie produkuje energii, a układ napędowy nie pobiera energii z układu zasilającego;
- Jeżeli BSP nie jest w stanie zrealizować lotu długodystansowego, może zaistnieć konieczność zmiany czasu trwania lotu, lokalizacji, czasu lotu lub ścieżki lotu;
- Jeżeli nie jest możliwe uzyskanie długodystansowości lotu dla kluczowych parametrów, może zaistnieć konieczność zmiany konstrukcji UAV, liczby ogniw słonecznych, pojemności akumulatora lub masy ładunku;

# Bibliografia

1. Mateja, K.; Skarka, W.; Drygała, A. Efficiency Decreases in a Laminated Solar Cell Developed for a UAV. *Materials* **2022**, *15*, 8774. <https://doi.org/10.3390/ma15248774>
2. Mateja, K.; Skarka, W.; Peciak, M.; Niestrój, R.; Gude, M. Energy Autonomy Simulation Model of Solar Powered UAV. *Energies* **2023**, *16*, 479. <https://doi.org/10.3390/en16010479>
3. Peciak, M.; Skarka, W.; Mateja, K.; Gude, M. Impact Analysis of Solar Cells on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Fixed-Wing UAV. *Aerospace* **2023**, *10*, 247. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030247>