

Metoda modeli latających w badaniach nowych konstrukcji statków powietrznych

Jan Pytka

Farada Group Sp. z o.o.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę modeli latających zastosowaną do badań nad nowymi konstrukcjami statków powietrznych. Omówiono istotę badań z wykorzystaniem modeli prototypów samolotów, śmigłowców i innych statków powietrznych. Zwrócono uwagę na wyposażenie pomiarowo-badawcze instalowane w modelach latających. Zaprezentowano przykłady modeli wykorzystywanych do badań. W podsumowaniu podkreślono korzyści wynikające z metody modeli latających, a także jej ograniczenia.

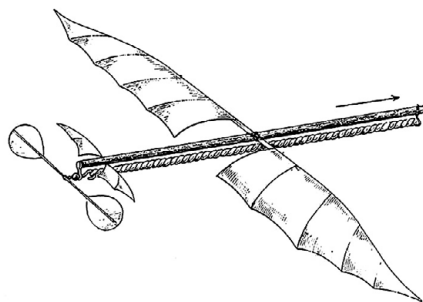
Słowa kluczowe: metoda modeli latających, statki powietrzne, badania i testy w locie

Krótką historia modelarstwa lotniczego

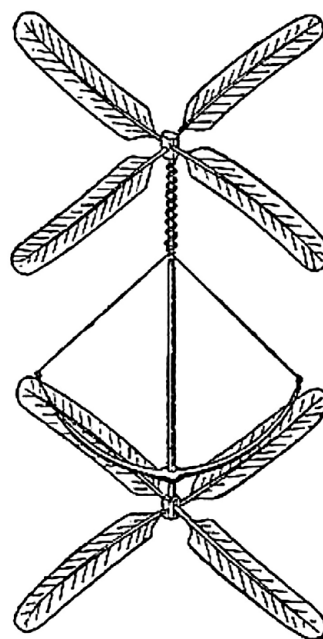
Chronologicznie modele latające znacznie wyprzedziły pełnowymiarowe statki powietrzne. Modelarstwo lotnicze istnieje od tysiącleci. W 425 r. p.n.e. Archytas z Tarentu, grecki matematyk i filozof, zbudował z drewna model latającego gołębia, napędzanego silnikiem odrzutowym na parę sprężoną (ryc. 1). Układ napędowy wyposażono w zbiornik na sprężony gaz, znajdujący się w „brzuchu” gołębia i dzięki temu był on w stanie przelecieć dystans ok. 200 m. Leonadro da Vinci eksperymentował z modelami maszyn latających własnej konstrukcji. W 1871 r. Francuz Alphonse Penaud zaprezentował w locie swój model z napędem gumowym, nazwany Planophore. Model Penauda wykonywał stabilny lot dzięki zakrzywionym końcówkom skrzydeł (zwichrzenie aerodynamiczne). Dodatkowo posiadał powierzchnię ustającą, co pozwalało na wykonanie ok. 60-metrowego lotu po prostej. Napęd stanowił sznur gumowy wraz ze śmigłem ciągnącym.

Zasada działania dzisiejszego śmigłowca także nie była nowa. Pierwszy model zdolny do pionowego startu i lotu skonstruowano w Chinach, ok. 400 r. p.n.e. Zbudowany był

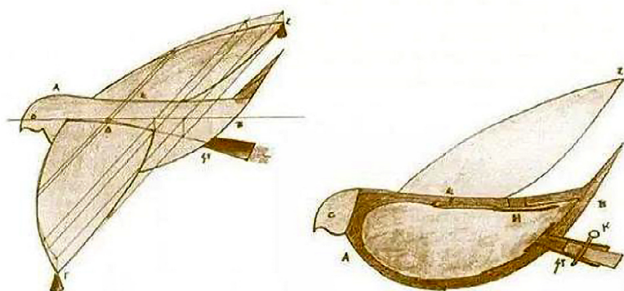
z piór przytwierdzonych do jednego końca drewnianej listewki, którą obracano między dłońmi w celu nadania prędkości obrotowej (energii kinetycznej). Następnie była ona wykorzystywana do wytworzenia siły nośnej obracającego się wirnika. W 1784 r. Francuzi Launoy i Bienvenu, przyrodnik i mechanik, zaprezentowali przed Francuską Akademią pierwszy napędzany mechanicznie model śmigłowca. Układ napędowy modelu składał się z dwóch współosiowych, przeciwbieżnych śmigieł, wprawianych w ruch obrotowy dzięki energii sprężystej, zgromadzonej w sprężynie prętowej [3].



Rys. 2. Planophore – model latający z napędem gumowym konstrukcji A. Penauda (źródło: FAI)



Ryc. 3 Model latający Launoya i Bienvenu demonstrujący zasadę lotu dzisiejszych śmigłowców [3]



Ryc. 1. Latający gołąb Archytasa z Tarentu (Źródło: FAI)

Szczególnie intensywny rozwój modelarstwa nastąpił na przełomie XIX i XX w. Budowano wtedy modele szybowców, a także modele z napędem gumowym oraz silnikowym. Głównym materiałem konstrukcyjnym były: drewno różnych gatunków, papier, bibułka oraz drut stalowy. Były to modele swobodnie latające. W roku 1927 w Wielkiej Brytanii Lord Wakefield ustanowił nagrodę przechodnią w formie pucharu (ryc. 4) jako nagrodę w dorocznych zawodach modeli z napędem gumowym. Tradycja przetrwała do dnia dzisiejszego, a obecnie wyczynowe modele z napędem gumowym startują w ramach klasy F1B FAI [1].



Ryc. 4. Puchar przechodni dla zwycięzcy zawodów modeli latających z napędem gumowym klasy F1B (źródło: FAI)

W latach 20. XX w. pojawiły się pierwsze modele latające z napędem na silnik spalinowy. Jako źródło napędu stosowano silniki jednocyldrowe z zapłonem iskrowym, ich pojemność skokowa wahała się w granicach kilkukilkunastu centymetrów sześciennych. Moc tych silniczków nie przekraczała 1 KM.



Rys. 5. Baby Cyclone C, typowy silniczek spalinowy do napędu modeli latających w latach 30. XX w. [12]

Po II wojnie światowej pojawiły się pierwsze radiowe aparaty do sterowania modeli w locie. Początkowo do budowy tych aparatów stosowano lampy elektronowe, co sprawiało, że urządzenia były ciężkie i o znacznych rozmiarach. Stanowiło to istotną wadę, szczególnie w przypadku wyposażenia pokładowego modeli (odbiornik, mechanizmy wykonawcze, źródła zasilania). Wraz z nadejściem tranzystorów, aparaty RC stawały się coraz lżejsze i mniejsze.

W latach powojennych następował dynamiczny rozwój silników spalinowych, przeznaczonych do napędu modeli latających. Wiele typów silników modelarskich produkowano przemysłowo w dużych seriach. Znacznie rozszerzył się zakres pojemności skokowych, od 0,16 do 20 cm³. Amerykańska firma Cox Engines zastąpiła z produkcji doskonałych i niezawodnych silniczków o pojemnościach od 0,16 do 2,5 cm³, które stanowiły napęd małych popularnych modeli, szczególnie przydatnych dla początkujących modelarzy [2].

W roku 1974 Fred Militky skonstruował pierwszy model latający z napędem elektrycznym. Model wyposażony był w miniaturowy silniczek elektryczny zasilany baterią akumulatorów NiCd.



Ryc. 6. Model latający z napędem elektrycznym Silentus [13]

Współczesne modelarstwo lotnicze

Modelarstwo lotnicze jest sportem lotniczym i jest podzielone na klasy modeli, zgodnie z regulaminem FAI. Wyróżniamy klasę modeli swobodnie latających, na uwięzi, zdalnie sterowanych, modeli makiet, modeli z napędem elektrycznym, akrobacyjnych przy muzyce czy kosmicznych. W ramach każdej z klas wyodrębniono podklasy, np. w klasie modeli swobodnie latających wyróżniamy modele szybowców F1A, modele z napędem gumowym F1B, z napędem silnikowym F1C, itd. Modele pozaklasowe są budowane w celach innych niż zawodnicze, a chodzi tu m.in. o szkolenia, hobby, rekreację. Występuje różnorodność napędów, przy czym wyraźna jest tendencja do zastępowania napędu spalinowego elektrycznym. Dynamiczny rozwój modeli zdalnie sterowanych nie byłby możliwy bez progresu w dziedzinie elektroniki i mechatroniki modelarskiej. Obecnie stosowane

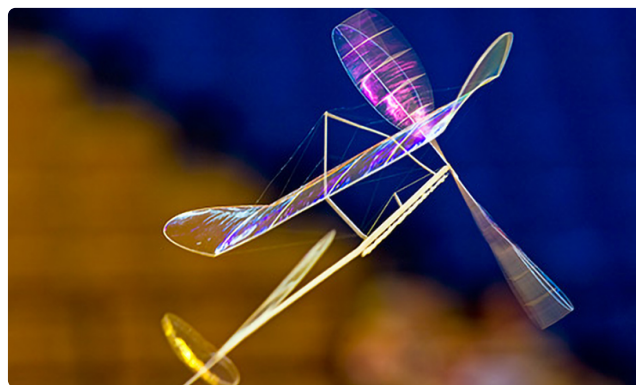
są najczęściej radiowe systemy wielokanałowe, działające w paśmie 2,4 GHz. Jeśli chodzi o materiały konstrukcyjne, mimo coraz większego udziału kompozytów, podstawowym budulcem modeli latających jest drewno balsowe oraz listwy sosnowe i sklejka brzoza. Natomiast w dziedzinie materiałów pokryciowych dokonał się przełom, gdyż tradycyjne papiery japońskie czy koreańskie zostały wyparte przez poliestrowe folie termokurczliwe. Zdecydowanie najbogatszy wybór materiałów konstrukcyjnych wykorzystywany jest do budowy makiet latających. W budowie tradycyjnych modeli latających stosowane są stosunkowo proste technologie obróbki drewna, a także klejenie jako technologia łączenia. Natomiast wykonanie modelu z kompozytów wymaga stosowania zaawansowanych technologii, w tym laminowania ciśnieniowego z użyciem promienników podczerwieni i innych.

Rozpatrując osiągi modeli latających w locie, należy przytoczyć kilka faktów. W sierpniu 2003 r. model latający TAM 5, Spirit of Butts' Farm, zbudowany przez amerykańskiego modelarza Manyarda Hilla, pokonał Ocean Atlantycki. Przelot o łącznej długości 3028 km, w czasie niemal 39 godzin rozpoczął się w Cape Spear na Nowej Funlandii, a zakończył w Irlandii, na plażach niedaleko Clifden. Jest absolutnym rekordem odległości w linii prostej dla modeli latających. Rekordowy model posiadał skrzydła o rozpiętości 1831 mm, ważył ok. 7,7 kg, z czego niemal 5 kg stanowiło masę paliwa, którym zasilany był czterosuwowy silnik spalinowy o pojemności skokowej 10 cm [8].



Ryc. 7. Rekordowy model latający TAM 5 Manyarda Hilla
(źródło: Wikipedia)

Typowy model halowy z napędem gumowym klasy F1D osiąga czas lotu rzędu pół godziny, przy masie całkowitej ok. 1 g. Warto dodać, że polscy modelarze Edward Ciapała i Ryszard Czechowski należeli do ścisłej światowej czołówki w klasie F1D, sięgając po tytuły mistrza świata. Szybowce zdalnie sterowane przystosowane do lotów na zboczu są najszybszymi bezsilnikowymi statkami powietrznymi. Podczas lotu na zboczu, wykorzystując efekt dynamiczny przyspieszania w wyniku oddziaływania wiatru, model szybowca rozpędza się do prędkości 800 km/h.



Ryc. 8. Model halowy z napędem gumowym klasy F1D [11]

Badanie nowych statków powietrznych z użyciem modelu latającego

Metoda polega na badaniu wybranych własności modelu latającego będącego zmniejszoną kopią projektowanego statku powietrznego. W Polsce pionierem tej metody w dziedzinie szybownictwa był artysta-malarz Czesław Tański. Zbudował szybowiec, którego koncepcję oparł o badania nad modelem latającym. Próby z modelem pozwoliły na udoskonalenie konstrukcji. Szybowiec Tańskiego wykonywał krótkie, ale udane loty ślizgowe [1]. Konstruktor eksperymentował również z modelami napędzanymi sznurem gumowym. Zbudował model dwusilnikowy, który wykonywał udane loty. Następnie przygotował model jednosilnikowy, będący pierwowzorem samolotu „Łątka”. O ile próby z modelem były udane, to pełnowymiarowa „Łątka” nigdy nie wzniosła się w powietrze, głównie ze względu na niewystarczającą moc silnika napędowego oraz zbyt dużą masę startową. Należy jednak odnotować, że w konstrukcji samolotu „Łątka” zastosowano kilka innowacyjnych rozwiązań, np. zmienny kąt zaklinowania skrzydeł, struktura skrzydeł wzorowana na skrzydłach ważki.

Współczesnym przykładem zastosowania metody modeli latających może być samolot Flaris, którego model został zbudowany w celu sprawdzenia koncepcji i zweryfikowania założeń aerodynamicznych (profil skrzydła, itd.) [4].

Dwupłatowy samolot akrobacyjny Harnaś został zaprojektowany przez Andrzeja Frydrychewicza. Opatentowany układ aerodynamiczny samolotu charakteryzuje się pionowymi powierzchniami łączącymi płat dolny z górnym. Skuteczność zastosowanego rozwiązania badano przy użyciu modelu latającego zbudowanego w skali 1 : 3. Model wykonywał lot nożowy z niewielkim wychyleniem steru kierunkowego i również niewielkim odchyleniem kadłuba w stosunku do kierunku lotu.

Metoda ta jest chętnie stosowana i daje dobre rezultaty [4].



Ryc. 9. Model samolotu Flaris (dzięki uprzejmości p. Andrzeja Mrocza)



Ryc. 10. Model samolotu akrobacyjnego Harnaś 3 (dzięki uprzejmości p. Andrzeja Mrocza)

Badania podzespołów statków powietrznych – studium przypadku modelu latającego z napędem PROPWING

Często występuje potrzeba testowania nowych podzespołów przewidzianych do zastosowania w statku powietrznym. W tym przypadku również możliwe jest użycie metody

modeli latających. Wówczas modelem do prób w locie nie musi być geometrycznie wierna kopia projektowanego samolotu, a jedynie uproszczony model, w którym zabudowany jest badany podzespół. Przykładem jest badanie innowacyjnego układu napędowego PROPWING [6]. W tym celu zbudowano model motoszybowca, oryginalnie napędzanego silnikiem elektrycznym ze śmigłem pchającym, umieszczonym

nad środkową częścią kadłuba. W skrzydłach modelu zainstalowano 4 pędniki PROPWING, składające się z silnika elektrycznego, śmigła i regulatora obrotów. Zestawiono układ zasilania, który umożliwił napęd modelu pojedynczym silnikiem albo pędnikami PROPWING. W ten sposób uzyskano możliwość bezpośredniego porównania obu napędów w jednym modelu. Pokazano go na rycinie 11.



Ryc. 11. Model motoszybowca zbudowany do testowania układu napędowego PROPWING [5]

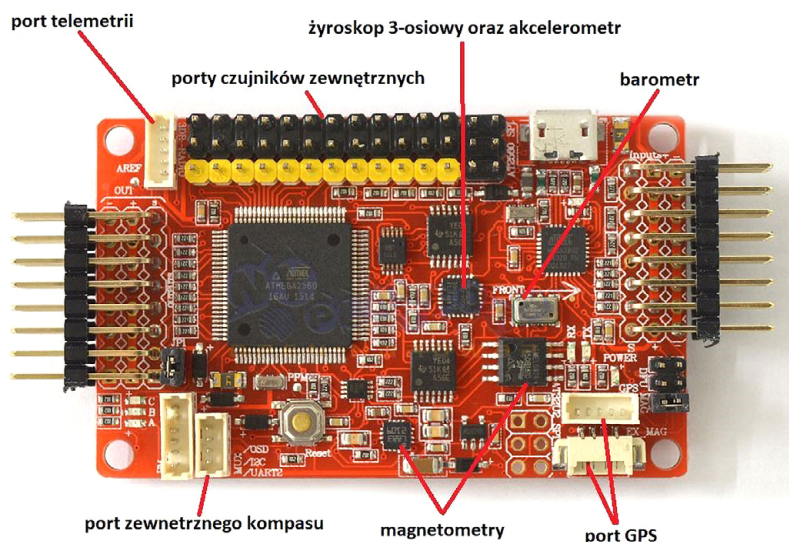
Pokładowe wyposażenie badawczo-pomiarowe

Aparatura pomiarowa w przedmiotowym modelu składa się z opisanego wcześniej systemu autopilota wspomagane go przez GPS, dzięki któremu SP wykonywał loty autonomiczne po zadanych wcześniej punktach trasy. Dane o poborze prądu oraz napięciu akumulatora głównego przekazywane są do autopilota poprzez czujnik prądu wpięty między akumulator a regulator prędkości obrotowej silnika. Za pomiar prędkości poziomej względem ziemi oraz prędkości pionowej (wznoszenia) odpowiada system GPS wspomagany barometrem. Barometr zainstalowany na płytce autopilota odpowiada także za wskazania wysokości względem punktu startu.

System autopilota zainstalowanego w modelu SP składa się z płytki elektronicznej Pixhawk. Kontrolery lotu tego typu wyposażone są w duże ilości sensorów. Wiele z nich znajduje się bezpośrednio na płycie elektronicznej jako układy w technologii MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), są to np.: akcelerometry, żyroskopy oraz barometr. Dodatkowo podłączony został moduł odbiornika GPS z wbudowanym kompasem zewnętrznym, umożliwiające wykonywanie lotu autonomicznego po zadanych punktach na mapie, a także awaryjny powrót do miejsca startu w przypadku utraty kontroli nad modelem. Na poniższym schemacie przedstawione zostały główne sensory umieszczone na płytce autopilota (ryc. 12).

Autopilot został umieszczony w kadłubie modelu, w osi środka ciężkości na podłożu antywibracyjnym. Zasilanie urządzenia zapewnione jest poprzez regulator napięcia BEC 5V. Do autopilota podłączono nadajnik telemetryi działający na częstotliwości 433 MHz. Umożliwia on przesyłanie parametrów lotu oraz aktualnego położenia SP na mapie podczas wykonywania misji. Odbieranie danych telemetrycznych realizowane jest przez odbiornik telemetryi podłączony do komputera PC z odpowiednim oprogramowaniem, w tym przypadku jest to program o nazwie *Mission Planner* wspierający wszystkie autopiloty wyprodukowane na bazie platformy Arduino.

Pierwsze połączenie autopilota z komputerem polegało na odnalezieniu na stronie producenta odpowiedniego oprogramowania (w tym przypadku wspierającego BSP typu płytowiec), a następnie zainstalowaniu go w pamięci urządzenia. Reszta konfiguracji odbywa się także na komputerze z poziomu oprogramowania *Mission Planner*. Składają się na nią: konfiguracja akcelerometrów we wszystkich osiach, konfiguracja podłączonego odbiornika RC (kalibracja oraz przypisanie odpowiednich kanałów do poszczególnych funkcji tj. tryby lotów), kalibracja GPS, czujnika prądu oraz kompasu zewnętrznego. Kolejną ważną kwestią było zaprogramowanie systemu Failsafe umożliwiającego automatyczny powrót do miejsca startu w przypadku utraty kontroli nad sterowaniem.



Ryc. 12. Schemat płytki elektronicznej autopilota typu Pixhawk [5]

Dodatkowo konieczne okazało się obrócenie autopilota o 180° względem kierunku lotu, także w celu lepszego dostępu do urządzenia. Aby zapewnić prawidłowe działanie sprzętu, w parametrach zmieniona została orientacja położenia akcelerometrów o 180° w osi X.

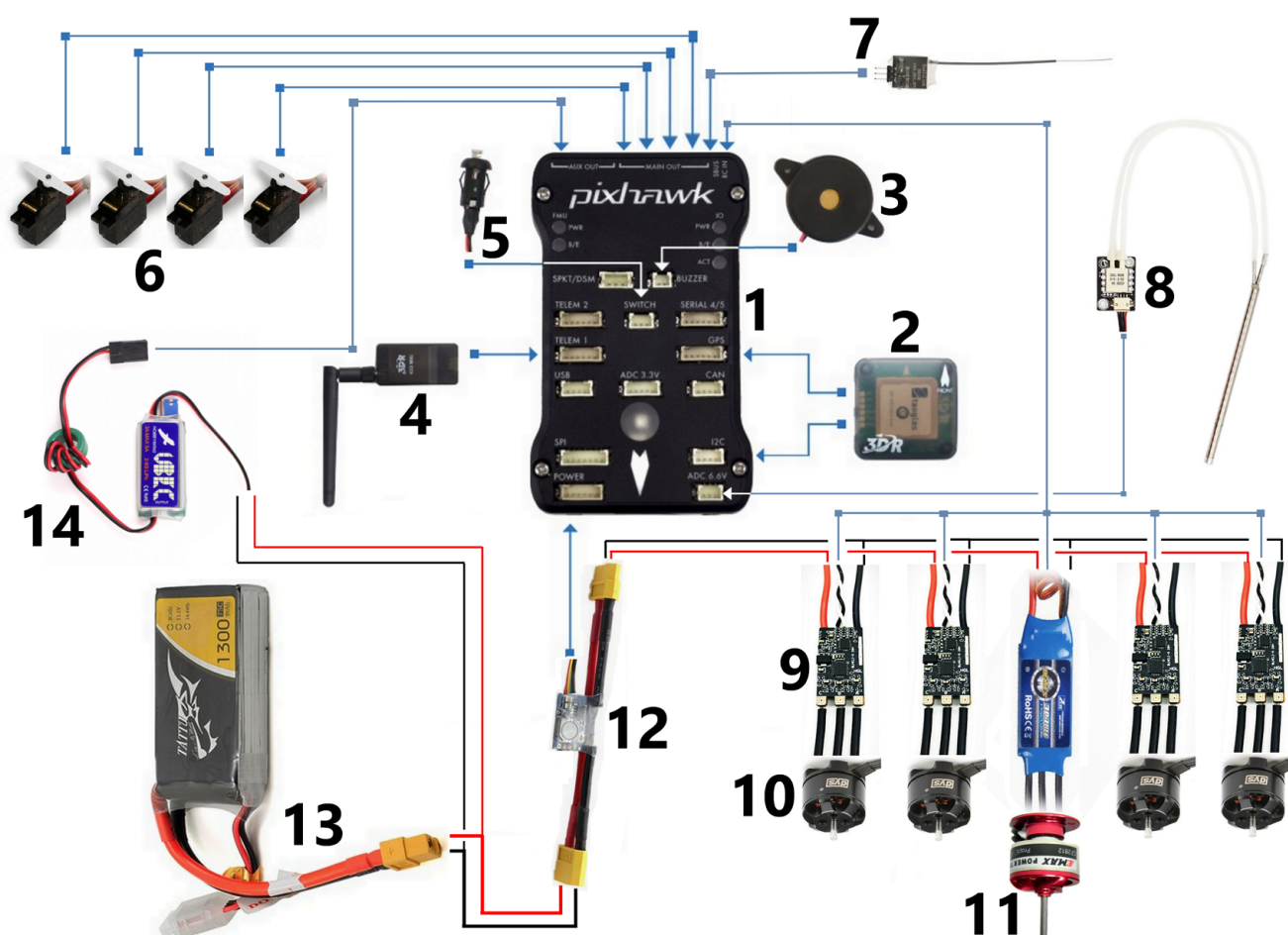
Porty wyjściowe serwomechanizmów zasilane są z zewnętrznego układu BEC 5V o maksymalnym obciążeniu prądowym 3A. Głównym źródłem zasilania jest akumulator litowo-polimerowy o napięciu nominalnym 11,1 V i pojemności całkowitej 1300 mAh. Po ukończeniu budowy modelu doświadczalnego jego ciężar całkowity wraz z akumulatorem głównym wynosił 764 g.

W celu zwiększenia dokładności pomiarów i uzyskania bardziej miarodajnych wyników na dziobie kadłuba zainstalowano odbiornik wraz z czujnikiem ciśnienia dynamicznego oraz statycznego (rurkę Prandtla). Po podłączeniu urządzenia do autopilota poprzez wyjście na czujniki zewnętrzne oraz po skalibrowaniu sensora uzyskano możliwość pomiaru

prędkości AS oraz ustaleniu stałej prędkości względem powietrza na czas trwania badania w locie. Dokładny schemat połączenia aparatury pomiarowej zainstalowanej na przedmiotowym modelu znajduje się na rycinie 13.

Próby w locie – przykładowe wyniki

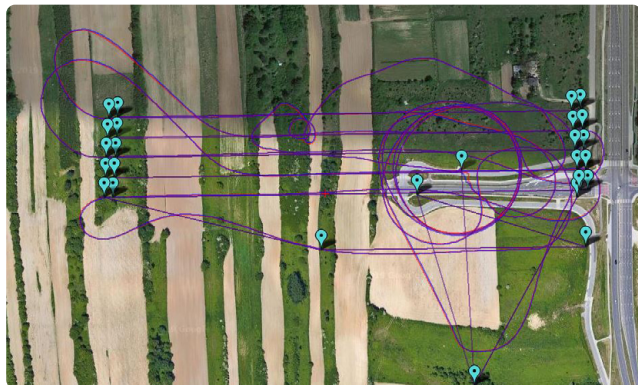
Podczas prób w locie obiekt badań wykonywał lot po zaprogramowanej trasie. Składała się ona z 5 przelotów nad bazą o długości 540 m na wysokości 100 m nad poziomem miejsca startu oraz z kilku kręgów wykonanych ze zwiększaniem wysokości do 150 m oraz ze zmniejszeniem wysokości do 50 m nad poziomem miejsca startu (ryc. 14). Podczas przelotu badane były parametry pracy układu napędowego, tj. pobór prądu przez silniki, aktualne napięcie akumulatora, a także parametry lotu: wysokość barometryczna, wysokość względem wskazań GPS, prędkość



Ryc. 13. Schemat aparatury pomiarowej.

Oznaczenia: 1 – autopilot Pixhawk; 2 – moduł GPS oraz kompasu zewnętrznego; 3 – brzęczyk informujący o stanie autopilota; 4 – moduł telemetry; 5 – przycisk bezpieczeństwa uzbrajający silniki; 6 – serwomechanizmy; 7 – odbiornik RC; 8 – czujnik prędkości powietrznej oraz rurka Prandtla; 9 – elektroniczne regulatory prędkości obrotowej silników w skrzydłach; 10 – silniki napędowe zainstalowane w skrzydłach; 11 – główny silnik napędowy wraz z regulatorem obrotów; 12 – czujnik napięcia i prądu; 13 – akumulator pokładowy LiPo 3S 1300 mAh 75C; 14 – moduł BEC 5V 3A do zasilania serwomechanizmów. [7]

wznoszenia podczas kręgów, prędkość AS oraz prędkość pozioma względem wskazań GPS. Zadanie, podobnie jak w przypadku pierwszego, zostało powtórzone dwukrotnie. Za pierwszym razem wykorzystano napęd tradycyjny, a za drugim silniki zainstalowane w skrzydłach.



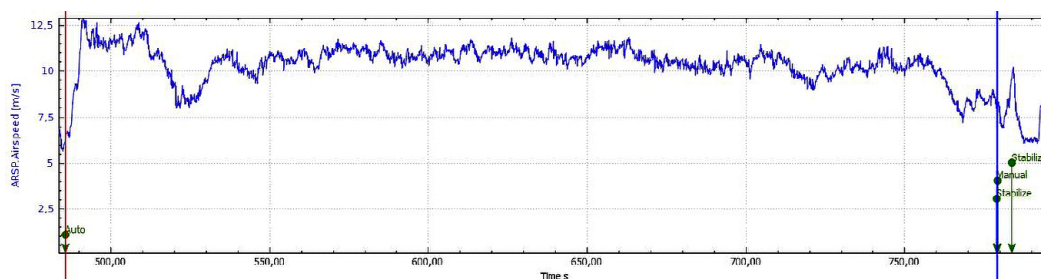
Ryc. 14. Przebieg lotu modelu z badanym układem napędowym PROPWING [5]

Na rycinach 15, 16 i 17 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów w locie. Rycina 15 zawiera wykres prędkości powietrznej AS. Analizując go, można zauważyć, że prędkość AS modelu badawczego podczas trwania badania oscylowała

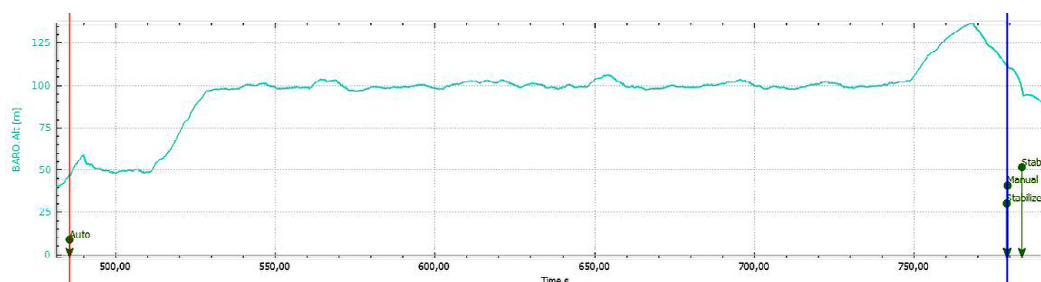
w granicy 10 m/s, tak jak było to zadane w parametrach misji przed lotem. Początkowy wzrost prędkości powstał w wyniku przelotu BSP z aktualnej pozycji do miejsca startu misji. Wówczas prędkość AS nie była jeszcze ustabilizowana przez autopilota.

Kolejnym parametrem lotu jest wysokość barometryczna, która była mierzona przy użyciu barometru zbudowanego w technologii MEMS. Mierzone było ciśnienie atmosferyczne, zredukowane do wysokości miejsca startu. Jak można zauważyć na wykresie (ryc. 16), podczas badania wysokość przez większość czasu wynosiła 100 m nad poziomem startu. W końcowej fazie nastąpiło przewyższenie do wysokości 137 m w celu pomiaru prędkości wznoszenia. Skupiając się na etapie zwiększania wysokości w sposób autonomiczny, można zauważyć, że model osiągnął przewyższenie o 35 m w czasie 20 s, co daje prędkość wznoszenia wynoszącą 1,75 m/s przy obecnej konfiguracji napędowej.

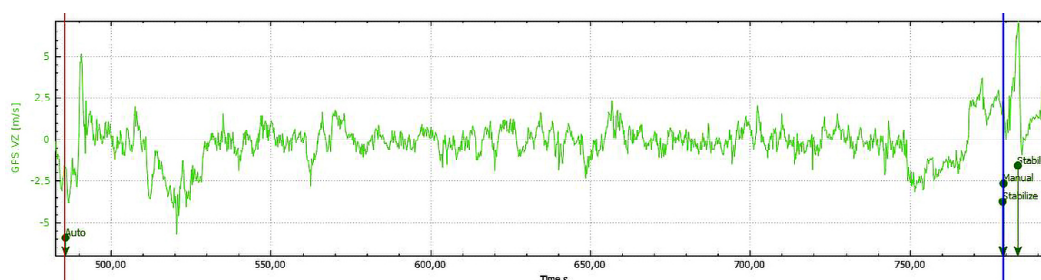
Finalnym parametrem lotu była prędkość pionowa (prędkość wznoszenia) wg wskazań GPS. Według danych zawartych na wykresie (ryc. 17), maksymalna prędkość V_z podczas lotu wynosiła 5,12 m/s, minimalna natomiast -5,67 m/s (maksymalne opadanie BSP). W większości parametr ten nie przekraczał wartości 2,5 m/s. Badając przedział czasu, w którym model wznosił się na wysokość 137 m zaobserwować można także przyrost prędkości V_z . Średnia wartość



Ryc. 15. Przebieg prędkości powietrznej zmierzonej podczas lotu próbnego [5]



Ryc. 16. Wykres obrazujący wysokość barometryczną lotu modelu badawczego [5]



Ryc. 17. Wykres obrazujący prędkość pionową względem wskazań GPS [5]

tego parametru w tym przedziale wynosi 1,63 m/s, co jest bliskie wartości 1,75 m/s zmierzonej przy pomocy barometru. Prędkość odświeżania zastosowanego typu odbiornika GPS wynosi 10 Hz.

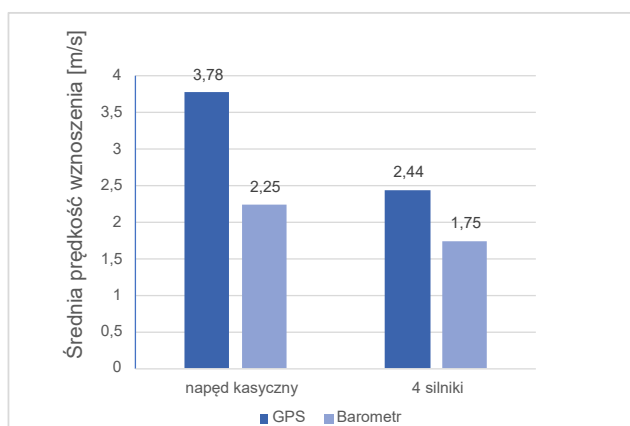
Przeprowadzone pomiary w locie pozwoliły na porównanie badanego innowacyjnego układu napędowego PROPWING z napędem klasycznym. Badania w locie z napędem klasycznym przebiegły w identyczny sposób jak w konfiguracji z 4 silnikami w skrzydłach. Trasa przelotu oraz czas badania były jednakowe. Zmierzone zostały te same parametry. Ich wartości porównano z poprzednimi wynikami i przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie ważniejszych parametrów dla dwóch konfiguracji napędu [5]

Parametr	Konfiguracja napędu	
	napęd klasyczny	PROPWING
średni pobór prądu [A]	4,3	11,87
maks. pobór prądu [A]	8,13	21
średnia prędkość AS [m/s]	10,53	10,49
średnia wysokość barom. [m]	96,1	96,6
średnia prędkość wznoszenia barom. [m/s]	2,25	1,75
średnia prędkość wznoszenia GPS [m/s]	3,78	2,44

Szczególną uwagę zwrócono na prędkość wznoszenia. Analizując odcinek lotu, w którym model wykonywał przewyższenie o 50 m obliczono średnią prędkość wznoszenia wyrażoną w m/s. Dane o aktualnej wysokości uzyskano dzięki pomiarom barometrycznym. Wyniki te zestawiono ze średnią prędkością wznoszenia wskazywaną przez GPS podczas nabierania wysokości, a następnie porównano je biorąc pod uwagę obie konfiguracje napędowe (ryc. 18) [5].

Prędkość wznoszenia obliczona ze wskazań barometru okazała się zbliżona w przypadku obu konfiguracji napędu. Wyniki na podstawie systemu GPS są natomiast nieco wyższe, co wynika z mniejszej dokładności pomiaru przyspieszenia w osi pionowej przez system GPS oraz przesunięcia fazowego (opóźnionej reakcji czujnika).

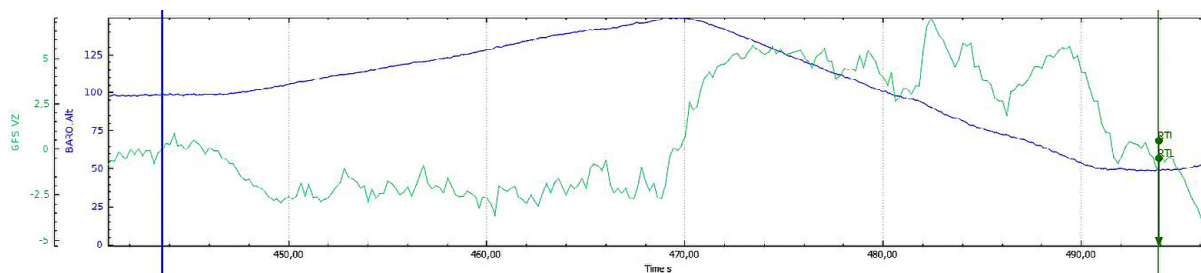


Ryc. 18. Średnia prędkość wznoszenia modelu podczas wykonywania przewyższenia dla obydwu konfiguracji napędowych [5]

Na rycinie 19 ciemniejszą linią oznaczono aktualną wysokość barometryczną w metrach, natomiast jaśniejszą – prędkość pionową według wskazań GPS w m/s. Widoczne jest opóźnienie we wskazaniu przyrostu prędkości wznoszenia w stosunku do zwiększania wysokości. Jest to fragment wykresu przedstawiający przebiegi dwóch parametrów w czasie zwiększania wysokości ze 100 m do 150 m nad poziomem miejsca startu.

Relacja pilota z lotów próbnych

Według relacji operatora modelu po przeprowadzonych próbach w locie stwierdzono mniejszą prędkość przelotową modelu w konfiguracji napędowej z 4 silnikami przy tym samym ustawieniu drążka sterującego prędkością obrotową silników w stosunku do lotu z klasycznym napędem. Napęd PROPWING wykazywał wystarczający ciąg, jednak, by utrzymać prędkość potrzebną do uzyskania zapasu siły nośnej, wymagał zwiększenia prędkości obrotowej silników napędowych. Model badawczy zachowywał właściwości stateczności podłużnej i poprzecznej w obydwu konfiguracjach napędowych. Podczas lotów z napędem zainstalowanym w skrzydłach nieznacznie mniejszą skuteczność wykazał ster kierunku oraz ster wysokości. Ważną kwestią był wysoki poziom hałasu o wysokiej częstotliwości generowany przez 4 silniki napędowe, który przy jednym silniku był znacznie niższy.



Ryc. 19. Porównanie wysokości barometrycznej (ciemny kolor) do prędkości pionowej względem GPS (jaśniejszy kolor) [5]

Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania modeli latających do badań nowych konstrukcji statków powietrznych. Omówiono rys historyczny rozwoju modeli latających z uwzględnieniem zastosowań w pracach badawczo-rozwojowych. Zaprezentowano praktyczne zastosowanie metody modeli latających na przykładzie badań układu napędowego PROPWING. Na podstawie przeprowadzonych badań w locie modelu z układem PROPWING stwierdzono, co następuje:

1. Model latający z napędem zainstalowanym w skrzydłach ma prawidłowe właściwości lotne, a otwory w skrzydłach nie wpływają znacząco na doskonałość lotu.
2. Napęd zainstalowany w skrzydłach składający się z 4 silników wykazał większe zapotrzebowanie na energię elektryczną, co odczytano z wykresów poboru prądu i spadku napięcia akumulatora zasilającego.
3. Osiągi w postaci prędkości wznoszenia modelu są nieco niższe w przypadku konfiguracji badanego napędu.
4. Na podstawie relacji operatora modelu stwierdzono niższą prędkość przelotową modelu przy tym samym ustawieniu przepustnicy w stosunku do klasycznego napędu oraz znacznie wyższy poziom hałasu generowany przez silniki zainstalowane w skrzydłach.

Okazuje się, że zaletą metody modeli latających jest dostępność i niski koszt urządzeń pomiarowych, jak i samego modelu. Metoda umożliwia pomiary w locie z wykorzystaniem układów telemetrii, będących wyposażeniem zaawansowanych aparatów do zdalnego sterowania. Ograniczeniem metody modeli latających jest niska prędkość lotu typowego modelu, co uniemożliwia osiągnięcie parametrów takich jak prędkość przepływu powietrza czy ciśnienie zewnętrzne panujących podczas lotu pełnoskalowego samolotu. Dodatkowo, nawet identyczny profil skrzydła w pomniejszonej skali ma inne charakterystyki aerodynamiczne niż skrzydło pełnoskalowe, co stanowi problem w sprawdzeniu konstrukcji pod względem osiągnięć czy oporów aerodynamicznych. Ponadto niewielki udźwieg modelu ogranicza zestaw pokładowego wyposażenia pomiarowego.

Bibliografia:

- [1] Elshtein, P. (1986). *Modelarstwo lotnicze w Polsce*. Seria: Biblioteczka Skrzydlatej Polski. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [2] Konieczny, J. R. (1976). *Na skrzydłach jak ptaki*. Seria: Miniatury lotnicze. Warszawa: Krajowa Agencja Wydawnicza.
- [3] Martinez, S. E. (2016). *Study and suppression of vibrations in rotary wing UAVs*. PhD Thesis, City University of London, School of mathematics, Computer Sciences and Engineering.
- [4] Mroczek, A. (2016). *Konstruktor. 26 rozmów z Andrzejem Frydrychewiczem*. Łódź: Wydawnictwo Galaktyka.
- [5] Pytko, J. (2020). *Doświadczalna weryfikacja układu napędowego statku powietrznego z silnikami elektrycznymi w skrzydłach*. Praca inżynierska. Dęblin: Lotnicza Akademia Wojskowa.
- [6] Pytko, J., Longwic, R., Gnapowski, E., Rypulak, A., Smolak, M., Bronisz, P., Kapszak, P., Pytko, J. (2019). *Skrzydło nośne z układem śmigło-silnikowym*, nr zgłoszenia P.424740, Biuletyn Urzędu Patentowego RP nr 19/2019, Warszawa.
- [7] Pytko, J. A., Gnapowski, E., Rypulak, A., Kasprzak, P., Pytko, J. D. (2018). *Sailplane wing integrated with a motor-propeller system*. Proc. XXXIV OSTIV Congress, Hosin, The Czech Republic.
- [8] Wierzbę, B. Wielki krok w małym lotnictwie. Modelem przez Atlanty. *Modelarz*, 4/2004.
- [9] <https://web.archive.org/web/20130911093946/http://www.modelaircraft.org/MAG/mhill/hillindex.htm> (dostęp: 24.06.2025 r.).
- [10] <https://www.fai.org/Penaud-Planophore-150-years-ago> (10.03.2025 r.).

Źródła fotografii:

- [11] <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2011/august/01/flying-skeletons-and-electric-hummingbirds>
- [12] <https://www.modelaviation.com/enginehistory>
- [13] https://outerzone.co.uk/plan_details.asp?ID=12381