Wiedza i doświadczenie projektowe wizytówką absolwenta kierunku automatyka i robotyka na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej

POKL.04.01.02-00-020/10

Program Operacyjny Kapitał Ludzki współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego

---

Gliwice, 25.II.2013 r.

Międzywydziałowe Koło Naukowe High Flyers
Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki
Kierunek Automatyka i Robotyka

dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. nzw. w Politechnice Śląskiej
Koordynator Projektu POKL.04.01.02-00-020/10

Raport z realizacji projektu:

Quadrotor I

Zespół projektowy:

Oliver Kurgan **(lider projektu)**		Marcin Janik (konsultant projektu)	
Jacek Kałuża		Dawid Łapiński	
Patryk Nocoń		Tomasz Konrad	
Kamil Wencel			
Podpis opiekuna Koła Naukowego			

1. Opis projektu

1.1. **Cel projektu**: Zaprojektowanie i wykonanie prototypu uniwersalnego systemu sterowania wielowirnikowcem.

1.2. **Założenia projektowe**: Zapoznanie się z istniejącymi rozwiązaniami w zakresie budowy i sposobu sterowania wielowirnikowców. Gruntowne przetestowanie zestawu sensorów inercyjnych i odległościowych. Zaprojektowanie i zbudowanie od podstaw układu zdolnego do wykonywania lotów z użyciem aparatury RC. System ma być zdolny do przesyłania wizji w czasie rzeczywistym oraz do utrzymywania wysokości bez ingerencji pilota. Dodatkowo jednostka sterująca ma być kompatybilna z systemem stacji kontroli naziemnej tworzonym w ramach innego projektu.

1.3. **Oczekiwane wyniki**: Wynikiem przeprowadzonych prac ma być w pełni funkcjonalny prototyp systemu sterowania zdolny do autonomicznego, stabilnego utrzymywania zadanej wysokości i pozycji oraz przesyłania obrazu w czasie rzeczywistym do naziemnej stacji kontroli dzięki nowatorskiemu systemowi wizyjnemu.

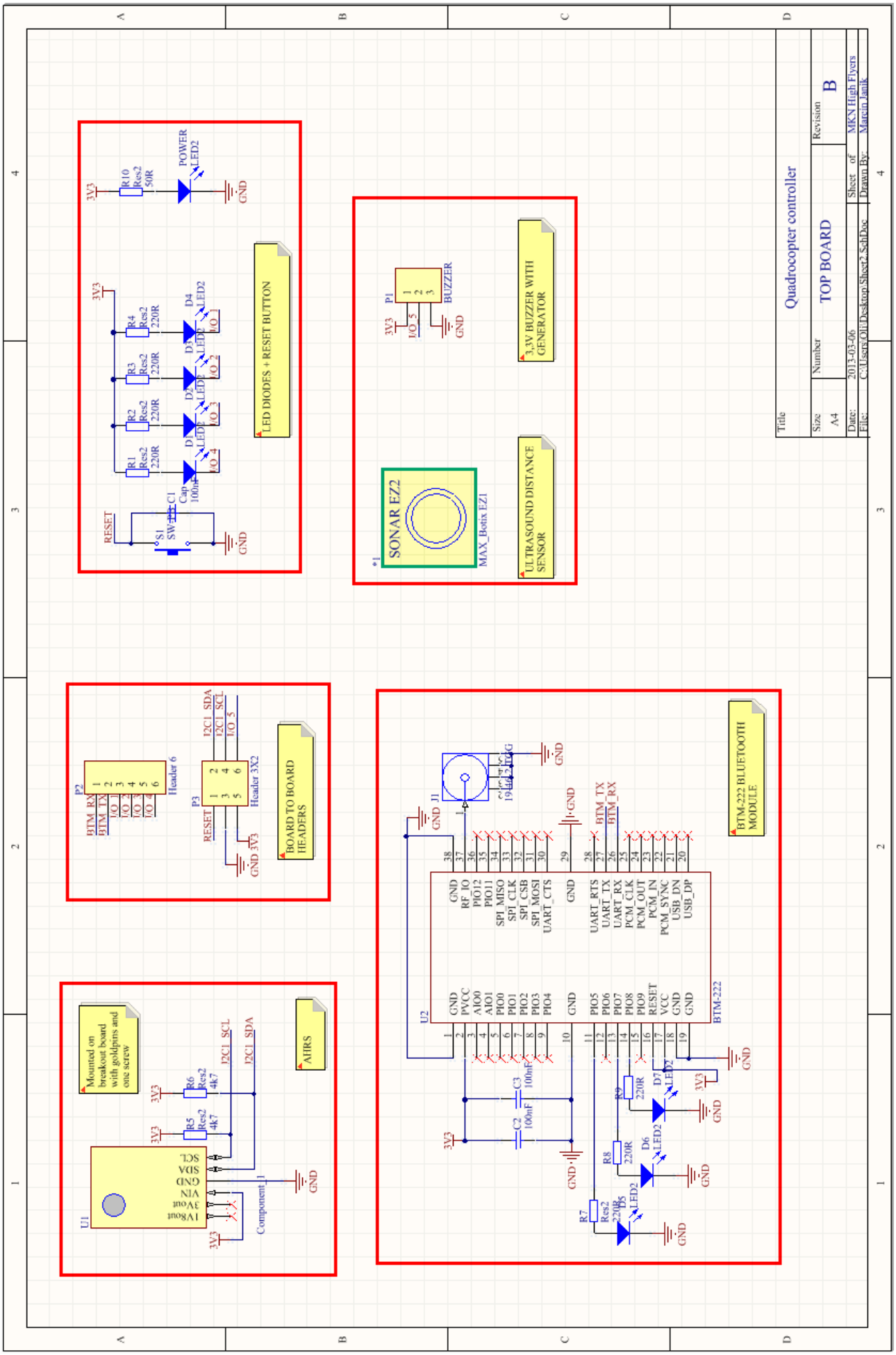
1.4. **Ocena ryzyka projektu**: Zakładając realizację projektu przez osoby o różnym stopniu zaznajomienia ze specjalistycznym sprzętem, istnieje ryzyko związane z uszkodzeniem platformy latającej oraz niektórych elementów elektronicznych. Uwzględniając natomiast dotychczasowe zaangażowanie uczestników projektu w ramach prac w strukturach koła naukowego, ich ogólną chęć poszerzania wiedzy, dodając do tego ścisłą współpracę z opiekunami naukowymi oraz konsultantami projektu, można określić ryzyko niezrealizowania celów projektowych za minimalne.

2. Przebieg prac projektowych

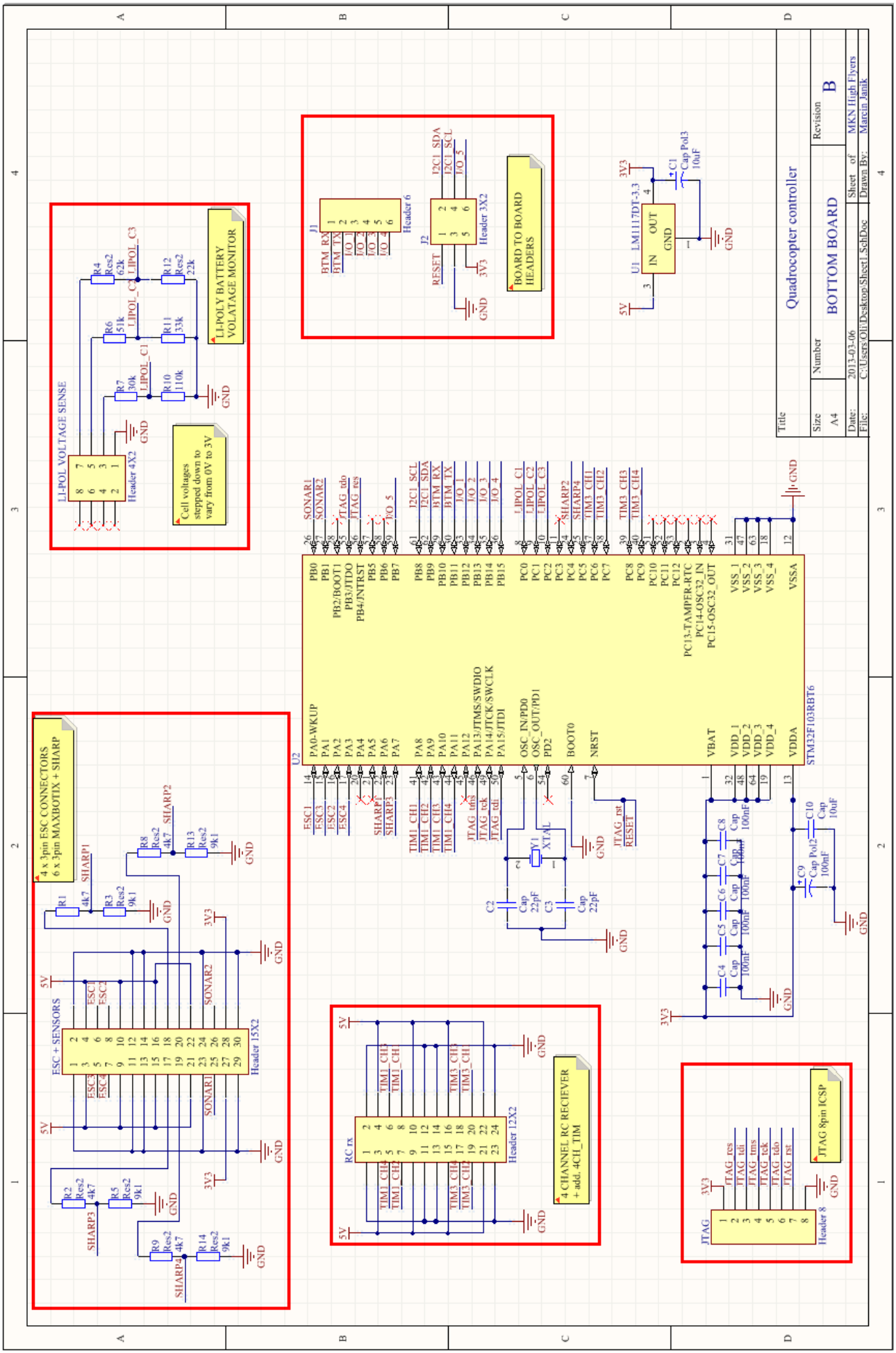
W pierwszym etapie prac został zaprojektowany kontroler lotu (*ang. flight controler*) odpowiedzialny za przetwarzanie informacji pobieranych z czujników oraz odpowiednie regulowanie pracy silników w celu stabilizowania lotu platformy oraz zapewnienia jej prawidłowej reakcji na położenie zadane przez pilota. Projektowany kontroler powinien integrować wszystkie elementy niezbędne do lotu:

- Jednostka centralna – została zbudowana z mikrokontrolera STM32F103 wyposażonego w rdzeń Cortex-M3,
- Moduł komunikacji radiowej - bluetooth BTM-222,
- Czujnik określający położenie platformy w przestrzeni,

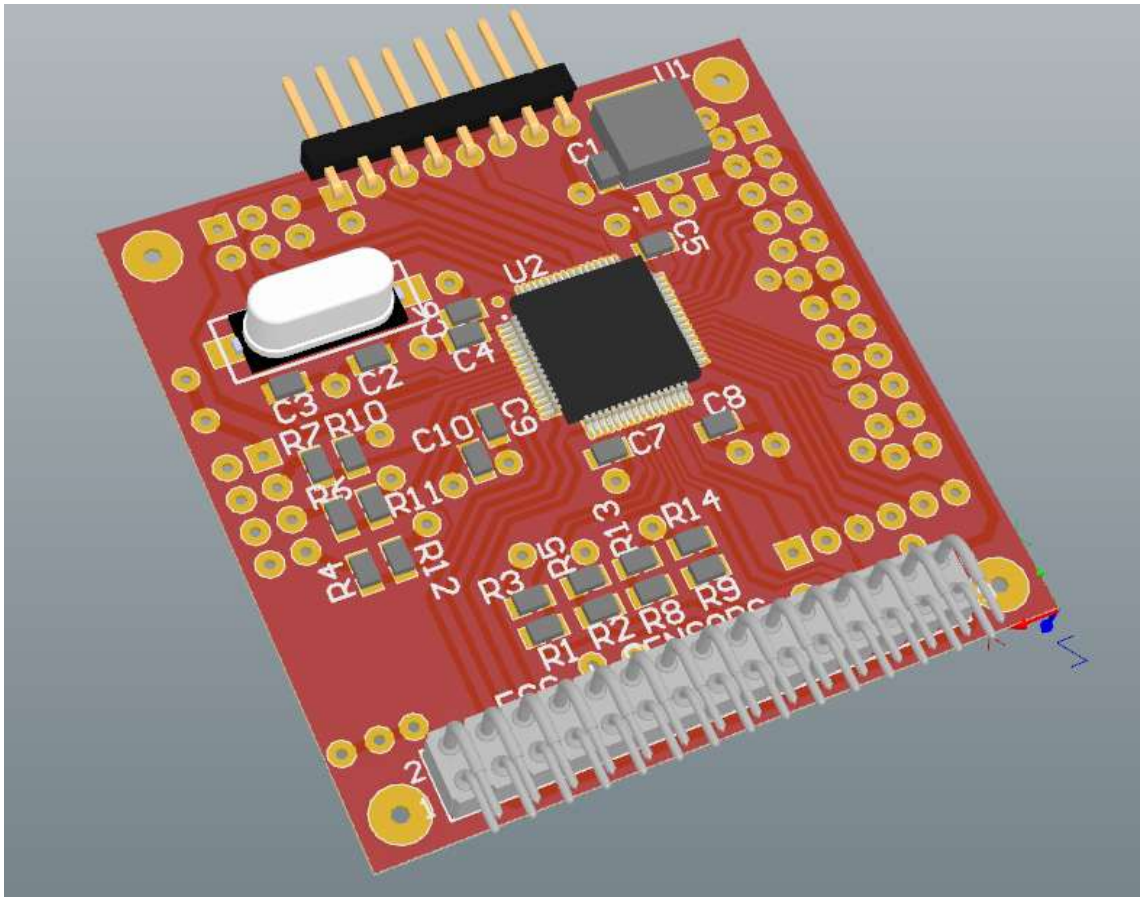
oraz szereg wejść i wyjść, do których można podłączyć regulatory obrotów oraz peryferia takie jak odbiornik. Do zaprojektowania obwodu drukowanego użyto wyspecjalizowanego oprogramowania typu EDA (*ang. Electronic Design Automation*). Zdecydowano się na konstrukcję modułową – całość składa się z dwóch płytek umieszczonych jedna nad drugą. Takie rozwiązanie pozwoliło ograniczyć powierzchnię zajmowaną przez projektowany kontroler oraz zapewniło separację jednostki głównej od peryferii. Poniżej przedstawiono model 3D zaprojektowanego układu.



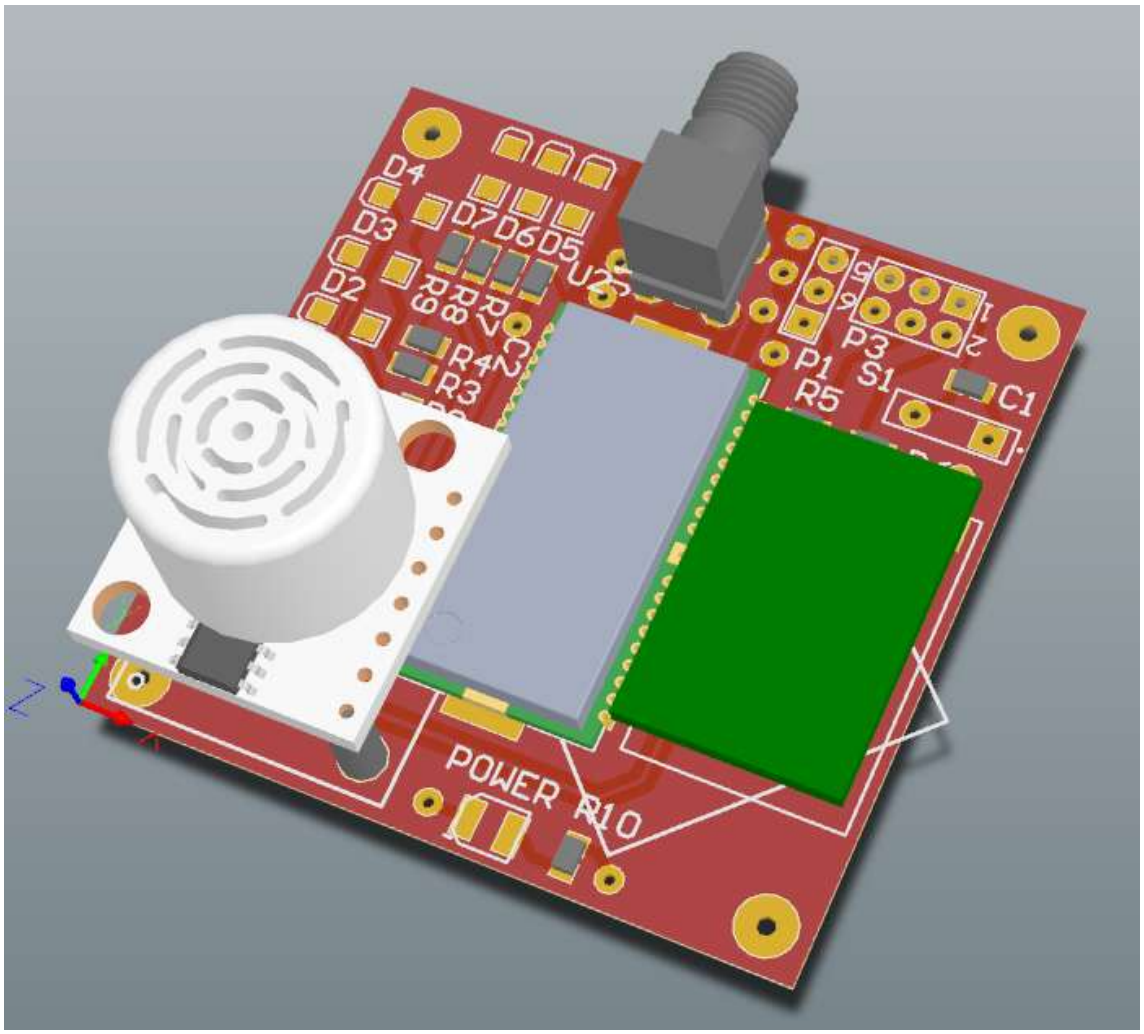
Fot. 1 – Schemat górnego obwodu drukowanego.



Fot 2. – Schemat dolnego obwodu drukowanego.



Fot. 3 - Moduł zawierający jednostkę centralną kontrolera.



Fot. 4 - Moduł zawierający peryferia kontrolera.

Za określenie orientacji platformy w przestrzeni odpowiedzialny jest moduł AHRS, czyli urządzenie dostarczające informacji o położeniu przestrzennym obiektu względem Ziemi. Informacją zwrotną są kąty przechylenia, pochylenia oraz kurs magnetyczny. Tego rodzaju pomiar umożliwia fuzja trzech czujników trójosiowych typu MEMS: akcelerometr, magnetometr i żyroskop. W ten sposób otrzymujemy dziewięcioosiowy układ pomiarowy. Stanowi on podstawę wydajnego filtru położenia.

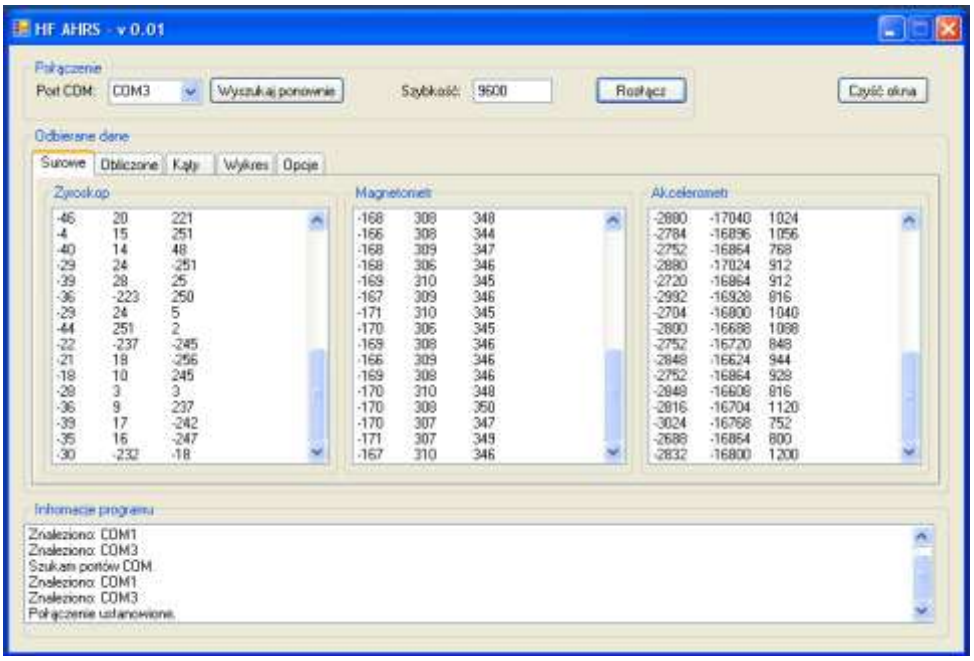
Akcelerometr dokonuje pomiaru przyspieszenia stycznego, dzięki czemu można w stosunkowo łatwy sposób dokonać pomiaru odchylenia od pionu. Można wówczas otrzymać kąty Roll oraz Pitch. Za pomocą magnetometru można wyznaczyć kąt odchylenia Yaw. Niestety cechą charakterystyczną akcelerometru oraz magnetometru są stosunkowo duże szumy pomiarowe. Żyroskop natomiast dostarcza informacje na temat prędkości obrotowej. Podobnie jak akcelerometr posiada wadę. Jest nią pojawiające się zjawisko dryftu, które pogarsza dokładności pomiarowe owego sensora. Zatem zastosowanie trzech czujników do obliczenia wartości odchyleń kątowych nie gwarantuje wystarczającej redukcji błędu pomiarowego.

W ramach prac nad platformą latającą implementowany i testowany był algorytm filtracji Kalmana, który pozwala poprawić wyniki pomiarów poprzez redukcję szumów magnetometru i akcelerometru oraz korekcję dryftu żyroskopu wynikającą z procesu całkowania prędkości kątowych.

Jako platformę testową wybrano moduł MinIMU-9 zawierający 3-osiowy akcelerometr, 3-osiowy magnetometr oraz 3-osiowy żyroskop. Interfejsem komunikacyjnym jest magistrala I^2C.

Komunikację pomiędzy czujnikiem a komputerem PC oraz proces filtracji realizuje mikrokontroler ATMega32A firmy Atmel. Zdecydowano się wybrać mikrokontroler o pamięci flash 32 kB. Wynika to z faktu, iż zastosowany filtr wymaga dużej ilości operacji na rozbudowanych macierzach. Działania te są wykonywane przy każdorazowym odczycie, więc zastosowanie słabszego mikrokontrolera mogłoby przyczynić się do pogorszenia sprawności pomiarów dokonywanych przez czujniki lub całkowicie je uniemożliwić.

Wykorzystany został także program z poprzedniego projektu, wzbogacony o kilka zakładek ukazujących dane pomiarowe po ich przetworzeniu, odbierający wyniki pomiarów dokonywanych przez moduł MinIMU-9, a następnie generujący na ich podstawie wykresy.

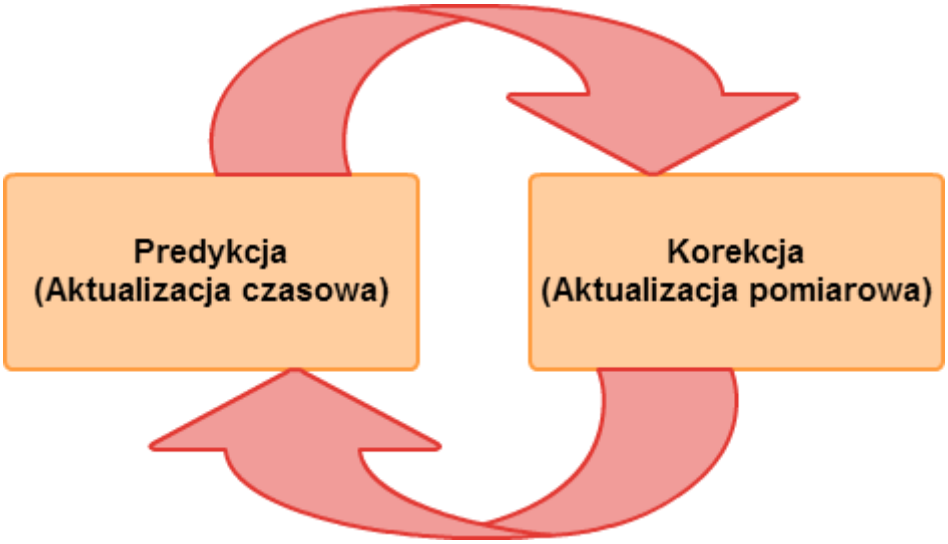


Fot. 5 – Aplikacja wyświetlająca dane z czujnika.

Dane pomiarowe odczytywane dla każdej osi bezpośrednio z akcelerometru, magnetometru oraz żyroskopu składają się z dwóch liczb jedno bajtowych typu bez-znakowego. W celu poprawnego przetwarzania danych pomiarowych należy w poprawny sposób przetworzyć te liczby na jedną liczbę typu znakowego. Aby zapewnić możliwość działań na liczbach rzeczywistych jednocześnie nie wykorzystując zmiennych rzeczywistych typu float czy double zaimplementowano proste procedury do działań arytmetycznych stałopozycyjnych. Zastosowanie arytmetyki stałopozycyjnej wynika z faktu, iż mikrokontrolery ATMega zostały zoptymalizowane pod działania na liczbach całkowitych. Każde działanie na liczbach typu zmiennoprzecinkowego powoduje znaczący wzrost wykorzystywanej pamięci operacyjnej mikrokontrolera, co negatywnie wpływa na szybkość przetwarzania danych pomiarowych.

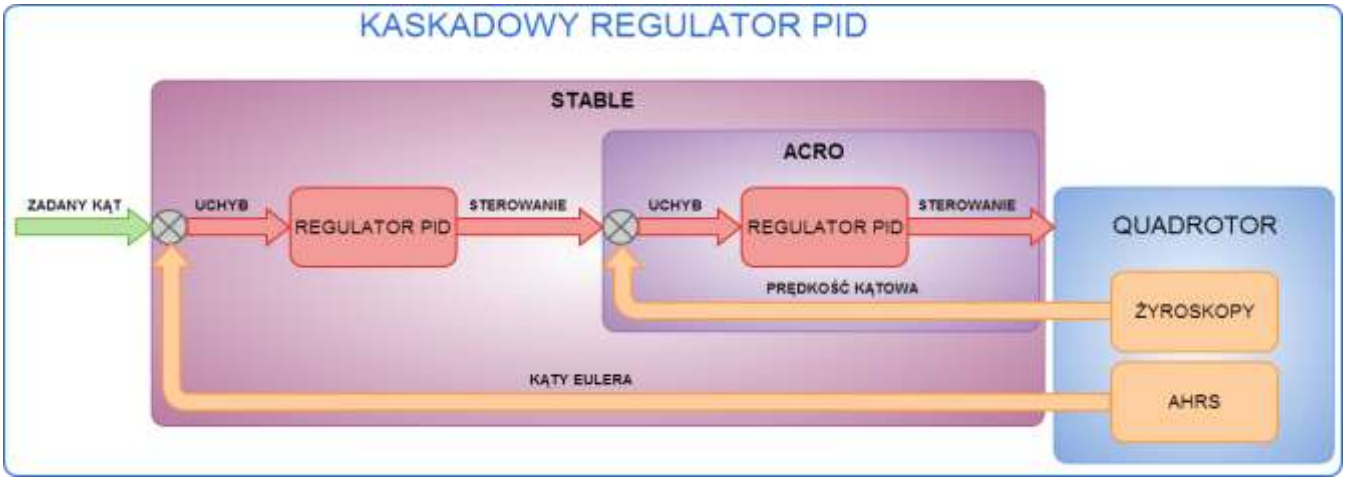
Filtr Kalmana jest dwufazowym rekursywnym algorytmem.

- Pierwsza faza nazywana predykcją składa się z równań, które nazywane są aktualizacją czasową. W trakcie owej fazy bazując na stanie z poprzedniego kroku wyznacza się estymowaną wartość stanu x oraz jego kowariancję P. Są to wartości a priori.
- Druga faza nazywana korekcją składa się z równań, które nazywane są aktualizacją pomiarową. Pomiar w drugiej fazie umożliwia wyznaczenie a posteriori dla stanu x oraz jego kowariancji P.



Fot. 6 – Schemat funkcjonalny algorytmu filtracji Kalmana.

Kolejnym etapem prac było opracowanie algorytmu sterowania regulującego pracę silników bezszczotkowych za pomocą regulatorów obrotów sterowanych sygnałem PWM (*ang. Pulse Width Modulation*) o częstotliwości 50 Hz. Wartości przechylenia, pochylenia, kurs magnetyczny oraz prędkości kątowe są pobierane z modułu AHRS. Na podstawie tych danych oraz wartości zadanej odczytywanej z odbiornika sparowanego z aparaturą modelarską obliczone zostaje sterowanie. Zdecydowano się na implementację kaskadowego regulatora PID. Wewnętrzna pętla regulacji operuje na danych z żyroskopu, natomiast zewnętrzna na danych z akcelerometru. Takie rozwiązanie daje dobre efekty oraz jest łatwe w implementacji na mikrokontrolerze. Poniżej przedstawiono schemat funkcjonalny zaimplementowanego regulatora.

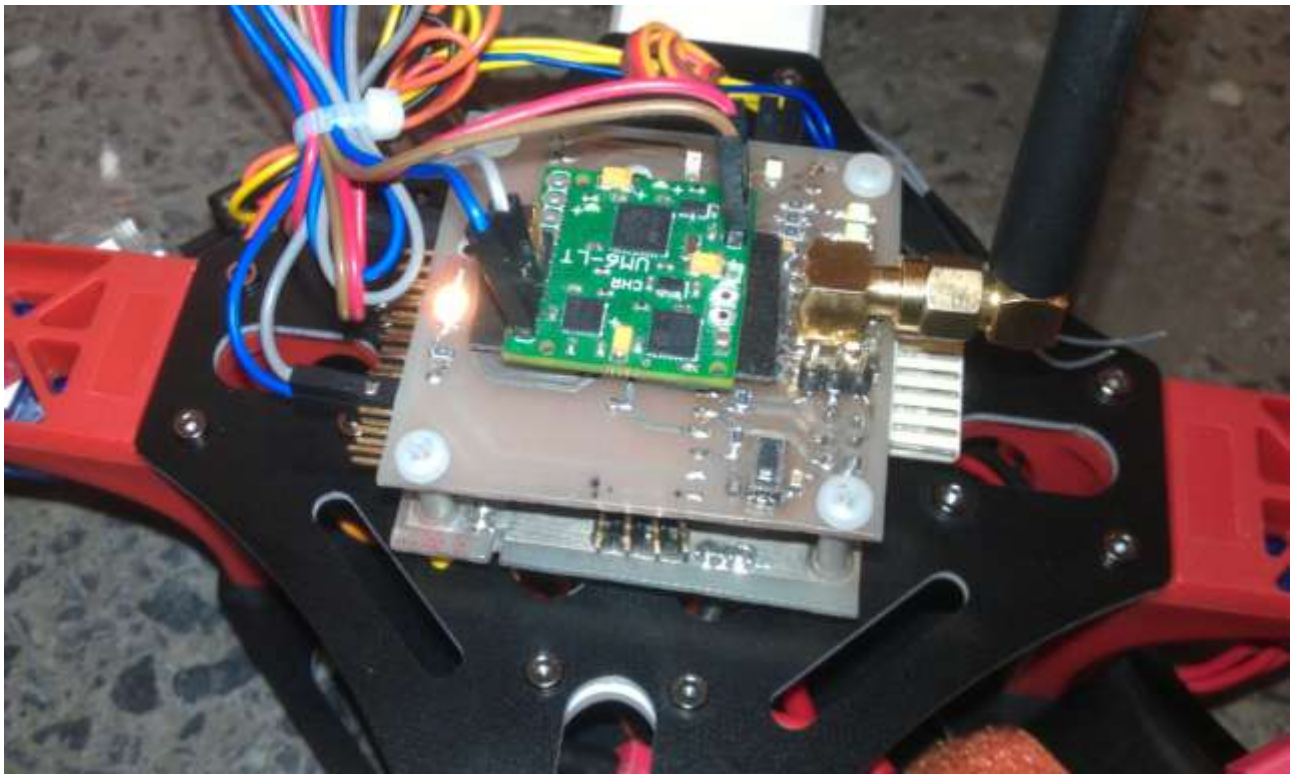


Fot. 7 – Schemat blokowy kaskadowego regulatora PID.

Na schemacie zaznaczone są dwa tryby pracy kontrolera. Tryb „ACRO”, czyli tzw. tryb akrobacyjny operuje tylko na danych z żyroskopu. Z punktu widzenia pilota sprowadza się to do tego, że wychylając drążek położenia w danej osi (roll lub pitch) zadawana jest prędkość obracania się platformy, a nie jej położenie, co ma miejsce w trybie „STABLE”, czyli trybie stabilnym. W trybie akrobatycznym możliwe jest wykonywanie ewolucji, które wymagają odwrócenia platformy w powietrzu. Tryb stabilny wprowadza ograniczenie przechyłu platformy do 90° względem poziomu.

Kolejnym etapem prac było zamontowanie układu kontrolera lotu oraz niezbędnego osprzętu – modułu AHRS, regulatorów obrotów i trójfazowych silników bezszczotkowych na ramie wykonanej z włókna szklanego oraz lekkiego, odpornego na uszkodzenia tworzywa sztucznego i wykonanie testów platformy.

Kontroler wraz z czujnikiem AHRS został umieszczony na środku ramy, a regulatory obrotów na ramionach, bardzo blisko środka w celu skupienia masy w centralnym punkcie platformy. Na końcu każdego ramiona umieszczony jest silnik bezszczotkowy wraz z śmigłami. Ciąg generowany przez zestaw czterech silników jest odpowiednio dobrany do masy platformy w celu zapewnienia optymalnego czasu lotu. Poniżej przedstawiono zdjęcia zmontowanej platformy.

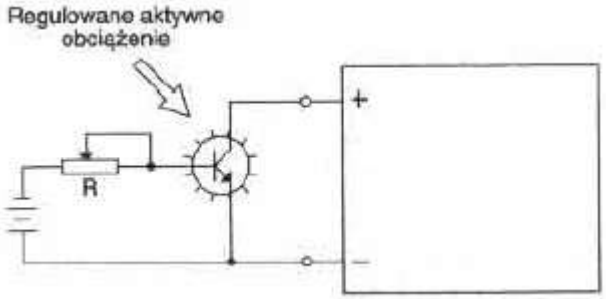


Fot. 8 – Kontroler lotu zamontowany na ramie.

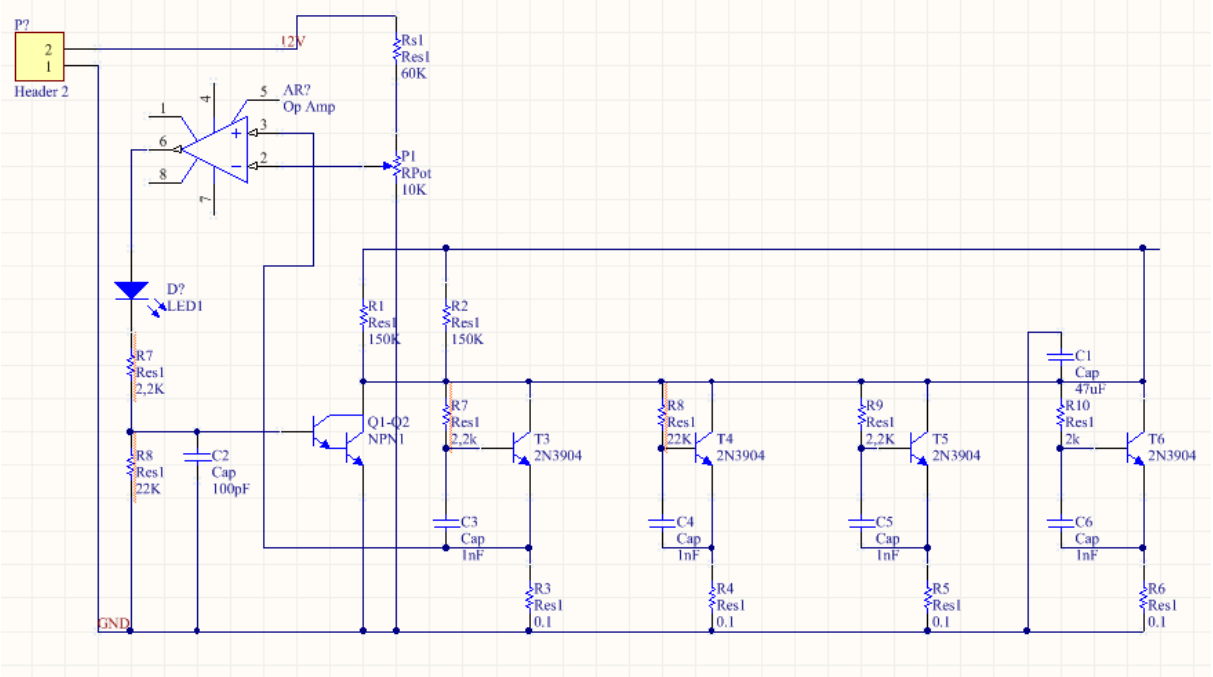
Fot. 9 – Złożony prototyp.

Dodatkowo równolegle z pracami nad quadrotorem opracowywany był system aktywnego obciążenia, który miał posłużyć do testowania baterii używanych do zasilania awioniki i napędu platformy. W ramach tego podprojektu został opracowany prototyp urządzenia obciążającego oraz mikroprocesorowy woltomierz, który monitorował napięcie na wszystkich komórkach baterii, co pozwoliło na dokładne poznanie charakterystyki jej rozładowania. Takie urządzenie daje możliwość nie tylko doboru najbardziej odpowiedniego pakietu do zasilania platformy, ale także pozwala na monitorowanie kondycji baterii poprzez okresowe badanie jej charakterystyki.

Zaletą obciążenia aktywnego w stosunku do zwykłego obciążenia rezystorowego jest możliwość płynnej regulacji prądu obciążenia oraz jego niezależność od napięcia wyjściowego. Aby uniknąć niestabilności termicznej prądów tranzystora (gdyż w miarę rozgrzewania tranzystora rośnie prąd bazy a co za tym idzie prąd obciążenia, co w efekcie mogłoby doprowadzić do zniszczenia tranzystora) prąd stabilizowany jest w pętli sprzężenia zwrotnego. Pętla sprzężenia zwrotnego realizowana jest przez wzmacniacz operacyjny.



Widoczny obok rysunek poglądowy opisuje zasadę działania naszego obciążenia aktywnego. Prąd obciążenia regulujemy przy pomocy opornika R, regulując tym samym prąd bazy tranzystora T. Ze względu na dużą wartość oporności wyjściowej tranzystora prąd obciążenia jest w zasadzie niezależny od napięcia wyjściowego elementu obciążanego. Skonstruowanie obciążenia jak na powyższym rysunku byłoby jednak kłopotliwe ze względu na niestabilność termiczną tranzystora. W miarę rozgrzewania tranzystora, rósłby prąd bazy a z nim prąd obciążenia. W efekcie mogłoby dojść do uszkodzenia układu lub elementu testowanego, stąd powyższy układ został rozbudowany do postaci widocznej na schemacie poniżej.



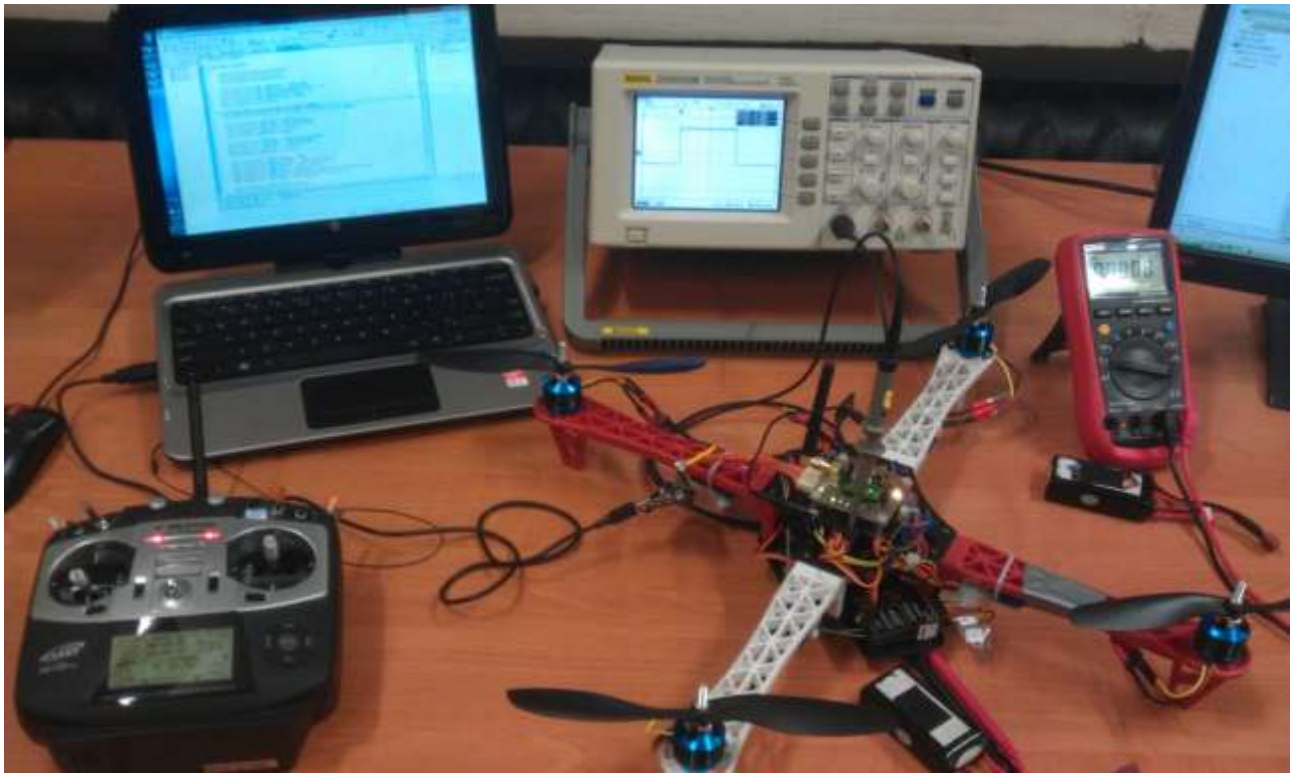
Fot. 10 – Schemat aktywnego obciążenia.

Na zdjęciu poniżej pokazany jest prototyp, który został zbudowany przy pomocy płytki uniwersalnej.

Fot. 11 – Prototyp aktywnego obciążenia DC.

3. Testy platformy

Pierwszymi testami, jakie przeszła platforma były testy stacjonarne, które miały na celu sprawdzenie poprawności działania czujników, aplikacji sterującej pracą platformy oraz napędu quadrotora. Pozwoliło to wykryć pierwsze błędy bez ryzyka uszkodzenia platformy podczas lotu. Zostały przetestowane podstawowe mechanizmy stabilizacji lotu, reakcja silników na wychylenia.



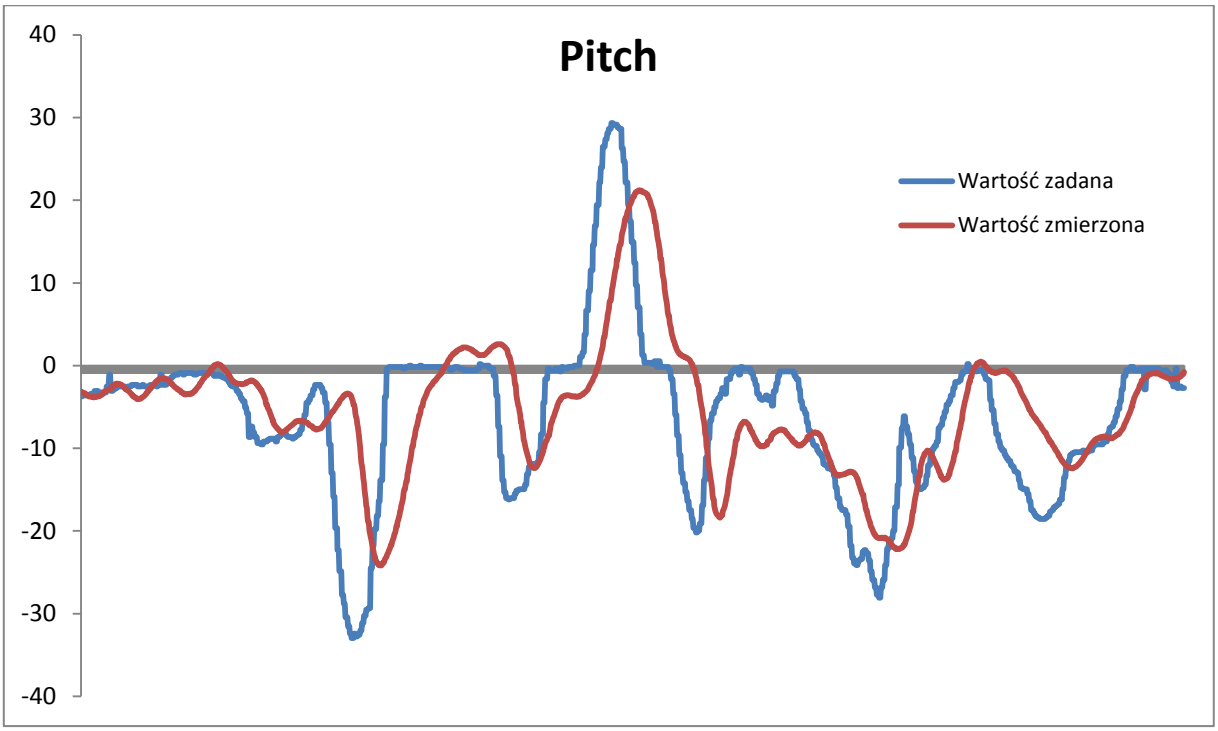
Fot. 12 – Testy stacjonarne platformy.

Kolejnym etapem były testy na „hamaku”, które miały na celu dostrojenie parametrów regulatora PID. Podczas ich wykonywania wyizolowana została jedna oś, a następnie testowana była reakcja platformy na wartość zadaną. Na podstawie zaobserwowanych odpowiedzi parametry regulatora PID były odpowiednio modyfikowane. Kiedy wyniki były satysfakcjonujące nastawy regulatora zostały przeniesione na drugą oś. Wyniki testów projektowanej platformy były na bieżąco porównywane z platformą wyposażoną w komercyjny system stabilizacji. Był to punkt odniesienia, do którego starano się dążyć podczas strojenia.

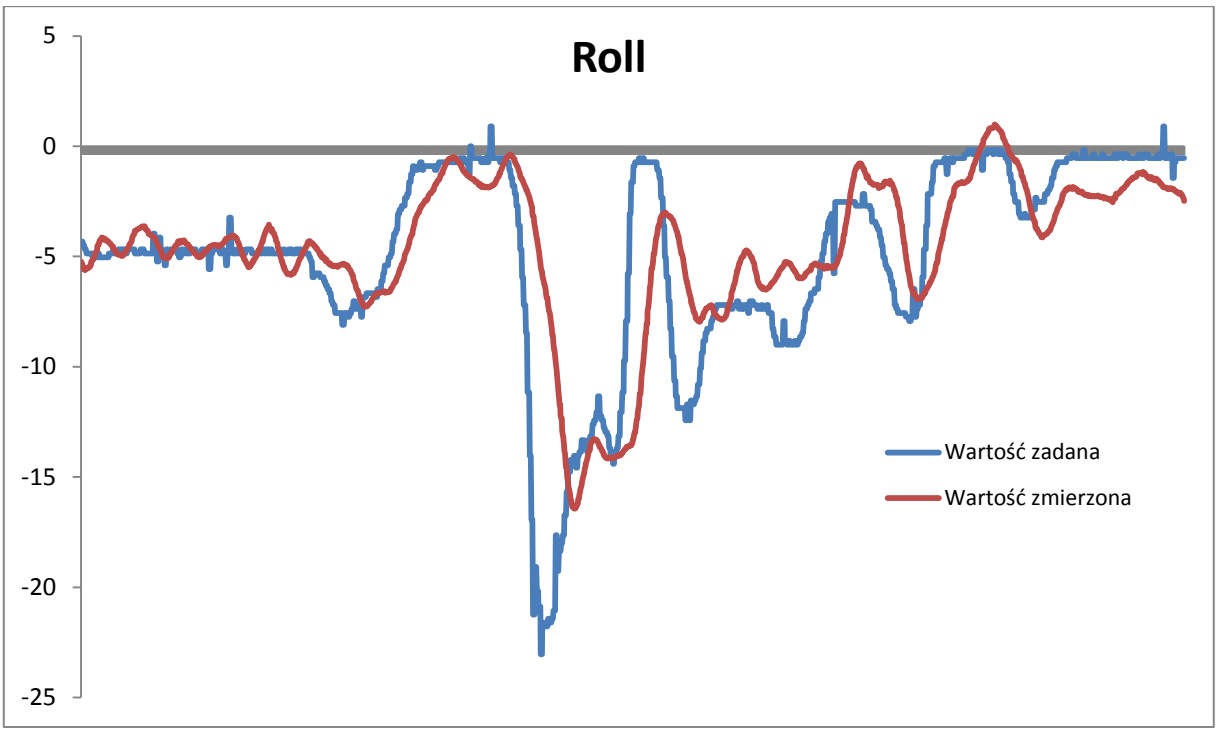
W następnym kroku platforma była testowana w powietrzu. Podczas tych testów badana była stabilność platformy oraz reakcja na wartości zadane wprowadzane przez pilota.

Fot. 13 – Quadrotor podczas lotu.

Poniżej przedstawiono dane w postaci wykresów, które obrazują przebieg wartości zadanej oraz jak reaguje na nią quadrotor podczas lotu.



Fot. 14 – dane zebrane podczas testów platformy, oś y – tzw. pitch.



Fot. 15 – dane zebrane podczas testów platformy, oś x – tzw. roll.

4. Podsumowanie

Ostatecznie projekt został pomyślnie zrealizowany. Zbudowana, nastrojona oraz przetestowana platforma jest zdolna do wykonywania lotu, co wykazały testy naziemne przeprowadzone w laboratorium oraz próby w powietrzu. Ze względu na duży stopień złożoności części elementów projektu, szczególnie tych związanych z systemem wizyjnym oraz utrzymywaniem zadanej wysokości, niektóre z prac zostaną przesunięte do kolejnej edycji projektu. Także kilka elementów wymaga dopracowania, m. in. konieczne jest zniwelowanie drgań pochodzących od silników. Dalszy rozwój platformy powinien być ukierunkowany w stronę częściowej, a następnie pełnej autonomii.

5. Zakupy realizowane w ramach projektu

5.1. **Lista zakupionych przedmiotów**

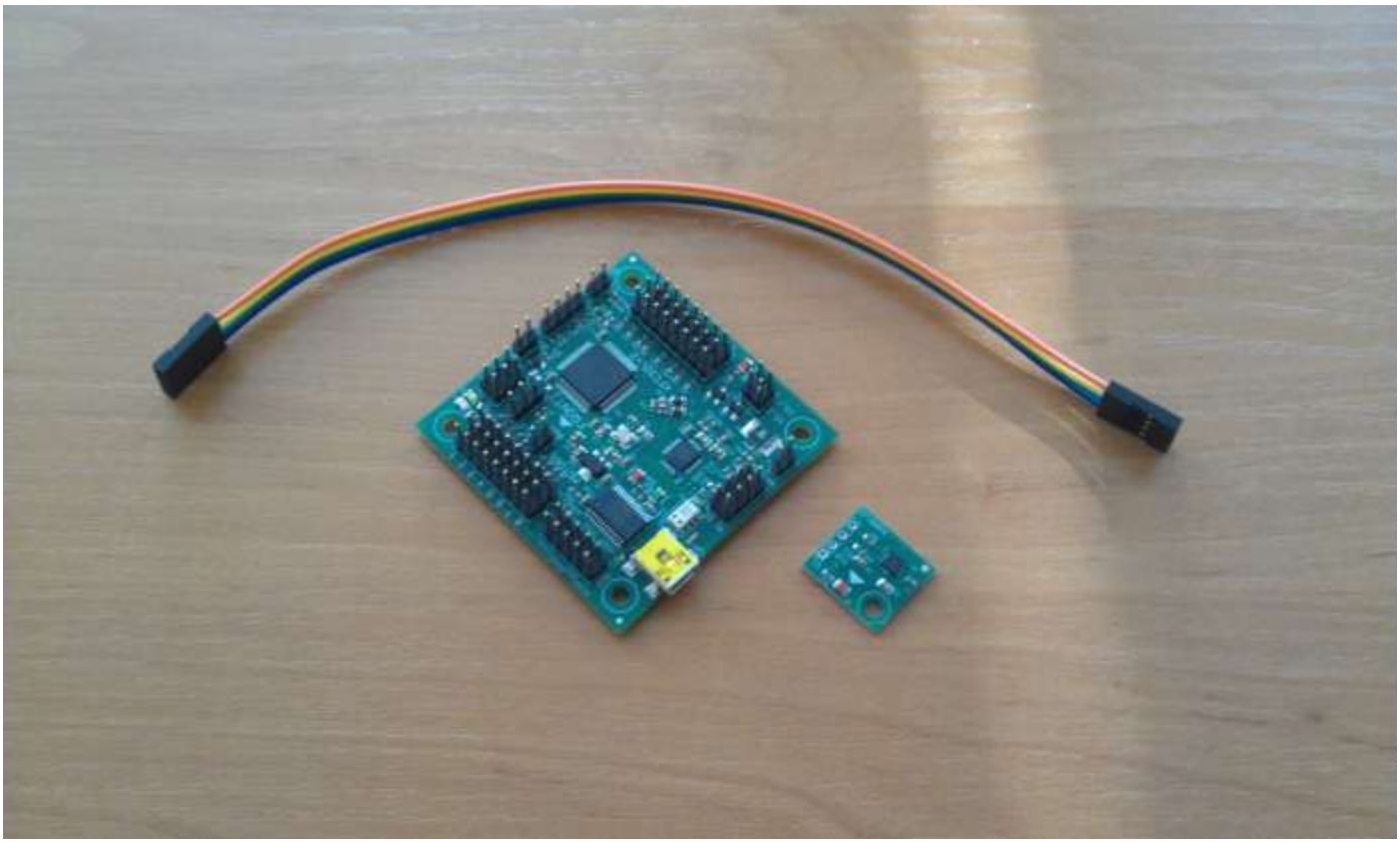
- Komplet ramy wielowirnikowca
- Komercyjny układ stabilizacji
- Akumulatory
- Napęd wielowirnikowca
- Stacja lutownicza
- Odbiornik RC

Zakup napędu wielowirnikowca nie został sfinalizowany, ponieważ proces przedłużył się z powodu zmiany siedziby firmy realizującej zamówienie, aczkolwiek na dzień dzisiejszy zakup jest już w trakcie realizacji przez sklep.

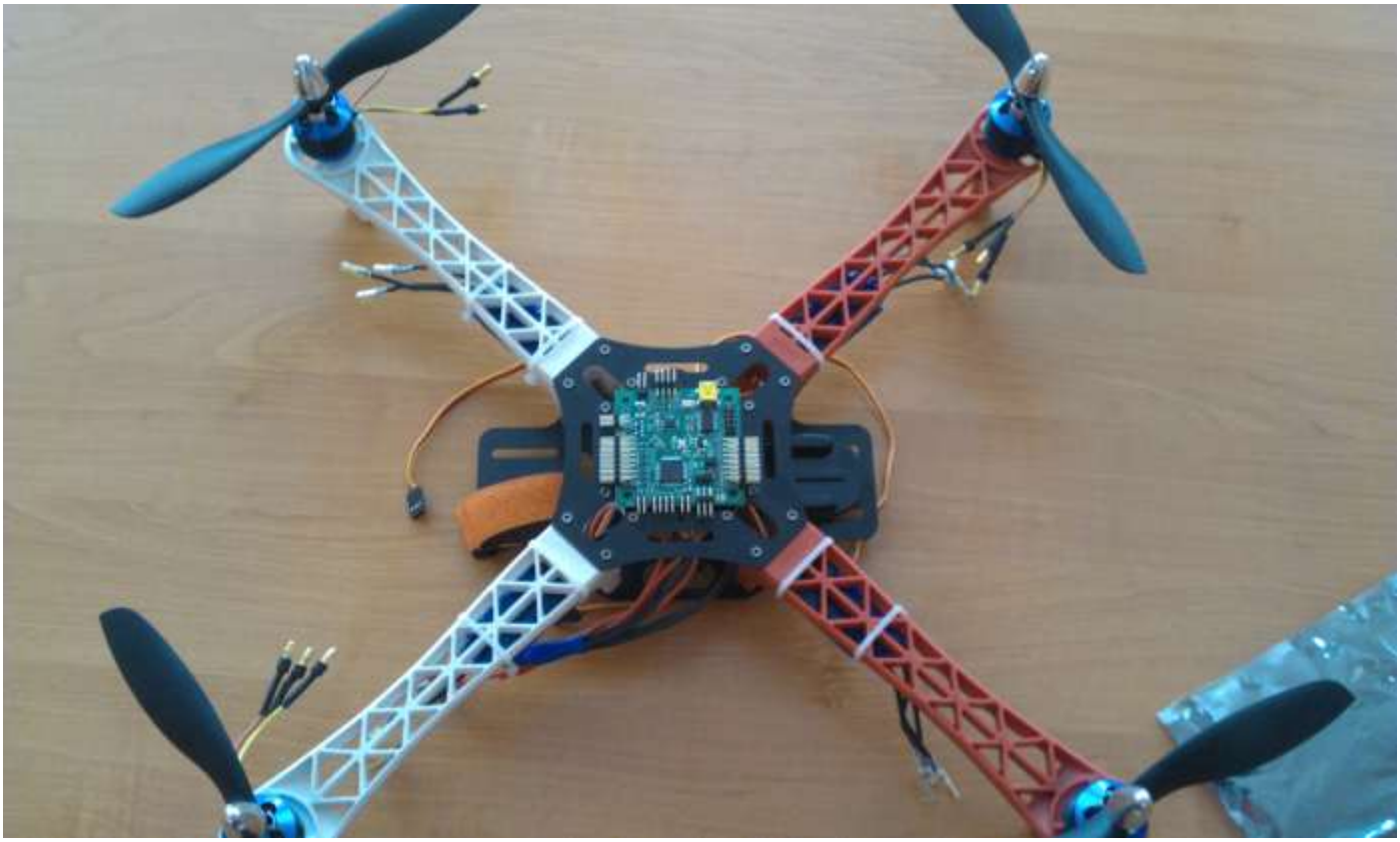
5.2. **Zdjęcia poszczególnych przedmiotów**

Fot. 16 – Akumulatory do zasilania napędu i awioniki.

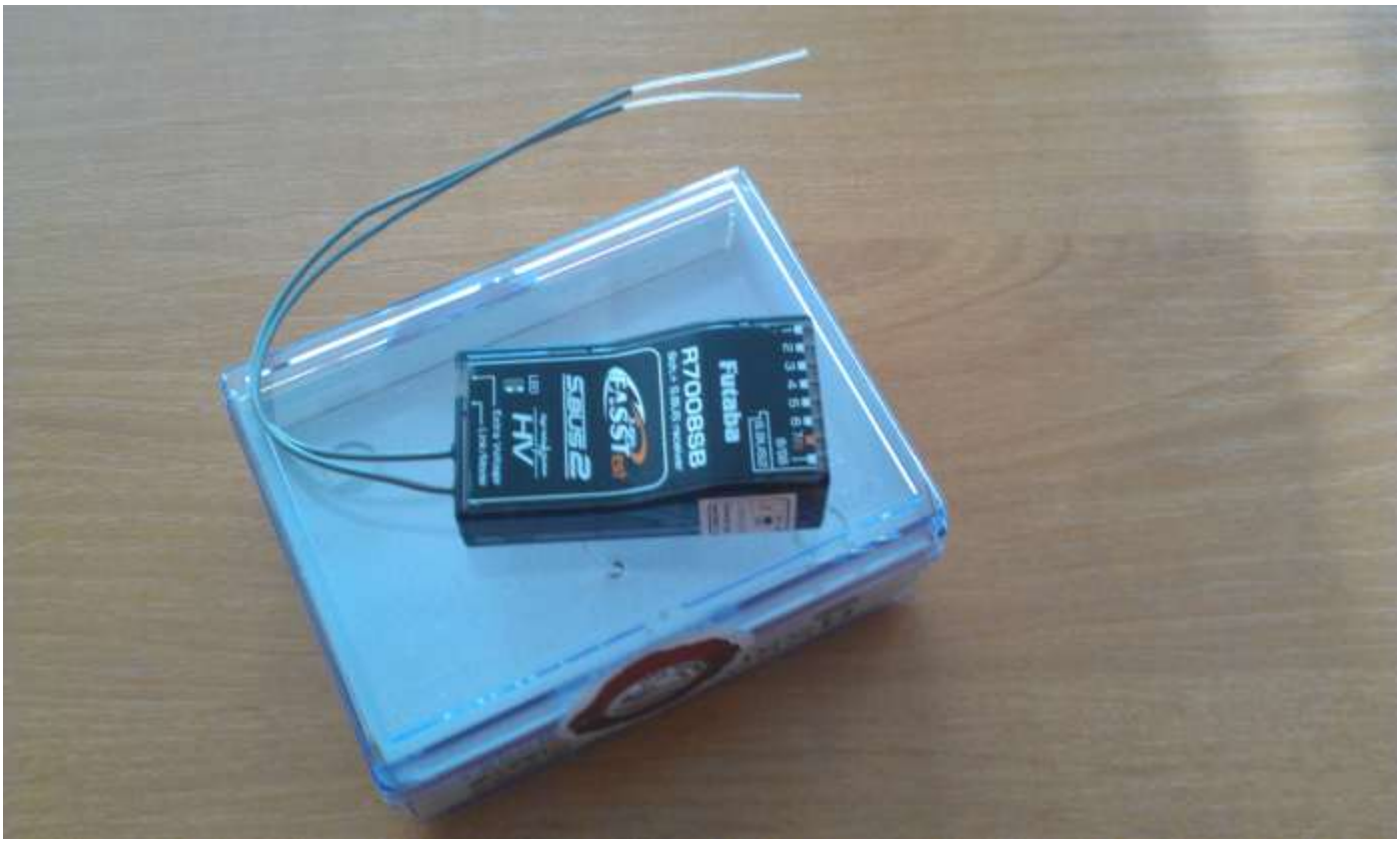
Fot. 17 – Rama przed złożeniem



Fot. 18 – Komercyjny system stabilizacji – MultiWii KFC32v2



Fot. 19 – Zmontowana rama z komercyjnym kontrolerem.



Fot. 20 – Odbiornik RC Futaba R7008SB.

Fot. 21 – Stacja lutownicza Zhaoxin 868D.

6. Publikacja wyników projektu

Adres publikacji wyników projektu w Internecie:

http://www.uav.polsl.pl