



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

INSTYTUT ELEKTRONIKI

Projekt dyplomowy

*Projekt bezzałogowego statku powietrznego z autorskim
kontrolerem lotu*

*Design of an unmanned aerial vehicle with a proprietary flight
controller*

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Filip Jakub Pieniążek

Elektronika i Telekomunikacja

dr inż. Marek Frankowski

Kraków, 2023

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
1.1 Opis wstępny	5
1.2 Wstęp teoretyczny	6
1.2.1 Układ odniesienia	6
1.2.2 Powierzchnie sterowe	6
1.2.3 Bezzałogowe statki powietrzne	7
1.2.4 Prawo lotnicze w Polsce	9
2. Projekt systemu	11
2.1 Komponenty systemu	11
2.1.1 Kontroler lotu.....	12
2.1.2 Stacja naziemna	13
2.2 Komponenty oprogramowania	14
2.2.1 Implementacja systemu stabilizacji — algorytm PID	14
2.2.2 Program stacji naziemnej.....	15
2.2.3 Aplikacja na telefon	15
2.2.4 Program kontrolera lotu	15
2.2.5 Elementy autonomiczne oprogramowania	17
2.3 Wykorzystane komponenty elektroniczne	18
2.3.1 Mikrokontroler.....	18
2.3.2 Moduł GPS	19
2.3.3 Moduł IMU	20
2.3.4 Moduł nadawczo-odbiorczy	21

2.3.5 Moduł wysokościomierza.....	22
2.3.6 Buzzer.....	22
2.3.7 Aparatura sterująca 2,4GHz	23
2.3.8 Akumulator.....	24
2.3.9 Silnik bezszczotkowy prądu stałego.....	25
2.3.10 Sterownik silnika	27
2.3.11 Serwomechanizmy	28
3. Testy systemu	29
3.1 Testy jednostkowe podzespołów.....	29
3.2 Platforma testowa.....	29
4. Budowa modelu bezzałogowego statku powietrznego	32
4.1 Projekt CAD.....	32
4.2 Proces budowy	32
4.2.1 Budowa skrzydeł samolotu.....	32
4.2.2 Budowa stateczników samolotu	35
4.2.3 Budowa kadłuba samolotu	36
5. Napotkane problemy.....	38
5.1 Brak dostępności elementów elektronicznych	38
5.2 Brak możliwości testowania w warunkach kontrolowanych	38
6. Możliwości rozwoju	39
6.1 Programowe rozszerzenie funkcjonalności.....	39
6.2 Sprzętowe rozszerzenie funkcjonalności	40
6.3 Optymalizacja sprzętowa	40

7. Podsumowanie i wnioski	41
7.1 Podsumowanie wykonanych prac	41
7.2 Kosztorys oraz porównanie z produktami komercyjnymi	41
7.3 Wnioski	42
A. Kod źródłowy aplikacji	43
B. Bibliografia.....	44
C. Spis ilustracji	47

1. Wprowadzenie

1.1 Opis wstępny

W ostatnich latach popularność oraz dostępność bezzałogowych statków powietrznych wzrasta w zawrotnym tempie. Zarówno sektor zarezerwowany dla profesjonalistów jak i hobbystów posiada co raz więcej rozwiązań w co raz bardziej przystępnych cenach. Na rynku można znaleźć zarówno samoloty, wielowirnikowce jak i helikoptery. Sporą część rynku stanowią drony służące do filmowania i wykonywania zdjęć, jednak w ostatnim czasie popularny jest również sektor dronów FPV (*ang. First Person View*), które oferują dla użytkownika znacznie większą ilość wrażeń z latania. Najmniej popularnym sektorem bezzałogowych statków powietrznych jest sektor militarny i rolniczy, ponieważ jest on mocno ograniczony prawnie oraz specjalistyczny ze względu na swoje zastosowanie. Wszystkie z przedstawionych kategorii posiadają jeden wspólny komponent, bez którego żaden z nich nie byłby w stanie poprawnie działać. Jest to kontroler lotu, minikomputer obsługujący wszystkie czujniki oraz sterujący silnikami i innymi mechanizmami statku powietrznego według zadanych przez operatora poleceń. Na rynku istnieje spora liczba kontrolerów dostępnych komercyjnie, jednak większość z nich posiada zamknięty kod tym samym nie pozwalając na samodzielną ingerencję w oprogramowanie poza kilkoma parametrami strojenia. Jest to uciążliwe, ponieważ dość często w celu dodania zaledwie jednej bądź dwóch funkcji trzeba liczyć się z dodatkowym wydatkiem rzędu kilkuset do kilku tysięcy złotych.

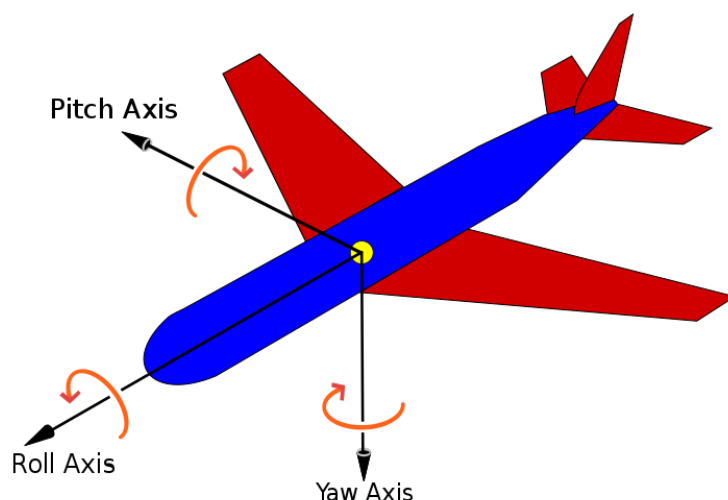
Tematem tej pracy jest samolot wyposażony w autorski kontroler lotu odczytujący wszystkie niezbędne dane z czujników oraz następnie sterujący według zadanych poleceń operatora. Jedną z zalet tego kontrolera jest możliwość dalszego rozwoju rozwiązania poprzez dodawanie dodatkowych komponentów elektronicznych lub też zmianę oprogramowania. Kolejnym z założeń jest prostota podłączenia oraz kompatybilność trybów użytkownika z innymi rozwiązaniami tego typu. Jest to bardzo przydatna cecha dla osób używających innych systemów komercyjnych, do których jest już przyzwyczajona. W ramach pracy dyplomowej zaprojektowane oraz wykonane zostały dwie płytki połączeniowe pozwalające na odpowiednie połączenie elektryczne zakupionych komponentów elektronicznych, oprogramowanie kontrolera oraz stacji naziemnej jak i aplikacja na urządzenia z systemem bluetooth. Poza przedstawionymi elementami zaprojektowany i zbudowany został model bezzałogowego statku powietrznego, przy

pomocy, którego system został przetestowany w domyślnych warunkach użytkowania. Poza wymienionymi elementami wszystkie elementy elektroniczne zostały zakupione jako gotowe urządzenia.

1.2 Wstęp teoretyczny

1.2.1 Układ odniesienia

W opisach zachowania samolotu często używany jest nieinercjalny układ odniesienia związany z samolotem. Początek układu znajduje się w środku masy samolotu, natomiast osie opisywane są zgodnie z rysunkiem 1. W literaturze najczęściej stosowane są anglojęzyczne terminy: *yaw*, *pitch*, *roll*, które odpowiadają polskim terminom: odchylenie, pochylenie, przechylenie. (Szutowski, 2007)



Rys. 1 Układ odniesienia związany z samolotem.

Źródło: opracowanie obce (2)

1.2.2 Powierzchnie sterowe

Powierzchnia sterowa to ruchoma część powierzchni nośnej skrzydła lub statecznika, której wychylenie powoduje zmiany w przepływie powietrza i tym samym zmianę siły aerodynamicznej. Wychylenie powierzchni sterowej ma na celu zmianę

kierunku lotu lub jego charakterystyki. W zależności od położenia i przeznaczenia wyróżnia się:

- Lotki — umieszczone są parami na krawędzi spływu skrzydeł samolotu. Wychylane w przeciwnych kierunkach odpowiadają za kontrolę samolotu w osi *roll*,
- Ster kierunku — umieszczony na stateczniku pionowym odpowiada za obrót samolotu w osi *yaw*,
- Ster wysokości — umieszczony na stateczniku poziomym odpowiada za wychylenie samolotu w osi *pitch*.
- Klapy — podobnie jak lotki, umieszczone parami na krawędzi spływu skrzydeł samolotu, jednak w przeciwieństwie do lotek wychylane są symetrycznie. Pozwalają na zwiększenie siły nośnej przy małych prędkościach jak i za wytracanie prędkości przed lądowaniem. Funkcje klap i lotek mogą być pełnione przez te same powierzchnie sterowe, nazywa się wtedy klapolotkami. (Szutowski, 2007)

1.2.3 Bezzałogowe statki powietrzne

Bezzałogowe statki powietrzne można podzielić na trzy podkategorie stosowane w ogólnej nomenklaturze. Są to:

- Samoloty (*ang. Fixed wing*) – statki powietrzne ze stale zamontowanymi, obrotowymi powierzchniami nośnymi,
- Koptery (*ang. Rotary wing*) – statki powietrzne z obrotowymi powierzchniami nośnymi (np. *Quadrocopter, hexacopter*),
- Helikoptery – statki powietrzne z obrotowymi powierzchniami nośnymi położonymi prostopadle do siebie.

W przedstawionym projekcie rozważany jest model samolotu. Konstrukcja taka charakteryzuje się kilkoma elementami będącymi niezbędną podstawą występującą w każdej z nich. Do niezbędnych części konstrukcyjnych zdalnie sterowanego modelu samolotu należą:

- Kadłub — jest to podstawowa, centralna część samolotu łącząca poszczególne elementy konstrukcyjne. Wewnątrz znajduje się elektronika niezbędna do zasilania oraz sterowania modelem. Najczęściej w przedniej części kadłuba montowany jest silnik. Istnieją również modele z silnikami w konfiguracji pchającej, wtedy silnik umieszczany jest w tylnej części modelu zwrócony w stronę końca modelu. Kadłub może zostać wykonany z jednej podłużnej konstrukcji lub też może mieć wydzieloną rurę ogonową. Jest to najczęściej rura wykonana z włókna węglowego, stosowana w tańszych, mniej skomplikowanych konstrukcjach. Prostsze modele posiadają kadłub wykonany ze sklejk i balsy, najczęściej pokrywane są folią termokurczliwą bądź też lakierem utwardzającym. W przypadku bardziej zaawansowanych modeli stosuje się kadłuby kompozytowe z włókna węglowego wykonywane przy zastosowaniu specjalnie zaprojektowanych form,
- Skrzydła — część samolotu generująca siłę nośną niezbędną do lotu modelu. Zależnie od wielkości modelu różnią się parametrami takimi jak: rozpiętość (szerokość skrzydeł mierzona prostopadłe do kadłuba), cięciwa (szerokość skrzydeł mierzona równoległe do kadłuba; cięciwa przy kadłubie nie jest równa cięciwie na końcówce skrzydła) oraz profil lotniczy (w zależności od kształtu profilu skrzydło może być przystosowane do lotu szybszego bądź wolniejszego, może generować większą siłę nośną lub mniejszą). Znając docelowe parametry modelu można przy pomocy narzędzi takich jak np. XLFR5 lub ANSYS Fluent wyznaczyć optymalny profil aerodynamiczny. W przypadku skrzydeł stosuje się profile nośne w przeciwieństwie do profili symetrycznych wykorzystywanych przy budowie stateczników. Skrzydła w zależności od swojej rozpiętości mogą być dzielone na jedną, dwie lub trzy części konstrukcyjne. W przypadku trzech części wyróżnić można centropłat, który najczęściej jest częścią integralną kadłuba. Skrzydła wyposażone są w powierzchnie sterowe opisane w punkcie 1.2.2,
- Stateczniki — nieruchoma część ustrzenia samolotu. Zbudowana z symetrycznych profili aerodynamicznych. Można wyróżnić statecznik poziomy oraz pionowy. Wykorzystywane są one do stabilizacji lotu modelu, a także do manewrowania, ponieważ podobnie jak skrzydła wyposażone są one w powierzchnie sterowe. W standardowej konfiguracji stateczniki zamontowane są pod kątem prostym względem siebie (pion i poziom). Istnieje również konfiguracja ustrzenia motylkowego, gdzie ustawione są one w literę „V” i jednocześnie pełnią funkcję

zarówno stateczników poziomych jak i pionowych. Konstrukcją bardzo mocno zbliżone do skrzydeł. (Bielawski, 2015)

1.2.4 Prawo lotnicze w Polsce

Prawo lotnicze w Polsce dostosowane jest do aktualnego prawa europejskiego. Każdy pilot bezzałogowego statku powietrznego musi być zarejestrowany w Urzędzie Lotnictwa Cywilnego jako pilot i operator oraz mieć uprawnienia niezbędnego do wykonywania lotu w określonej sytuacji.

Polskie prawo lotnicze wyróżnia 3 kategorie lotów bezzałogowych:

- Kategoria otwarta — pozwala na wykonywanie lotów niskiego ryzyka, nie wymagają wcześniejszego zezwolenia na lot z Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Operacje w tej kategorii mogą być wykonywane jedynie w zasięgu wzroku, w odległości nie większej niż 120m od ziemi oraz drona o masie nieprzekraczającej 25kg. Podzielona jest na 3 podkategorie: A1, A2, A3, z których A1 i A3 wymagają jedynie darmowego egzaminu on-line. Pozwala ona latać lekkimi modelami foto-video bez możliwości wlatywania nad postronnych ludzi, (4)
- Kategoria szczególna — pozwala na wykonywanie lotów średniego ryzyka, większość operacji wymaga wcześniejszego (co najmniej 24h) zezwolenia w państwowym systemie PansaUTM. Operacje w tej kategorii mogą być wykonywane zarówno w jak i poza zasięgiem wzroku operatora, w odległości nie większej niż 120m od ziemi. Istnieje możliwość zwiększenia tej odległości po uprzednim złożeniu odpowiedniego wniosku do Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Masa drona podobnie jak w kategorii otwartej nie może przekraczać 25kg. Podzielona jest na 8 kategorii NSTS-01 do NSTS-08, gdzie każda z nich określa inny rodzaj bezzałogowego statku powietrznego oraz maksymalną masę startową. W celu uzyskania tych kategorii wymagany jest zarówno kurs teoretyczny jak i praktyczny zakończony egzaminem państwowym, (5)
- Kategoria certyfikowana — pozwala na wykonywanie lotów wysokiego ryzyka, wszystkie operacje wymagają zatwierdzenia. Jest to rozszerzenie kategorii szczególnej o loty nad zgromadzeniami ludzkimi, związane z transportem ludzi oraz loty związane z przewozem materiałów niebezpiecznych. (6)

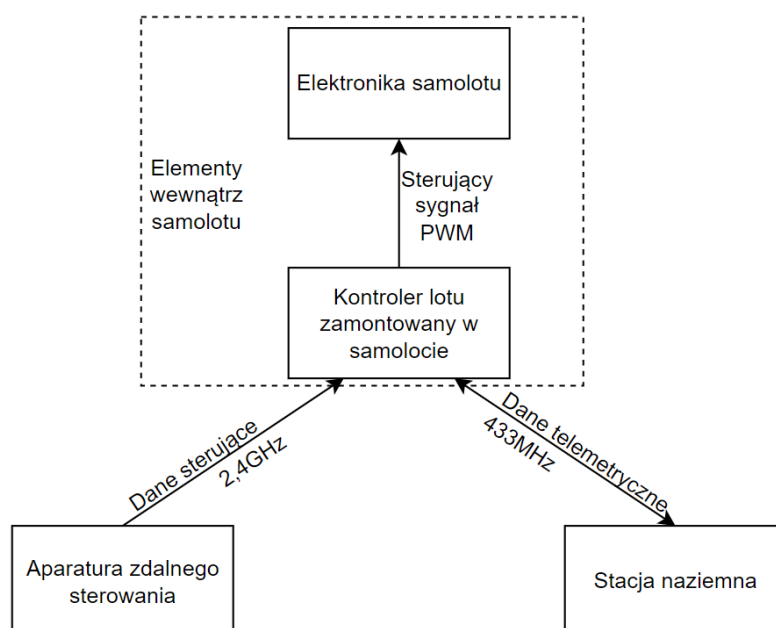
W przypadku większości prywatnych lotów hobbystycznych komercyjnymi dronami foto-video w pełni wystarczająca jest kategoria otwarta. Duża część produkowanych wielowirnikowców projektowana jest wedle wymogu $<249\text{g}$ w celu pokrycia wymogów dla darmowej kategorii A1.

2. Projekt systemu

2.1 Komponenty systemu

System przedstawiony w tym projekcie składa się z czterech głównych komponentów:

- Kontroler lotu — znajduje się bezpośrednio w samolocie i odpowiada zarówno za odbieranie, nadawanie, odczyt z czujników jak i obliczenia i sterowanie samolotem, jest to najważniejszy komponent systemu,
- Stacja naziemna — odpowiada jako punkt nadawczo-odbiorczy pomiędzy kontrolerem lotu, a smartfonem, na którego przesyła dane telemetryczne odbierane z samolotu. Łączność jest dwustronna, tak więc przy pomocy aplikacji na smartfonie można zmieniać parametry lotu w czasie rzeczywistym przy pomocy protokołu *bluetooth*,
- Aparatura zdalnego sterowania — komercyjny nadajnik modelarski na paśmie 2,4GHz sparowany z odbiornikiem znajdującym się na płycie kontrolera lotu w samolocie. Nadajnik przesyła dane pobrane z manetek sterowania wychyłanych przez pilota. Każda wartość przesyłana jest na oddzielnym kanale aparatury, tak więc jeden kanał nadajnika jest równy jednemu kanałowi odbiornika, gdzie pojawia się identyczny sygnał,
- Elektronika samolotu — elementy elektroniczne niezbędne do mechanicznego sterowania samolotem: silnik bezszczotkowy prądu stałego, serwomechanizmy, elektroniczny regulator obrotów (ESC), akumulator, przetwornica napięcia zasilająca kontroler.



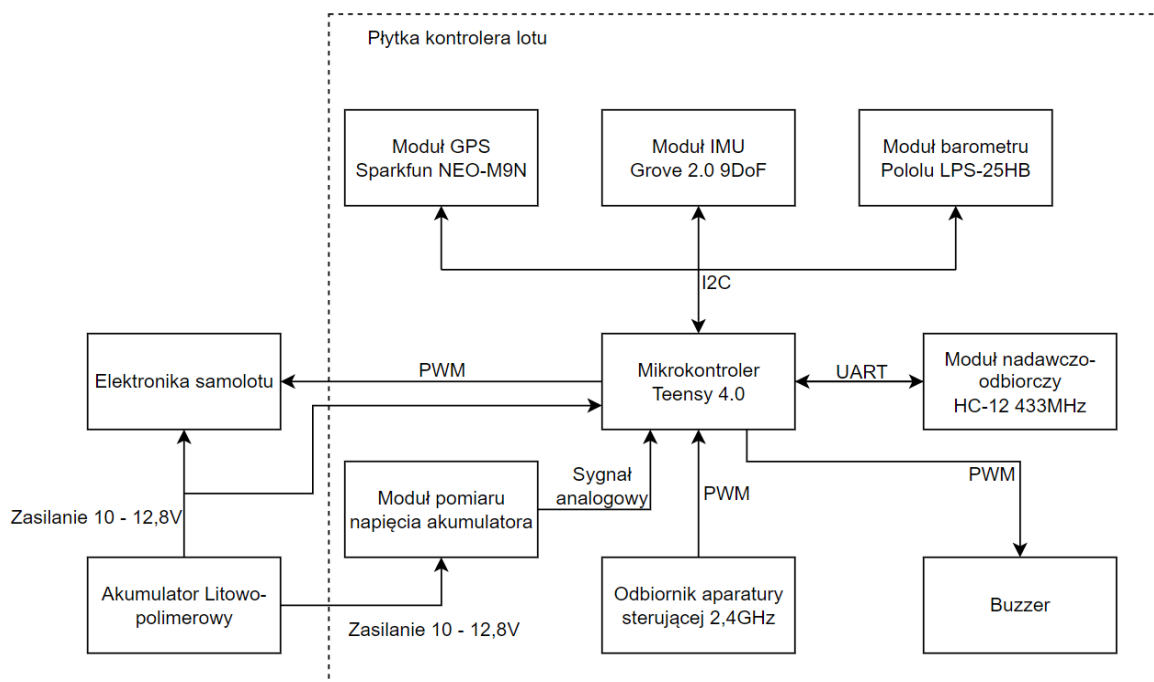
Rys. 2 Schemat ideowy projektowanego systemu

Źródło: opracowanie własne

2.1.1 Kontroler lotu

Kontroler składa się z poszczególnych sekcji, w których można wyróżnić komponenty odpowiedzialne za poprawne działanie systemu:

- Sekcja radiowa — w jej skład wchodzi odbiornik modelarski działający w paśmie 2,4GHz odbierający dane z aparatury sterującej, w którą wyposażony jest operator oraz moduł nadawczo-odbiorczy działający w paśmie 433MHz odpowiadający za komunikację i przesył danych telemetrycznych do stacji naziemnej,
- Sekcja pomiarowa — w jej skład wchodzi czujniki niezbędne do poprawnego działania kontrolera i badania aktualnej pozycji samolotu. Są to: odbiornik GPS, żyroskop, akcelerometr, barometr, kompas,
- Sekcja obliczeniowa — składająca się z płytki mikrokontrolera Teensy 4.0 opartej na procesorze ARM Cortex M7 z taktowaniem 600MHz programowanej w języku C++ w środowisku Arduino IDE. Odpowiada za realizację programu, odczyt z czujników oraz wysyłanie sygnałów sterujących na odpowiednie wyjścia.

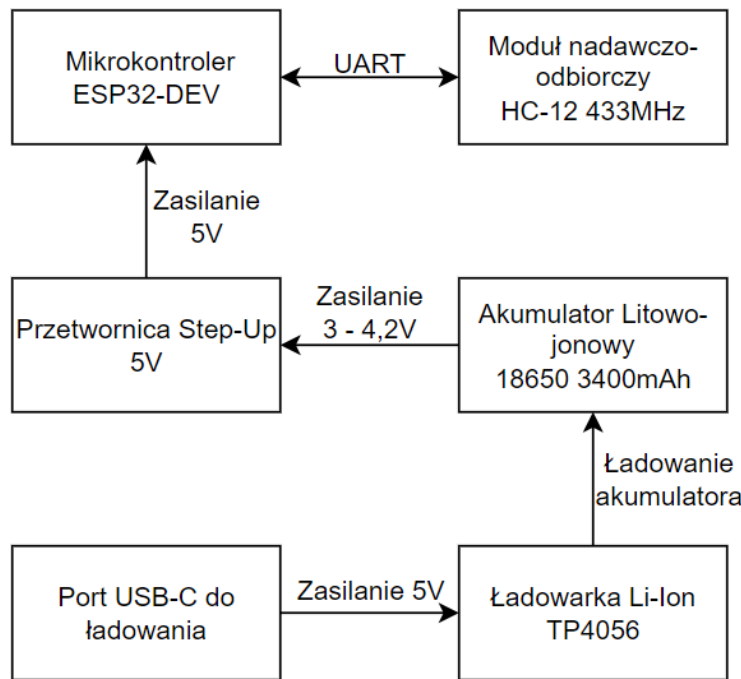


Rys. 3 Schemat budowy kontrolera lotu

Źródło: opracowanie własne

2.1.2 Stacja naziemna

Stacja naziemna została stworzona jako węzeł komunikacyjny znajdujący się między samolotem, a urządzeniem mobilnym z systemem Android oraz zainstalowaną aplikacją stworzoną również w ramach tego projektu. Jednym z założeń tego komponentu miała być jego mobilność i kompaktowość, dlatego też wymogiem było niezależne źródło zasilania w postaci akumulatora litowo-jonowego. W celu poprawnego zasilenia mikrokontrolera ESP32 wymagana była przetwornica podwyższająca i stabilizująca napięcie na poziomie 5V, ponieważ nominalnie ogniwo 18650 posiada napięcie nominalne 3,6V. Ponadto dodany został moduł ładowarki, który zasilić można przy pomocy standardowego wejścia USB-C, płytki posiada również zabezpieczenie przed nadmiernym rozładowaniem ogniwa. Zasilanie układu odcinane jest przez nią przy napięciu 2,5V, które jest skrajnym bezpiecznym napięciem dla danego typu akumulatora.



Rys. 4 Schemat budowy stacji naziemnej

Źródło: opracowanie własne

2.2 Komponenty oprogramowania

2.2.1 Implementacja systemu stabilizacji — algorytm PID

Regulator PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkujący) jest jednym z najczęściej wykorzystywanych algorytmów w teorii sterowania. Jego celem jest utrzymanie wartości wyjściowej na zadanym poziomie. Regulator ten działa w pętli sprzężenia zwrotnego, oblicza on wartość uchybu, czyli różnicę pomiędzy wartością zadaną, a wartością aktualną. Poprzez podawanie odpowiedniego sygnału wejściowego stara się zredukować wartość uchybu. Algorytm obliczeń posiada trzy oddzielne zmienne parametry oznaczone odpowiednio P, I, D. Poglądowo zinterpretować działanie tych parametrów można w następujący sposób:

- P — kompensuje uchyb bieżący,
- I — kompensuje gromadzenie uchybów przeszłych,
- D — kompensuje przewidywane uchyby przyszłe. (Brzózka, 2004)

2.2.2 Program stacji naziemnej

Stacja naziemna stanowi węzeł komunikacyjny łączący model samolotu z telefonem lub innym urządzeniem z systemem Android. Przy jej pomocy przesyłane są dane telemetryczne oraz parametry sterujące przekazywane z aplikacji zainstalowanej na telefonie. Program opiera się na prostym przekazywaniu danych pomiędzy portem szeregowym, do którego podłączony jest moduł radiowy 433MHz oraz modulem Bluetooth, w który wyposażony jest mikrokontroler ESP32. Komunikacja jest dwukierunkowa.

2.2.3 Aplikacja na telefon

Aplikacja na telefon została stworzona przy pomocy bezpłatnego narzędzia MIT App Inventor. (8) Pozwala ono stworzyć proste aplikacje mobilne przy pomocy prostego programowania blokowego. Każdy blok posiada swoją funkcjonalność i może być łączony z innymi w celu osiągnięcia prawidłowego działania algorytmu. W przypadku aplikacji wykorzystywanej w tym projekcie stworzony został jeden ekran, na którym można włączać lub wyłączać transmisję danych telemetrycznych z samolotu do stacji naziemnej. W ten sposób można łatwo zarządzać oraz monitorować danymi wysyłanymi przez model. Dane wyświetlane są bezpośrednio na ekranie telefonu. W dolnej części znajduje się panel pozwalający na zmianę współczynników sterujących działaniem algorytmu PID. Aplikacja może być uruchomiona na każdym urządzeniu z systemem Android wyposażonym w moduł Bluetooth.

2.2.4 Program kontrolera lotu

Program znajdujący się w mikrokontrolerze kontrolera lotu napisany został w języku C++ w środowisku Arduino IDE. (9) Każda z funkcjonalności została zaimplementowana w oddzielnej funkcji, które następnie wywoływane są w odpowiednich blokach algorytmu. Niektóre z modułów posiadają gotowe biblioteki oraz funkcje pozwalające odbierać odpowiednie informacje, które również zostały wykorzystane podczas budowy oprogramowania. Struktura programu podzielona jest na kilka sekcji wedle funkcji, którą pełni:

- Sekcja inicjalizacji — odpowiada za startową inicjalizację wszystkich modułów, uruchomienie komunikacji szeregowej oraz przyjęcie wartości początkowych dla

zmiennych. Definiuje również kanały wejścia i wyjścia danych z czujników oraz aparatury sterującej i kanałów serwomechanizmów,

- Sekcja czujników — odpowiada za gromadzenie danych pobranych przy użyciu magistrali I2C z czujników niezbędnych do odpowiedniej pracy kontrolera. Pobrane dane zapisuje w postaci zmiennych globalnych, które następnie mogą zostać wykorzystane przez pozostałe części programu,
- Sekcja telemetrii — odpowiada za odpowiednie przygotowanie danych do przesłania oraz za komunikację szeregową z modułem nadawczym 433MHz. Komunikacja odbywa się dwukierunkowo, tak więc kod znajdujący się w tej części programu odpowiada również za odebranie parametrów i przypisanie ich wartości do odpowiednich zmiennych. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwa jest konfiguracja urządzenia zdalnie w czasie rzeczywistym,
- Sekcja wejść/wyjść — odpowiada za odczytywanie sygnałów PWM z odbiornika aparatury zdalnego sterowania 2.4GHz, a także za przekazanie odpowiednich sygnałów na wejścia sterownika silnika oraz odpowiednich serwomechanizmów,
- Sekcja sterująca — jest to część kodu odpowiadająca za sterowanie samolotem. Interpretuje ona wszystkie otrzymane dane, sygnały oraz telemetrię, a następnie stosując się do określonego algorytmu sterowania przesyła odpowiednie sygnały przy pomocy sekcji wejść/wyjść. Odpowiada zarówno za kalkulację algorytmu PID, jak i obsługę różnych trybów lotu, zawiera również zabezpieczenie przed zbyt dużym rozładowaniem akumulatora. W przypadku zbyt niskiego napięcia zasilania kontroler uruchamia buzzer dający znać o konieczności lądowania. Buzzer wykorzystywany jest również jako sygnalizator zmiany trybu lotu. Sekcja ta odpowiada również za odpowiednią obsługę algorytmu zerwania sygnału z aparaturą sterującą modelem.

Kontroler wyposażony został w tryby lotu, są one wybierane przy pomocy przełącznika trójpozycyjnego na aparaturze sterującej:

- Manualny — tryb, w którym sygnały sterujące z aparatury bezpośrednio przekazywane są na wyjścia sterujące kontrolera. W tym trybie operator nie posiada żadnego wspomagania sterowania modelem,

- Stabilizacja — tryb, w którym sterowanie jest wspierane poprzez moduły żyroskopu oraz akcelerometru. Samolot przy wykorzystaniu algorytmu PID stabilizuje się automatycznie do pozycji zadanej przez operatora samolotu. Tryb ten jest pomocny w przypadku ciężkich warunków atmosferycznych lub przy małej stabilności konstrukcji samolotu,
- Utrzymanie wysokości — tryb bardzo podobny do trybu stabilizacji, jednak w tym przypadku algorytm stabilizacji jest stosowany zarówno dla osi *roll* jak w przypadku trybu stabilizacji jak i dla osi *pitch*. Tryb ten w sposób automatyczny utrzymuje aktualną wysokość lotu modelu.

2.2.5 Elementy autonomiczne oprogramowania

Oprogramowanie kontrolera wyposażone zostało w podstawową funkcjonalność autonomiczną, którą jest automatyczny powrót do bazy. Podstawowym połączeniem sterującym jest połączenie aparatury sterującej 2.4GHz i to on jest wyznacznikiem zerwania sygnału. Kontroler wyposażony został w wejście pomiarowe pozwalające na zbadanie zaniku zasięgu na odbiorniku 2.4GHz. W ten sposób po wykryciu utraty sterowania włączona zostaje procedura *failsafe*. Działanie algorytmu opiera się na aktualnie zmierzonej pozycji z odbiornika GPS oraz lokalizacji startowej. Na podstawie tych dwóch punktów algorytm oblicza odpowiedni azymut pozwalający na powrót do punktu startowego. Swoją aktualny kierunek może określić przy pomocy pomiaru magnetometru wyznaczającego kierunek geograficzny. Następnie przy pomocy odpowiedniego wychylenia lotek samolot podąża za wyznaczonym kierunkiem lotu. Oprócz odpowiedniego ustawienia kierunku lotu samolot zwiększa swój pułap lotu w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa rozbicia z możliwymi przeszkodami. Wznoszenie zostaje zaprzestane przy osiągnięciu maksymalnego pułapu zezwolonego przez prawo lotnicze, czyli 120m. Działanie algorytmu kończy się w momencie powrotu połączenia między nadajnikiem, a odbiornikiem aparatury sterującej. Implementacja algorytmów lotu autonomicznego znacznie zwiększa bezpieczeństwo lotu samolotu jak i osób postronnych znajdujących się w możliwym zasięgu operacji. W przypadku lotów w strefach podwyższonego ryzyka w kategorii szczególnej funkcja *failsafe* jest obowiązkowa w celu otrzymania zezwolenia na lot.

2.3 Wykorzystane komponenty elektroniczne

Komponenty elektroniczne zostały wybrane według kilku kryteriów:

- Aktualna dostępność na rynku — kryzys na rynku półprzewodników sprawia, że dostawy niektórych czujników trwają nawet miesiąc tym samym wykluczając je z użytku w projekcie, jako że jednym z założeń projektu była łatwa dostępność i tanie wykonanie,
- Dostępność bibliotek — dobieranie elementów z gotowymi bibliotekami ułatwia rozwój platformy w przypadku podejścia *open-source*,
- Popularność (ilość tworzonych projektów) — podobnie jak w przypadku bibliotek, łatwiej o szybszy rozwój w oparciu o wiele innych projektów,
- Cena rozwiązania — komponenty powinny być tanie, aby rozwiązanie było konkurencyjne cenowo względem innym urządzeń dostępnych komercyjnie.

2.3.1 Mikrokontroler

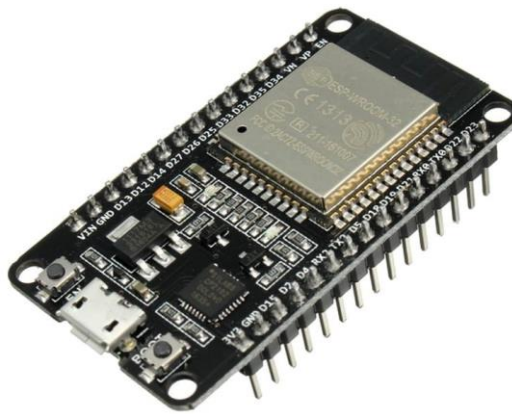
Główną jednostką kontrolera jest mikrokontroler Teensy 4.0 oparty o procesor ARM Cortex-M7 taktowany zegarem 600MHz. (10) Jego główną zaletą są bardzo duże możliwości obliczeniowe oraz spora ilość wejść/wyjść dostępnych dla użytkownika. Dodatkową zaletą jest możliwość programowania go w środowisku Arduino IDE co znacznie ułatwia samo programowanie. Jest to popularna płytką przez co też istnieje duża ilość bibliotek pozwalających usprawnić pisanie kodu na daną platformę. Biblioteki pisane na płytce Arduino również są obsługiwane.



Rys. 5 Mikrokontroler Teensy 4.0

Źródło: opracowanie własne

Drugim mikrokontrolerem wykorzystanym w tym projekcie jest płytką ESP32, (11) która stanowi jednostkę centralną stacji naziemnej. Ten model został wybrany głównie ze względu na posiadanie wbudowanych modułów Bluetooth oraz WiFi, z których pierwszy został wykorzystany jako forma komunikacji między stacją naziemną, a telefonem. Ten mikrokontroler również jest wspierany przez środowisko Arduino IDE podobnie jak Teensy 4.0. Ponadto wykorzystanie tego modelu pozwala na rozwój projektu w przyszłości o funkcjonalność serwera WiFi. Tym samym informacje o samolocie będzie można odczytywać bezprzewodowo ze strony WWW przy pomocy serwera HTTP.



Rys. 6 Mikrokontroler ESP32-DEV

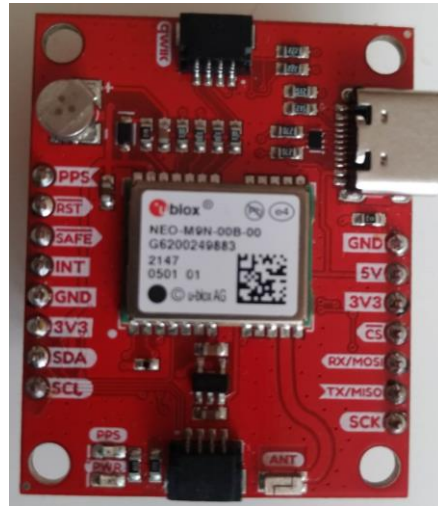
Źródło: opracowanie obce (12)

2.3.2 Moduł GPS

Moduł GPS jest niezbędnym komponentem do zbierania danych lokalizacyjnych modelu. Moduł ten może pobierać aktualną lokalizację, a następnie przy pomocy nadajnika telemetryjnego przesłać ją na telefon, gdzie po uzbieraniu określonej liczby punktów można sporządzić dokładną mapę przelotu modelu. Odbiornik GPS stanowi też kluczowy element w przypadku utraty kontroli i rozbicia modelu, ostatnia aktualna pozycja zapisywana jest w pamięci telefonu tym samym pozwalając na znalezienie modelu nawet w najcięższych warunkach.

W tym projekcie wykorzystany został moduł GPS Sparkfun Neo-M9N. (13) Jest to kompaktowy moduł GPS z napłytkową anteną pozwalający na określenie pozycji

z dokładnością nawet do 1,5m. Płytkę wyposażoną została w baterię RTC umożliwiającą tzw. Hot-start, czyli redukcję czasu znalezienia pierwszych satelit geostacjonarnych poprzez przechowywanie informacji z ostatniego uruchomienia. Moduł ten posiada również możliwość pomiaru wysokości lotu, jednak w tym projekcie wykorzystany został zewnętrzny moduł barometru.



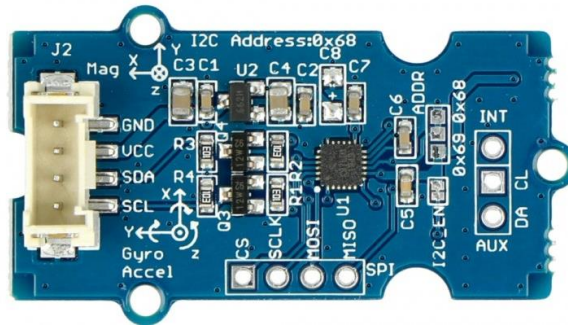
Rys. 7 Moduł GPS Sparkfun NEO-M9N

Źródło: opracowanie własne

2.3.3 Moduł IMU

Moduł IMU (*ang. Inertial Measurement Unit*) jest to jednostka nawigacji bezwładnościowej mierząca przyspieszenia oraz prędkości kątowe czujnika w celu określenia ich położenia oraz orientacji. Dzięki temu czujnikowi dron wie w jakiej pozycji względem ziemi się znajduje. Wyposażona w akcelerometr, żyroskop oraz magnetometr jest w stanie dokładnie określić swoją pozycję. Jest to niezbędny komponent w przypadku budowy kontrolera lotu, ponieważ zapewnia on możliwość stabilizacji modelu.

W tym projekcie zastosowany został czujnik Grove 9DoF IMU wyposażony w popularny moduł MPU-6050. (14) Dane przesyłane są przy pomocy magistrali I2C.



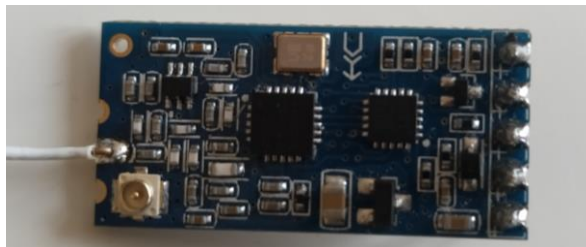
Rys. 8 Moduł IMU Grove 9DoF IMU

Źródło: opracowanie obce (15)

2.3.4 Moduł nadawczo-odbiorczy

Po analizie możliwych rozwiązań i częstotliwości radiowych wybór padł na pasmo 433MHz. Wymogiem modułu był zasięg co najmniej taki sam jak aparatury sterującej działającej w paśmie 2,4GHz. Wedle not katalogowych wybrany został moduł nadawczo-odbiorczy HC-12. (16) Pasma radiowe 433MHz jest bardzo przyjaznym rozwiązaniem dla takich projektów, ponieważ istnieje sporo tanich rozwiązań radiowych łatwo programowalnych dla mikrokontrolerów z rodziny Arduino oraz ich pochodnych. Jeden moduł umieszczony został w samolocie, natomiast drugi w stacji naziemnej.

Moduły te mają możliwość zmiany prędkości transmisji (zmienna szybkość transmisji) tym samym zmieniając również swój zasięg. Tym samym im wyższa prędkość transmisji tym mniejszy zasięg. Po obliczeniu odpowiedniej prędkości transmisji wymaganej do przesłania określonej paczki danych sprawdzony został w realnych warunkach zasięg takiego rozwiązania. Wybrana szybkość transmisji to 38400bit/s i jest on optymalny.

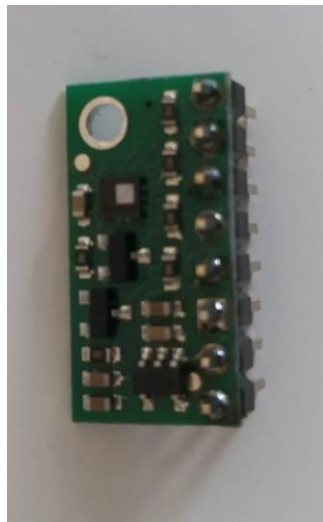


Rys. 9 Moduł nadawczo-odbiorczy HC-12

Źródło: opracowanie własne

2.3.5 Moduł wysokościomierza

Kontroler lotu wymaga pomiaru aktualnej wysokości nad ziemią, zarówno ze względu na aspekty lotu jak i samo prawo lotnicze obowiązujące na terenie Polski. W tym celu wykorzystany został wysokościomierz barometryczny Pololu LPS-25HB. (17) Oblicza on aktualną wysokość nad poziomem morza na podstawie ciśnienia atmosferycznego, ponadto posiada możliwość pomiaru temperatury, który jednak nie został wykorzystany w tym projekcie. W przypadku chęci pomiaru realnej wysokości nad poziomem morza czujnik potrzebowałby za każdym razem być kalibrowany ze względu na zmienne ciśnienie atmosferyczne, jednak wykorzystanie kontrolera tego nie wymaga. Po każdym uruchomieniu podczas inicjalizacji modułów do pomiaru wysokościomierza dodawana jest stała sprawiająca, że jest to wysokość względna z danego punktu, co również jest poprawne w rozumieniu prawa lotniczego.



Rys. 10 Moduł wysokościomierza Pololu LPS-25HB

Źródło: opracowanie własne

2.3.6 Buzzer

Płytkę kontrolera wyposażoną została w buzzer, dzięki któremu w łatwy i przejrzysty sposób operator informowany jest o zmianie aktualnego trybu lotu. Pozwala on też na sygnalizację gotowości modelu do działania oraz sygnalizację niskiego napięcia akumulatora. Jest to zwłaszcza istotna funkcja z racji używania akumulatora litowo-

polimerowego, dla którego bardzo niebezpieczną sytuacją jest spadek napięcia poniżej progu 3V.



Rys. 11 Buzzer

Źródło: opracowanie obce (18)

2.3.7 Aparatura sterująca 2,4GHz

Aparatura sterująca odpowiada za przekazanie drogą radiową sygnałów sterujących pobranych z drążków poruszanych przez pilota. Większość współczesnych aparatów sterujących obsługuje nadawanie w paśmie 2,4GHz. Niektóre z nich posiadają również moduł odbiorczy i dzięki temu mogą np. pokazać aktualny stan sygnału lub napięcie akumulatora podpiętego do odbiornika. Gama możliwości i zastosowań jest bardzo szeroka, jednak wraz z rozszerzeniem funkcjonalności wzrasta też cena danego rozwiązania. Podstawowym kryterium doboru aparatury jest ilość obsługiwanych kanałów. W przypadku podstawowego sterowania samolotem wymagane jest co najmniej 4 kanały (silnik, lotka prawa, lotka lewa, ster wysokości). Dla komfortowego sterowania wymagany jest dodatkowy jeden kanał na sterowanie sterem kierunku, który nie jest niezbędny dla małych modeli. W przypadku większych modeli zaleca się również stosowanie klap pozwalających na zmniejszenie prędkości podczas lądowania lub zwiększenie siły nośnej podczas lotu.

W przypadku opisywanego rozwiązania wykorzystane zostało 5 kanałów (silnik, lotka prawa, lotka lewa, ster wysokości, przełącznik trybów lotu). Na bazie określonych kryteriów wybrany został zestaw nadajnik-odbiornik FlySky FS-I6. (19) Jest to tania aparatura sterująca pozwalająca na sterowanie 6 proporcjonalnymi kanałami oraz posiadająca wystarczający zasięg, aby latać nie wykraczając poza krajowe przepisy lotnicze. Ponadto została ona wyposażona w podstawową telemetrię pokazującą aktualny

procentowy stan sygnału. Pozwala to na szybkie reagowanie w przypadku sterowania na dużej odległości.



Rys. 12 Aparatura sterująca FlySky FS-I6

Źródło: opracowanie obce (20)

2.3.8 Akumulator

W samolocie zastosowany został akumulator o odpowiednio dobranych parametrach pracy. Ze względu na duży pobór prądu silnika wymagane było zastosowanie akumulatora litowo-polimerowego. Ich główną zaletą jest bardzo duży prąd rozładowania oraz mała masa ogniwa, dlatego są one powszechnie wykorzystywane w modelarstwie, zarówno lotniczym jak i innych jego odmianach. Wybrany akumulator posiada konfigurację 3S1P (3 ogniwa szeregowo, 1 ogniwo równoległe), co oznacza, że napięcie nominalne pakietu to 11,1V. W celu osiągnięcia kompromisu między masą akumulatora, a długością lotu wybrana pojemność to 1000mAh oraz prąd rozładowania 25C pozwalający na stały prąd rozładowania równy 25A. W przypadku tak lekkiego modelu taka wartość jest w zupełności wystarczająca. Akumulatory te wymagają specjalnego traktowania ze względów bezpieczeństwa, tym samym wymagają one zabezpieczenia zarówno przed zbyt dużym naładowaniem jak i rozładowaniem. Funkcję pierwszego z zabezpieczeń w przedstawionym układzie stanowi regulator obrotów (*ang. Electronic Speed Controler*), który przy spadku napięcia poniżej pewnego poziomu uniemożliwia przepływ prądu z akumulatora tym samym wyłączając zasilanie modelu.



Rys. 13 Akumulator litowo-polimerowy

Źródło: opracowanie własne

Stacja naziemna również wyposażona została w akumulator pozwalając tym samym na niezależne działanie jako punkt połączeniowy między kontrolerem lotu, a telefonem. Wykorzystano ogniwo litowo-jonowe LiitoKala 18650 1S1P. Jest to popularny model ogniwa występujący między innymi w akumulatorach laptopów. Główną ich zaletą jest duża gęstość prądu, co oznacza dużą pojemność przy względnie małych gabarytach.



Rys. 14 Akumulator litowo-jonowy

Źródło: opracowanie własne

2.3.9 Silnik bezszczotkowy prądu stałego

W mijających latach rozrastający się rynek elektromobilności znacząco wpłynął na rozwój elektrycznych systemów napędowych mogących sprostać aktualnym wymaganiom konsumenta. Najpopularniejszym aktualnie rodzajem silnika wykorzystywanym powszechnie w pojazdach elektrycznych jest bezszczotkowy silnik prądu stałego (*ang. Brushless Direct-Current Motor*). Jego głównym atutem jest stosunek mocy do rozmiaru i masy danego urządzenia oraz sprawność sięgająca ponad 95%. (21) Dzięki takim

parametrom silniki te z sukcesem montowane są w bezałogowych statkach powietrznych. Niestety posiadają one również swoje wady. Główną jest wysoka cena takich napędów oraz wymóg instalacji dodatkowego sterownika dedykowanego do takiego rodzaju silnika, który ze względu na swoją specyfikę również kosztuje znacznie więcej w porównaniu do sterowników innych rodzajów.

Dobór silnika odbywa się według kilku kryteriów:

- Rodzaj modelu — w zależności od przeznaczenia oraz konstrukcji modelu można określić większe lub mniejsze zapotrzebowanie na moc. W przypadku modeli akrobacyjnych wykonujących różnego rodzaju wymagające manewry niezbędna jest spora zwrotność oraz siła ciągu, tym samym duża moc silnika. Jeśli chodzi o modele przeznaczone do latania wolnego, szybowce lub też modele treningowe zalecana jest mniejsza moc silnika, aby tym samym zmniejszyć masę całkowitą modelu. Samoloty tego typu nie potrzebują dużej siły ciągu, ponieważ większość czasu szybują,
- Masa całkowita modelu — przy za dużym stosunku mocy silnika do masy modelu następują duże przeciążenia mogące uszkodzić konstrukcję. Utrudnia on także sterowanie samolotem, poprzez duży moment obrotowy silnika, który w skrajnych wypadkach może prowadzić do przechylenia się modelu w momencie działania silnika,
- Zaawansowanie oraz doświadczenie pilota — dla nowych pilotów zalecana jest większa moc silnika ze względu na możliwość wykonywania nagłych i szybkich manewrów. Jest to zarówno zaleta jak i wada dla niedoświadczonego pilota, ponieważ można w ten sposób zarówno awaryjnie uratować model jak i łatwo go zniszczyć poprzez chwilę nieuwagi.

Model samolotu wykonanego w ramach tego projektu jest lekki oraz o dobrych właściwościach szybowcowych tym samym niewymagający dużej siły ciągu silnika. W tym celu wykorzystany został Dualsky Eco 2308C V2. Jest to jednostka napędowa o mocy 200W zasilana pakietem litowo-polimerowym o napięciu nominalnym 11,1V. Zastosowane śmigło 9x6 zostało odpowiednio dobrane w celu osiągnięcia maksymalnego punktu pracy silnika przy danym napięciu.



Rys. 15 Silnik Dualsky ECO2308C V2

Źródło: opracowanie obce (22)

2.3.10 Sterownik silnika

Silniki BLDC charakteryzują się innym niż pozostałe silniki prądu stałego sposobem sterowania, tym samym wymagając zastosowania zewnętrznego sterownika obrotów. Silniki te wyposażone są w wiele uzwojeń ustawionych w odpowiedniej konfiguracji. Sterowanie odbywa się poprzez podawanie napięcia na odpowiednie z 3 przewodów silnika tak, aby prąd przepływał w odpowiedniej cewce silnika. Odpowiedzialny za to jest regulator ESC (*ang. Electronic Speed Controller*). (23) Na wejście układu podawany jest sygnał PWM (*ang. Pulse Width Modulation*) o częstotliwości 50Hz i wypełnieniu od 1ms dla 0% do 2ms dla 100% mocy silnika. Jest to taki sam rodzaj sterowania jak w przypadku działania serwomechanizmów modelarskich, jednak w tamtym wypadku sygnał podawany jest bezpośrednio na urządzenie, natomiast tutaj niezbędny jest sterownik.

Układy te najczęściej posiadają również układ BEC (*ang. Battery Eliminator Circuit*) odpowiadające za zasilenie odbiornika oraz serwomechanizmów. Posiadają one wbudowany regulator liniowy stabilizujący napięcie 5V lub 6V. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie trzeba instalować oddzielnej baterii o napięciu nominalnym odpowiednim dla pozostałej części układu. (24)

Regulator ESC powinien być odpowiednio dobrany do wykorzystywanego silnika. W tym przypadku jedynym kryterium jest maksymalny prąd oraz ilość celi akumulatora możliwa do obsłużenia. Ze względu na zastosowany w projekcie silnik 200W pracujący na nominalnym napięciu 11,1V wybrany został regulator Dualsky X-Lite 22A pozwalający na swobodną pracę silnika w pełnym zakresie mocy.



Rys. 16 Regulator obrotów Dualsky X-Lite 22A

Źródło: opracowanie obce (25)

2.3.11 Serwomechanizmy

Serwomechanizmy modelarskie podobnie jak regulatory silnika opisane w podpunkcie 2.3.10 sterowane są przy pomocy sygnału PWM (*ang. Pulse Width Modulation*) generowanym przez mikrokontroler kontrolera lotu.

W przedstawionym modelu samolotu zastosowane zostały 3 popularne i łatwo dostępne serwomechanizmy TowerPro MG-90S. Są to małe serwa z metalowymi trybami tym samym pozwalające na osiągnięcie satysfakcjonującego momentu obrotowego wymaganego do odpowiedniego sterowania powierzchniami sterowymi. Dwa z nich umieszczone zostały wewnątrz skrzydeł, natomiast trzecie znajduje się w tylnej części kadłuba. Wychylenie orczyka serwomechanizmu powoduje przesunięcie wózka przymocowanego do rury ogonowej, a następnie do statecznika poziomego tym samym powodując jego wychylenie.



Rys. 17 Serwomechanizm TowerPro MG90S

Źródło: opracowanie obce (26)

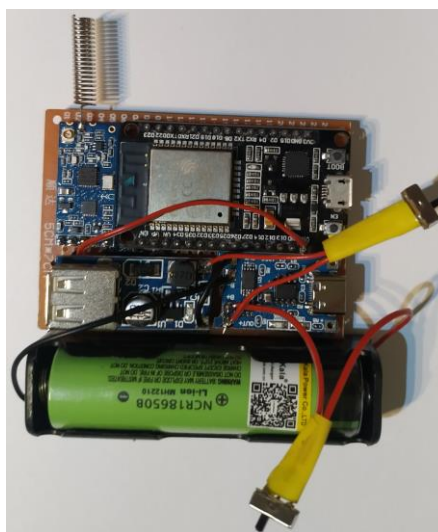
3. Testy systemu

3.1 Testy jednostkowe podzespołów

Pierwszym etapem testowania były testy jednostkowe pojedynczych podzespołów elektronicznych. Każdy z elementów został oddzielnie podłączony i sprawdzony pod aspektem poboru danych. Główną obawą była możliwość niewspółgrania poszczególnych podzespołów, ponieważ prawie wszystkie z nich komunikują się z mikrokontrolerem przy pomocy magistrali I2C. Po sprawdzeniu każdego z elementów oddzielnie kolejno dołączane były kolejne urządzenia, dzięki czemu można było określić, który z nich stanowi problem.

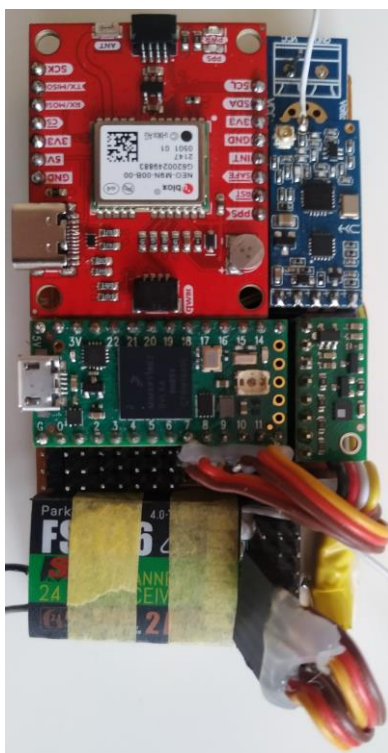
3.2 Platforma testowa

Po testach jednostkowych przygotowane zostały płytki z wlutowanymi wszystkimi modułami oraz wykonanymi odpowiednimi połączeniami elektrycznymi. W przypadku stacji naziemnej płytka może posiadać wystające przewody, ponieważ nie będą one narażone na uszkodzenia mechaniczne, w przeciwieństwie do płytki kontrolera lotu. W przyszłości stworzona zostanie obudowa na płytkę modułu stacji tym samym pozwalając na łatwe przenoszenie jej w plecaku bądź też kieszeni. Poniżej przedstawione zostały zdjęcia gotowych płytek.



Rys. 18 Gotowa płytka stacji naziemnej

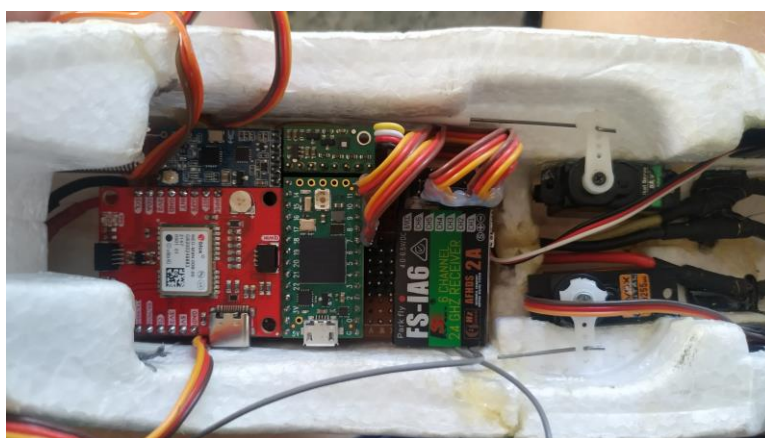
Źródło: opracowanie własne



Rys. 19 Gotowa płytki kontrolera lotu

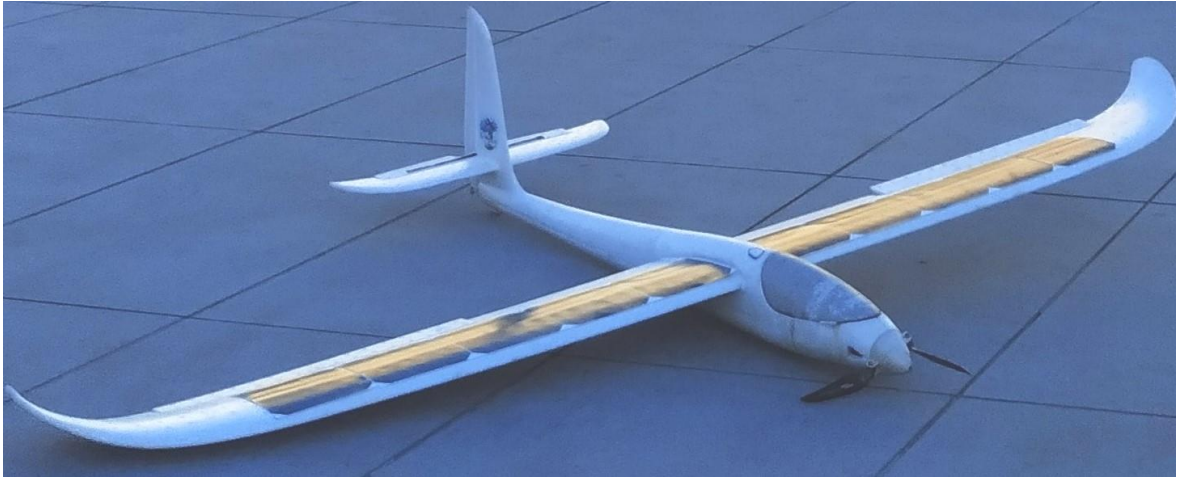
Źródło: opracowanie własne

W celu przetestowania gotowego rozwiązania kontroler umieszczony został w komercyjnym modelu samolotu treningowego Easyglider 4.



Rys. 20 Kontroler umieszczony w kadłubie testowego samolotu

Źródło: opracowanie własne



Rys. 21 Model samolotu Easyglider 4 wykorzystywany podczas testowania kontrolera lotu

Dzięki takiemu rozwiązaniu można było sprawdzić zarówno poprawność działania całego systemu, niezawodność działania systemu komunikacji jak i działanie algorytmu stabilizującego. Niestety wartości parametrów niezbędnych do poprawnego działania algorytmu PID nie są takie same dla modelu testowego i końcowego, przez co ich kalibrację trzeba przeprowadzić oddzielnie dla każdego z nich. Wynika to z różnej budowy, masy oraz wychyleń powierzchni sterowych modeli. Takie rozwiązanie wymaga zmiany tych parametrów dla każdego modelu, dlatego chcąc zbudować platformę uniwersalną trzeba je zawsze korygować.

4. Budowa modelu bezzałogowego statku powietrznego

4.1 Projekt CAD

Pierwszym etapem było przygotowanie modelu w oprogramowaniu do projektowania 3D. Użyty został do tego program Autodesk Fusion 360 na licencji studenckiej. Początkowe parametry samolotu zostały dobrane na bazie doświadczenia w wykonywaniu podobnych modeli w przeszłości. W późniejszym etapie niektóre z elementów samolotu dostosowane zostały odpowiednio, aby pomieścić kontroler i nie zaburzał on właściwości lotnych modelu. Ze względu na swoją masę musiał zostać on umieszczony bezpośrednio pod skrzydłami, aby nie zmieniać środka ciężkości samolotu tak bardzo ważnego dla poprawnego sterowania modelem.

4.2 Proces budowy

Budowa samolotu podzielona została na dwa etapy, pierwszym z nich jest budowa skrzydeł i stateczników, natomiast drugim budowa kadłuba. Wszystkie prace związane z budową modelu wykonane zostały w warsztacie Studenckiego Koła Naukowego AGH Solar Plane.

4.2.1 Budowa skrzydeł samolotu

Skrzydła wykonane zostały w technologii laminowania próżniowego. Pierwszym etapem wykonania było przygotowanie tzw. brytów, czyli form w kształcie skrzydła, które następnie będą laminowane. Formy te wykonane są z polistyrenu ekstrudowanego popularnie nazywanego styrodurem. Odpowiedni kształt nadawany jest przy pomocy plotera termicznego, na którym przy pomocy gorącego drutu wycinany jest profil skrzydła podany przez operatora maszyny.



Rys. 22 Wycinanie profilu skrzydła przy pomocy plotera termicznego

Źródło: opracowanie własne

Kolejnym etapem było przygotowanie umieszczenie niezbędnych przewodów w skrzydłach potrzebnych do sterowania serwomechanizmami odpowiadającymi za poruszanie się lotek oraz przygotowanie materiałów pokryciowych. Ze względu na małą masę całkowitą modelu jako materiał pokryciowy wybrany została tkanina z włókna szklanego, natomiast na dźwigar jednokierunkowa tkanina z włókna węglowego.



Rys. 23 Skrzydła i stateczniki z przygotowanymi materiałami

Źródło: opracowanie własne

Po takim przygotowaniu materiałów oraz brytów można przejść do docelowego procesu, czyli laminowania. Polega ono na pokrywaniu brytów materiałami nasączonymi odpowiednio dobraną żywicą epoksydową. W celu osiągnięcia jak najlepszych parametrów dobrana została żywica z atestem lotniczym L285 i utwardzacz H287. Taka mieszanka pozwala na uzyskanie sporej wytrzymałości przy jednocześnie niskiej masie. Po nasączeniu materiałów należy nałożyć je na mylar, czyli specjalną folię wykorzystywaną przy laminowaniu elementów w celu uzyskania gładkiej i połyskującej powierzchni. Tak przygotowane warstwy należy umieścić w uprzednio przygotowanym worku i uruchomić pompę próżniową. Jest ona niezbędna dla odpowiedniego ściśnięcia poszczególnych warstw kompozytu. Tak przygotowane skrzydła należy odłożyć na 24 godziny pamiętając o ciągłym monitorowaniu poziomu próżni.



Rys. 24 Skrzydła i stateczniki umieszczone w próżni

Źródło: opracowanie własne

Po odczekaniu doby skrzydła można wyjąć i przygotować do dalszej obróbki. W następnym etapie należy skleić prawą i lewą połowę oraz nałożyć w danym miejscu ‘łatę’ węglową wzmacniającą połączenie. W tak przygotowanym skrzydle kolejno należy jeszcze wkleić serwomechanizmy oraz wyciąć odpowiednio powierzchnie sterowe (lotki). Po wykonaniu tych czynności skrzydła są gotowe do lotu.



Rys. 25 Gotowe skrzydła

Źródło: opracowanie własne

4.2.2 Budowa stateczników samolotu

Statecznik pionowy i poziomy zostały wykonane w tej samej technologii, jedyną różnicą jest brak powierzchni sterowych na stateczniku pionowym. Wynika to z dużego stosunku powierzchni lotek do powierzchni skrzydeł. W takim wariancie powierzchnia sterowa na stateczniku pionowym nie jest niezbędna więc została usunięta ze względu na redukcję masy modelu (brak dodatkowego serwomechanizmu i elementów konstrukcyjnych). Stateczniki wycięte zostały z balsy i pokryte warstwą włókna szklanego, zawias wykonany został z tkaniny aramidowej. Balsa często wykorzystywana jest w modelarstwie jako materiał pokryciowy oraz do budowy elementów o skomplikowanym kształcie. Wynika to z jej właściwości takich jak mała masa oraz łatwość w obróbce mechanicznej. Najczęściej po wykonaniu elementu jest on pokrywany warstwą lakieru nitrocelulozowego lub warstwą kompozytu w celu usztywnienia konstrukcji. Drugim z materiałów wykorzystanych przy budowie jest aramid, który jest między innymi materiałem wykorzystywanym przy budowie kamizelek kuloodpornych ze względu na swoją odporność na rozciąganie. W przypadku wykonywania zawiasów w samolocie muszą być one odporne na wielokrotne wychylania i tym samym zużycie, dlatego zostały

one wykonane z tak odpornego materiału. Główna konstrukcja statecznika powleczona została warstwą tkaniny z włókna szklanego nasączonej żywicą. Później podobnie jak poprzednie elementy umieszczona została w próżni na czas utwardzania żywicy epoksydowej. Po czasie niezbędnym do utwardzenia stateczniki zostały przytwierdzone również przy pomocy żywicy epoksydowej do rury ogonowej modelu.



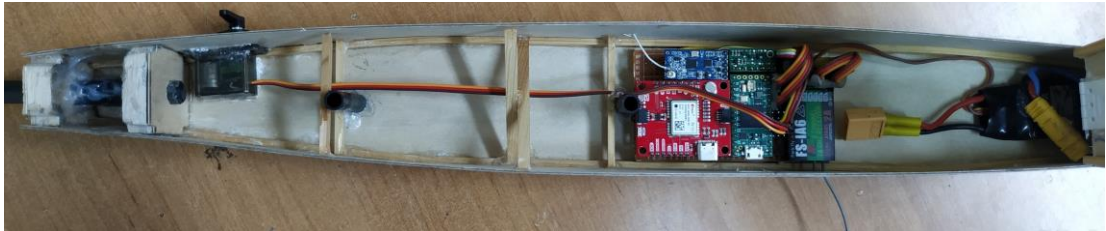
Rys. 26 Gotowy statecznik poziomy i pionowy przymocowane do rury ogonowej

Źródło: opracowanie własne

4.2.3 Budowa kadłuba samolotu

Przy budowie kadłuba głównym aspektem definiującym kształt oraz zastosowane materiały był kształt oraz masa kontrolera. Ze względu na to, że był to największy komponent elektroniczny w samolocie wymogiem było zamontowanie go bezpośrednio pod skrzydłami. Szerokość kadłuba również została dobrana idealnie do szerokości płytki kontrolera. Konstrukcja kadłuba wykonana została ze sklejki lotniczej oraz rurek węglowych służących jako prowadnice dla śrub montujących skrzydła. Rura ogonowa również wykonana została z rury węglowej wklejonej do głównej konstrukcji kadłuba przy pomocy żywicy epoksydowej. Ostatnią częścią kadłuba niezbędną do poprawnego lotu modelu była podstawka pod skrzydła. Jest ona niezbędna w celu osiągnięcia odpowiedniego kąta zaklinowania oraz wzniosu skrzydeł. Ponadto skrzydła muszą być

szttywno zamontowane do kadłuba i nie mogą się poruszać na boki. Podstawka wykonana została z prostopadłościennego kawałka balsy odpowiednio wyprofilowanego do profilu skrzydła. Do tak przygotowanego kadłuba można montować przygotowane komponenty elektroniczne.



Rys. 27 Widok przekroju kadłub ukazujący rozmieszczenie elementów

Źródło: opracowanie własne

Po umieszczeniu wszystkich niezbędnych elementów elektronicznych oraz zamontowaniu górnej części kadłuba i podstawki możliwy jest montaż skrzydeł. Zamontowane są one przy pomocy śrub M4, podkładek i nakrętek samo kontrujących. Tak przygotowany model po podłączeniu akumulatora i uruchomieniu aparatury jest gotowy do lotu.



Rys. 28 Gotowy model samolotu

Źródło: opracowanie własne

5. Napotkane problemy

5.1 Brak dostępności elementów elektronicznych

W wyniku światowych problemów gospodarczych i politycznych rynek półprzewodników jest aktualnie w trudnej sytuacji. Dostępność wielu produktów jest bardzo mocno ograniczona i niejednokrotnie oczekiwanie na elementy trwa kilka lub kilkanaście tygodni. Podobnie było w przypadku dostępności modułu GPS oraz modułu IMU. Moduł IMU z tego względu został zamieniony na podobny innego producenta.

5.2 Brak możliwości testowania w warunkach kontrolowanych

Algorytm PID jest algorytmem wymagającym regulacji. Za poprawną jego pracę odpowiadają 3 parametry i są to współczynniki każdego z 3 członów obliczeniowych. Istnieją metody na wyliczenie odpowiednich parametrów do prawidłowego jego działania, jednak wymaga to testowania przy pojedynczym „wychyleniu” algorytmu i sprawdzenie jego poprawności. W przypadku badania np. wahadła można wychylić je jednokrotnie i pozwolić na działanie algorytmu. Badając zachowanie powierzchni sterowych samolotu potrzeba powietrza nacierającego od przodu samolotu. W przypadku braku rozpędzonej strugi powietrza stery nie wpływają na wychylenie samolotu, a tym samym regulator nie jest w stanie zmienić położenia samolotu. Chcąc zbadać poprawne działanie algorytmu wymagany byłby tunel aerodynamiczny lub inne środowisko, w którym występowałby jedynie wiatr z jednego kierunku. Jest to niezbędne aby wyeliminować przy kalibracji wpływ wiatru i innych czynników zewnętrznych. Niestety ze względu na brak specjalistycznej platformy badawczej testowanie w warunkach laboratoryjnych nie było możliwe w trakcie tego opracowywania tego projektu.

6. Możliwości rozwoju

6.1 Programowe rozszerzenie funkcjonalności

Oprogramowanie, w które wyposażony został kontroler może zostać rozbudowane o wiele możliwości. Głównym celem rozwoju może być zastosowanie sztucznej inteligencji w celu obierania optymalnej trasy między wyznaczonymi punktami na mapie. W aktualnej konfiguracji kontroler nie posiada trybu poruszania się pomiędzy zaznaczonymi punktami, w przypadku zaimplementowania takiej funkcjonalności model mógłby sam poruszać się po wybranej trasie. Drugim trybem związanym ze sztuczną inteligencją jest możliwość powtarzania trasy wykonanej przez użytkownika. W takim trybie po pierwszym przelocie wykonanym przez pilota dron miałby za zadanie wykonać bliźniaczą trasę. Kontroler wyposażony w taką funkcjonalność nie tylko musiałby powtórzyć ruchy pilota, ale również wziąć korektę na aktualnie występujący wiatr.

Innym rozszerzeniem funkcjonalności byłoby dodanie możliwości sterowania wielowirnikowca. Różnią się one sposobem sterowania oraz poruszania, tym samym zmieniając działanie algorytmu sterowania oraz stabilizacji. Posiadając taką funkcjonalność można wprowadzić kolejne usprawnienia dotyczące typowo wielowirnikowców takie jak m.in. obsługa gimbału w przypadku drona wyposażonego w kamerę. Wymagałoby to zastosowania silników krokowych do obsługi wychyłu kamery oraz zaimplementowania algorytmu stabilizacji dla nich. Stabilizacja mechaniczna kamery odpowiada w sporym stopniu za wartość danego drona video, nie raz bardziej niż wielkość matrycy, dlatego jest to wymagające rozszerzenie funkcjonalności.

Kolejnym z rozszerzeń funkcjonalności dotyczących oprogramowania jest dodanie możliwości konfiguracji dodatkowych kanałów z poziomu aplikacji na telefonie. System telemetryczny wyposażony jest w komunikację obustronną tym samym otwierając możliwość na sterowanie drona przy pomocy telefonu. Posiadając dodatkowe kanały można sterować dowolnym dodatkowym urządzeniem dołączonym do drona. Najczęściej w przypadku takiej implementacji wykorzystuje się sterowanie systemem zrzutu, świecenie oświetlenia na wybrany kolor lub sterowanie nachyleniem kamery, jeśli dron jest w taką wyposażony.

6.2 Sprzętowe rozszerzenie funkcjonalności

Niewątpliwą zaletą kontrolera wyposażonego w otwarte oprogramowanie jest możliwość programowania nowych funkcji, nie można jednak zapomnieć o tym, że dzięki takim możliwościom możliwa jest też rozbudowa sprzętowa.

Z pewnością jedną z podstawowych możliwości rozwoju jest zainstalowanie w skrzydle rurki pitota, czyli czujnika prędkości wiatru. Czujnik ten składa się z dwóch rurek i obliczając różnicę ciśnień jest w stanie określić prędkość struga powietrza. Przy pomocy takiego czujnika można w znaczny sposób zoptymalizować zużycie energetyczne oraz zwiększyć dokładność lotów w trybie autonomicznym. W aktualnej konfiguracji samolot może wyliczać swoją prędkość jedynie przy pomocy GPS więc jest to prędkość względem terenu. Przy takim pomiarze prędkości niemożliwa jest implementacja samoczynnego szybowania samolotu.

Kolejnym rozszerzeniem funkcjonalności jest wybór aparatury sterującej z większą ilością kanałów sterujących. Podobnie jak w punkcie 6.1 podana została informacja o możliwości sterowania kanałami kontrolera z poziomu aplikacji tak w tym przypadku sygnał przekazywany byłby sprzętowo z nadajnika do odbiornika tym samym zwiększając możliwości operatora. Odbierany sygnał PWM mógłby następnie być przekazywany do jednostki sterującej, która uruchamiałaby odpowiednie funkcjonalności lub komponenty zewnętrzne.

6.3 Optymalizacja sprzętowa

Optymalizacja sprzętowa oznacza poprawę parametrów modelu bez zmiany jego funkcjonalności. W tym przypadku największą możliwą optymalizacją jest wymiana systemu radiowego oraz telemetry na modele o większym zasięgu. W przypadku telemetry popularnym rozwiązaniem jest stosowanie nadajników i odbiorników korzystających z pasma 868MHz. Egzemplarze te osiągają nawet do 50 km zasięgu w otwartym terenie tym samym pozwalając na loty autonomiczne na znaczne odległości bez konieczności posiadania aparatury sterującej. Drugą możliwością optymalizacji byłaby wymiana aparatury sterującej na model o odpowiednio większym zasięgu, niektóre z nich potrafią osiągnąć zasięg kilku kilometrów.

7. Podsumowanie i wnioski

7.1 Podsumowanie wykonanych prac

W ramach przedstawionego projektu wykonana została płytki elektroniczna kontrolera samolotu oraz stacji naziemnej wraz z autorskim kodem w obu tych komponentach. Zaprojektowana została również aplikacja na telefon pozwalająca na monitorowanie oraz zmianę niektórych parametrów konfiguracyjnych modelu. Ponadto zaprojektowany oraz zbudowany został model samolotu o rozpiętości 1,5m oraz długości równej 1,25m. Zamontowana została w nim również elektronika niezbędna do prawidłowej pracy modelu, natomiast niebędąca częścią kontrolera. Kontroler został przetestowany w komercyjnym modelu testowym, natomiast model samolotu wykonany w ramach projektu został przetestowany pod względem poprawnej pracy własnej. Przez długotrwale utrzymujące się złe warunki atmosferyczne wykonany model samolotu wraz z działającym kontrolerem lotu nie został przetestowany w warunkach terenowych.

7.2 Kosztorys oraz porównanie z produktami komercyjnymi

Kontroler lotu został zbudowany z części zakupionych w internetowych sklepach elektronicznych. Podane ceny są cenami aktualnymi na dzień 22.12.2022. Kosztorys kontrolera lotu jest następujący:

Komponent	Cena [zł]
Mikrokontroler	149,00
Moduł GPS	449,00
Moduł IMU	79,00
Moduł nadawczo-odbiorczy 433MHz	22,45
Moduł barometru	59,90
Moduł pomiaru napięcia	3,30
Buzzer	1,90
Suma	764,55

Tab. 1 Kosztorys kontrolera lotu

Źródło: opracowanie własne

Obecnie w sklepach występuje niewielki wybór kontrolerów bezzałogowych statków powietrznych o podobnych parametrach. Większość z nich oferuje możliwość sterowania wielowirnikowcami, natomiast liczba kontrolerów dla samolotów jest ograniczona. Produktem o najbliższej charakterystyce jest The Orange Cube Standard

ADS-B. (27) Jest to kontroler o znacznie wyższej cenie stanowiącej 2649 zł (stan na dzień 22.12.2022) tym samym będąc ponad 3-krotnie droższym od zaproponowanego rozwiązania, jednak wynika to z wyższej dokładności działania oraz jakości wykonania. Posiada on możliwość sterowania zarówno samolotami jak i wielowirnikowcami. Atutem wykonanego kontrolera z pewnością jest oprogramowanie *open-source*, które można modyfikować o kolejne funkcjonalności, również te, których konkurencyjny kontroler nie posiada.

7.3 Wnioski

Przedstawiony w tym projekcie kontroler oraz model są dobrą tanią alternatywą dla gotowych rozwiązań komercyjnych. Poprzez zastosowanie mikrokontrolera możliwe jest opracowanie oraz rozwój oprogramowania na własne potrzeby, tym samym stanowiąc obszerną platformę bazową. Zarówno model samolotu jak i kontroler poprzez zmiany w komponentach może mieć różne zastosowania takie jak np. treningowe, militarne lub humanitarne. Bezzałogowe statki powietrzne zyskują co raz większą popularność przez ostatnie lata tym samym stanowiąc co raz większe znaczenie w rozwoju przemysłu, gdzie opracowywanie autorskich kontrolerów może być łatwym sposobem na sprzedaż własnego produktu.

A. Kod źródłowy aplikacji

Kod źródłowy aplikacji kontrolera jak i stacji naziemnej znajduje się na repozytorium zdalnym pod linkiem:

https://github.com/FilipPieniazek/praca_inzynierska/tree/main/oprogramowanie

B. Bibliografia

- [1]. **Szutowski Lech. 2007.** *Budowa i pilotaż samolotów lekkich: przewodnik pilota i instruktora*. Poznań : Avia-Test, 2007. ISBN 978-83-919779-3-4.
- [2]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.]
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c1/Yaw_Axis_Corrected.svg.
- [3]. **Bielawski Radosław. 2015.** *WYBRANE ZAGADNIENIA Z BUDOWY STATKÓW POWIETRZNYCH. Definicje, pojęcia, klasyfikacje*. Warszawa : Wydawnictwo Akademii Obrony Narodowej, 2015. ISBN 978-83-7523-428-2.
- [4]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>.
- [5]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-szczegolna/5299-kategoria-szczegolna>.
- [6]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq/494-kategoria-certyfikowana/5531-kiedy-moj-lot-kwalifikuje-sie-do-kategorii-certyfikowanej>.
- [7]. **Brzózka Jerzy. 2004.** *Regulatory i układy automatyki*. Warszawa : Wydawnictwo Mikom, 2004. ISBN 83-7279-380-8.
- [8]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://appinventor.mit.edu/>.
- [9]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.arduino.cc/en/software>.
- [10]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>.
- [11]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.]
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [12]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://kamami.pl/43642-large_default/plytka-rozwojowa-z-modulem-wifi-i-bt-42-esp-wroom-32-zgodna-z-esp32-devkit.jpg.
- [13]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://learn.sparkfun.com/tutorials/sparkfun-gps-neo-m9n-hookup-guide?_ga=2.57670186.1258094695.1609748416-2040463034.1609166845#introduction.

- [14]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://wiki.seeedstudio.com/Grove-IMU_9DOF_v2.0/.
- [15]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://cdn1.botland.com.pl/105838-large_default/grove-imu-9dof-v20-3-osiowy-akcelerometr-zyroskop-i-magnetometr-i2cspi.jpg.
- [16]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://statics3.seeedstudio.com/assets/file/bazaar/product/HC-12_english_datasheets.pdf.
- [17]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.pololu.com/product/2867>.
- [18]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://kamami.pl/268-large_default/kpt1410-glosnik-piezo-buzzer.jpg.
- [19]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://static1.squarespace.com/static/5bc852d6b9144934c40d499c/t/5c0787e10e2e721a7f17c998/1543997593953/FS-i6+User+manual+20160819.pdf>.
- [20]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://imgaz2.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/13/D3/e1e67934-711f-4a17-83ed-2e85039398c2.jpg>.
- [21]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.tme.eu/pl/news/library-articles/page/44880/silnik-bezszczotkowy-budowa-dzialanie-i-mocne-strony/>.
- [22]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://www.elkjop.no/image/dv_web_D180001002198784/21043/dualsky-eco-2308c-v2-1500kv-47gram--pdp_zoom-3000--pdp_main-540.jpg.
- [23]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.gimmik.net/blog/dobor-regulatora-obrotow-silnika-esc-modeli-rc/>.
- [24]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://www.gimmik.net/blog/stabilizatory-napięcia-układy-bec/>.
- [25]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] https://www.marvio-rc.pl/img/9570/__.jpg.
- [26]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.] <https://nastik.pl/wp-content/uploads/2021/10/MG90S.JPG>.

[27]. [Online] [Zacytowano: 22 12 2022.]

https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/cubepilot_cube_orange.html.

C. Spis ilustracji

Rys. 1 Układ odniesienia związany z samolotem. Źródło: opracowanie obce (2)	6
Rys. 2 Schemat ideowy projektowanego systemu Źródło: opracowanie własne	12
Rys. 3 Schemat budowy kontrolera lotu Źródło: opracowanie własne	13
Rys. 4 Schemat budowy stacji naziemnej Źródło: opracowanie własne	14
Rys. 5 Mikrokontroler Teensy 4.0 Źródło: opracowanie własne	18
Rys. 6 Mikrokontroler ESP32-DEV Źródło: opracowanie obce (12)	19
Rys. 7 Moduł GPS Sparkfun NEO-M9N Źródło: opracowanie własne	20
Rys. 8 Moduł IMU Grove 9DoF IMU Źródło: opracowanie obce (15)	21
Rys. 9 Moduł nadawczo-odbiorczy HC-12 Źródło: opracowanie własne	21
Rys. 10 Moduł wysokościomierza Pololu LPS-25HB Źródło: opracowanie własne	22
Rys. 11 Buzzer Źródło: opracowanie obce (18)	23
Rys. 12 Aparatura sterująca FlySky FS-I6 Źródło: opracowanie obce (20)	24
Rys. 13 Akumulator litowo-polimerowy Źródło: opracowanie własne	25
Rys. 14 Akumulator litowo-jonowy Źródło: opracowanie własne	25
Rys. 15 Silnik Dualsky ECO2308C V2 Źródło: opracowanie obce (22)	27
Rys. 16 Regulator obrotów Dualsky X-Lite 22A Źródło: opracowanie obce (25)	28
Rys. 17 Serwomechanizm TowerPro MG90S Źródło: opracowanie obce (26)	28
Rys. 18 Gotowa płytki stacji naziemnej Źródło: opracowanie własne	29
Rys. 19 Gotowa płytki kontrolera lotu Źródło: opracowanie własne	30
Rys. 20 Kontroler umieszczony w kadłubie testowego samolotu Źródło: opracowanie własne	30

Rys. 21 Model samolotu Easyglider 4 wykorzystywany podczas testowania kontrolera lotu	31
Rys. 22 Wycinanie profilu skrzydła przy pomocy plotera termicznego Źródło: opracowanie własne.....	33
Rys. 23 Skrzydła i stateczniki z przygotowanymi materiałami Źródło: opracowanie własne	33
Rys. 24 Skrzydła i stateczniki umieszczone w próżni Źródło: opracowanie własne.....	34
Rys. 25 Gotowe skrzydła Źródło: opracowanie własne.....	35
Rys. 26 Gotowy statecznik poziomy i pionowy przymocowane do rury ogonowej Źródło: opracowanie własne	36
Rys. 27 Widok przekroju kadłub ukazujący rozmieszczenie elementów Źródło: opracowanie własne	37
Rys. 28 Gotowy model samolotu Źródło: opracowanie własne	37