

**Praca dyplomowa  
inżynierska**

**Łukasz Drożdż***Imię i nazwisko*

**Automatyka i Robotyka***Kierunek studiów*

**Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.***Temat pracy dyplomowej*

prof. dr hab. inż. Mariusz Giergiel .………….  
 *Promotor pracy Ocena*

Kraków, rok 2016/2017

Kraków, dn 22.01.2017

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Imię i nazwisko: | Łukasz Drożdż |  |
| Nr albumu: | 259209 |  |
| Kierunek studiów: | Automatyka i Robotyka |  |
| Profil dyplomowania: | - |  |

**OŚWIADCZENIE**

Świadomy/a odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy oświadczam, że niniejszą inżynierską pracę dyplomową wykonałem/łam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałem/łam ze źródeł innych niżwymienione w pracy.

Jednocześnie oświadczam, że dokumentacja oraz praca nie narusza praw autorskich   
w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r. Nr 90 poz. 631 z późniejszymi zmianami) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym. Nie zawiera ona również danych i informacji, które uzyskałem/łam w sposób niedozwolony. Wersja dokumentacji dołączona przeze mnie na nośniku elektronicznym jest w pełni zgodna z wydrukiem przedstawionym do recenzji.

Zaświadczam także, że niniejsza inżynierska praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów wyższej uczelni lub tytułów zawodowych.

………………………………..

*podpis dyplomanta*

Kraków, 22.01.2017

Imię i nazwisko: Łukasz Drożdż

Adres korespondencyjny: ul. Doktora Judyma 6, 30-436 Kraków

Temat pracy dyplomowej inżynierskiej: Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

Rok ukończenia: 2017

Nr albumu: 259209

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Profil dyplomowania: -

**OŚWIADCZENIE**

Niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie , udzielam Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie nieograniczonej w czasie nieodpłatnej licencji niewyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji inżynierskiej pracy dyplomowej, w zakresie publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej1.

Publikacja ta może nastąpić po ewentualnym zgłoszeniu do ochrony prawnej wynalazków, wzorów użytkowych, wzorów przemysłowych będących wynikiem pracy inżynierskiej2.

Kraków, ...............… ……………………………..

*data podpis dyplomanta*

1 Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

2 Ustawa z dnia 30 czerwca 2000r. – Prawo własności przemysłowej (Dz.U. z 2003r. Nr 119, poz. 1117 z późniejszymi zmianami) a także rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 17 września 2001r. w sprawie dokonywania i rozpatrywania zgłoszeń wynalazków i wzorów użytkowych (Dz.U. nr 102 poz. 1119 oraz z 2005r. Nr 109, poz. 910).

Kraków, dnia 22.01.2017

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

**TEMATYKA PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ**

dla studenta IV roku studiów stacjonarnych

Łukasz Drożdż

*imię i nazwisko studenta*

|  |  |
| --- | --- |
| TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ INŻYNIERSKIEJ: |  |

Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

*Promotor pracy:* prof. dr hab. inż. Mariusz Giergiel

*Recenzent pracy:* … *Podpis dziekana:*

PLAN PRACY DYPLOMOWEJ

1. Omówienie tematu pracy i sposobu realizacji z promotorem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Wykonanie projektu oraz jego realizacja.
4. Analiza wyników, ich omówienie i zatwierdzenie przez promotora.
5. Opracowanie redakcyjne.

Kraków, ...............… ……………………………..

*data podpis dyplomanta*

**TERMIN ODDANIA DO DZIEKANATU: 20        r.**

*podpis promotora*

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica Kraków, 22.01.2017

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki**

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Profil dyplomowania: -

Łukasz Drożdż

**Praca dyplomowa inżynierska**

Projekt i budowa modelu zdalnie sterowanego typu quadcopter.

Opiekun: prof. dr hab. inż. Mariusz Giergiel

STRESZCZENIE

TODO

AGH University of Science and Technology Kraków, 22/01/2015

**Faculty of Mechanical Engineering and Robotics**

Field of Study: Automatics and Robotics

Specialisations: -

**Bartłomiej Wójcik**

**Engineer Diploma Thesis**

**TODO TOPIC.**

Supervisor: PhD Eng. Robert Barański

SUMMARY

TODO.

Spis treści

[1. Cel pracy. 13](#_Toc470196450)

[2. Wprowadzenie w zagadnienie i przegląd zastosowań. 15](#_Toc470196451)

[2.1. Przegląd zastosowań 16](#_Toc470196452)

[2.2. Możliwe konfiguracje ułożenia silników 16](#_Toc470196453)

[2.3. Mechanika 17](#_Toc470196454)

[2.3.1. Układ Współrzędnych 17](#_Toc470196455)

[2.3.2. Kinematyka 17](#_Toc470196456)

[2.3.3. Siły i momenty siły 19](#_Toc470196457)

[2.3.4. Momenty bezwładności 20](#_Toc470196458)

[2.3.5. Dynamika 21](#_Toc470196459)

[2.4. Podstawowe elementy 22](#_Toc470196460)

[2.1.1. Rama 23](#_Toc470196461)

[2.1.2. Sterownik lotu 24](#_Toc470196462)

[2.1.3. Bateria 25](#_Toc470196463)

[2.1.4. Kontrolery obrotów 25](#_Toc470196464)

[2.1.5. Silniki 25](#_Toc470196465)

[2.1.6. Śmigła 25](#_Toc470196466)

[3. Projekt 30](#_Toc470196467)

[3.1. Elementy ramy zaprojektowane 31](#_Toc470196468)

[3.1.1. Płytki centralne ramy 33](#_Toc470196469)

[3.1.2. Płytki montażowe silnika 36](#_Toc470196470)

[3.1.3. Płytka montażowa IMU 37](#_Toc470196471)

[3.2. Elementy ramy dobrane 38](#_Toc470196472)

[3.2.1. Nogi podwozia 38](#_Toc470196473)

[3.2.2. Obejmy ramion 39](#_Toc470196474)

[3.2.3. Ramiona 39](#_Toc470196475)

[3.3. Sterownik lotu 39](#_Toc470196476)

[4. Realizacja. 40](#_Toc470196477)

[4.1. Algorytm sterowania 40](#_Toc470196478)

[4.1.1. Charakterystyka wirników w funkcji sygnału sterującego 42](#_Toc470196479)

[4.1.2. Regulacja nadążna – podejście 1 44](#_Toc470196480)

[4.1.3. Regulacja nadążna – podejście 2 46](#_Toc470196481)

[4.2. Wykonanie części 46](#_Toc470196482)

[4.2.1. Próba wycięcia laserowego 46](#_Toc470196483)

[4.2.2. Druk 3D 47](#_Toc470196484)

[5. Działanie w praktyce. 47](#_Toc470196485)

[6. Podsumowanie. 48](#_Toc470196486)

[7. Spis ilustracji. 49](#_Toc470196487)

[8. Spis tabel. 49](#_Toc470196488)

[9. Bibliografia. 50](#_Toc470196489)

[10. Załączniki. Repozytorium zawierające napisaną implementację sterownika lotu: https://github.com/lucas93/quadcopter-agh 52](#_Toc470196490)

# Cel pracy.

Jako cel niniejszej pracy obrane zostało zaprojektowanie i wykonanie modelu latającego wielowirnikowca o 4 śmigłach, tzw. quadcoptera. Przyjęto następujące wymagania:

* orientacja układu współrzędnych względem ramy typu X4[[1]](#footnote-1)
* implementacja i wykonanie sterownika lotu
* zaprojektowanie zasadniczych elementów ramy
* zastosowanie komunikacji radiowej w paśmie 2,4GHz
* udźwig maksymalny 3 kg
* sterowanie 3 zmiennymi stanu:
* zastosowanie regulatora PID

Jako dodatkowy cel pracy określono przedstawienie uproszczonego opisu matematycznego mechaniki quadcoptera i podstawowych wymagań konstrukcyjnych. Przedstawiono również uproszczony przegląd możliwych zastosowań.

**Część I - teoretyczna**

# Wprowadzenie w zagadnienie i przegląd zastosowań.

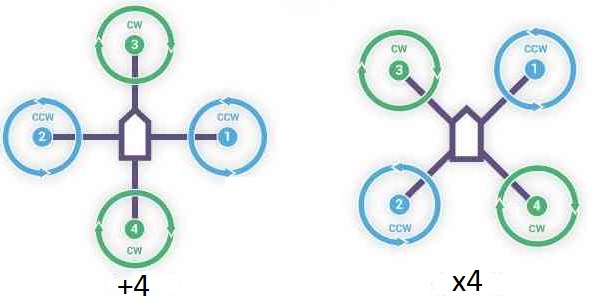
//TODO: Tekst wprowadzenia

## Przegląd zastosowań

Multikoptery, a quadcoptery w szczególności, mają szerokie zastosowanie. Dzieje się tak ze względu na ich nieskomplikowaną konstrukcję w porównaniu do innych latających maszyn, takich jak zdalnie sterowane helikoptery i samoloty. //TODO dokończyć

## Możliwe konfiguracje ułożenia silników

Istnieją dwie zasadnicze możliwości pozycjonowania układu współrzędnych względem ramy i silników. Przedstawione są na Ilustracji Ilustracja 1.

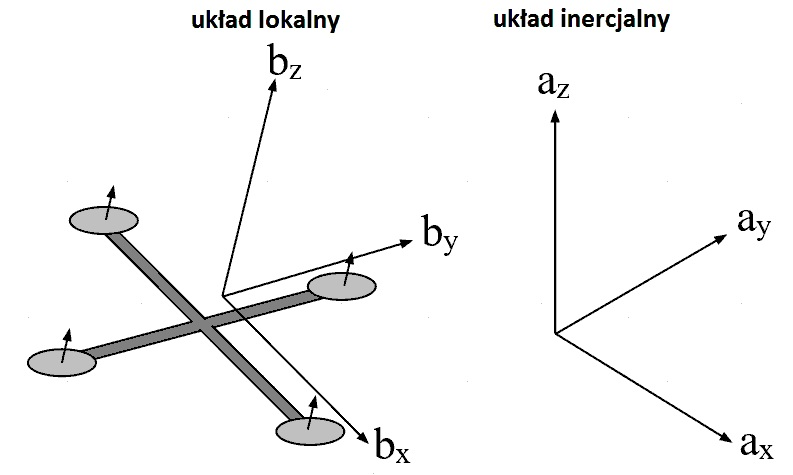


Ilustracja 1: Konfiguracje przyjętego układu współrzędnych [8]

Przyjęcie układu zależy od decyzji projektanta. Ze względu na pozycjonowanie silników na osiach układu współrzędnych układ typu +4 zapewnia prostszy opis matematyczny, który został przedstawiony w kolejnym rozdziale.

## Mechanika

### Układ Współrzędnych

Dobrano lokalny układ współrzędnych przypisany do środka ciężkości ramy **[**bx, by, b­­z**]** i globalny układ współrzędnych **[**ax, ay, a­­z**]** i jak na Ilustracji Ilustracja 2. Jest to układ w konfiguracji +4.

Ilustracja 2: Lokalny i globalny układ współrzędnych

### Kinematyka

Zdefiniowano kolejno pozycję i orientację quadcoptera w globalnym układzie współrzędnych **[**bx, by, b­­z**]** jako:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1**)** |
|  |  | (2) |

gdzie:  
 – obrót (roll)  
 – pochylenie (pitch)  
 – skręt (yaw)  
Powyższę kąty określa się jako kąty RPY (roll, pitch, yaw).

Następnie zdefinowano prędkości liniowe i prędkości kątowe w lokalnym układzie współrzędnych:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |
|  |  | (4) |

Macierz obrotu ***R*** reprezentującą przejście między lokalnym układem współrzędnych a globalnym układem współrzędnych uzyskuje się poprzez kolejne przekształcenia:  
co daje ostatecznie macierz [1]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

gdzie:  
*C – cos()*  
*S – sin()*

Macierz przejścia między układem lokalnym do układu inercjalnego dla prędkości kątowych jest następująca [1]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

Daje to następującą zależność prędkości kątowych w obydwu układach [1]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |
|  |  | (8) |
|  |  |  |

### Siły i momenty siły

Każde z 4 niezależnych śmigieł generuje ciąg, oraz moment zależne od prędkości obrotowej. Wzajemne kierunki i zwroty momentów działających na ramę w wyniku obrotu śmigieł są przedstawione na rysunku... //TODO  
Kierunki i zwroty sił i momentów działających na model są przedstawione na rysunku...//TODO

RYSUNEK

Siła ciągu generowana przez śmigło w zależności od prędkości obrotowej jest w przybliżeniu wyrażona wzorem: [2]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

gdzie:  
*F* – siła ciągu  
*ω* – prędkość obrotowa  
*kF* – stała proporcjonalności ciągu

Sumując siły działające na wszystkie silniki w układzie lokalnym można zapisać zależność wektorową:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10) |

Do uproszczonego modelu można przyjąć siły oporu ruchu w układzie lokalnym zależne liniowo od prędkości [2]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (11) |

Moment obrotowy generowany przez śmigło w zależności od prędkości obrotowej jest w przybliżeniu wyrażony wzorem [2]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |

gdzie:  
*F* – siła ciągu  
*ω* – prędkość obrotowa  
*kM* – stała proporcjonalości momentu

Indeksami 1 i 3 oznaczono silniki wpływające na obrót, zaś indeksami 2 i 4 silniki wpływające na pochylenie. Sumując momenty działające na model w układzie lokalnym można zapisać zależność wektorową:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (13) |
|  |  |  |

### Momenty bezwładności

Założono strukturę quadcoptera o ramionach pokrywających się z osiami bx i by układu lokalnego. Macierz bezwładności ***I*** może być zapisana następująco:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (14) |

Często w praktyce przy odpowiedniej symetrii konstrukcji można założyć, że [1].

### Dynamika

Wykorzystując podane powyżej zależności można wyprowadzić równania dynamiczne ruchu.  
Na podstawie [2] i wypisanych równań *(5)*, *(10)* i *(11)* można zapisać równanie opisujące dynamikę zmian pozycji dla układu inercjalnego:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (15) |

Po rozpisaniu otrzymujemy:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

gdzie:  
m – masa quadcoptera  
g – przyspieszenie ziemskie równe  
 – wektor pozycji w układzie inercjalnym  
– macierz obrotu z układu lokalnego do inercjalnego  
 – wektor sił w układzie lokalnym  
 – wektor sił tarcia w układzie globalnym

Na podstawie [2] można zapisać równanie opisujące dynamikę zmian orientacji dla układu lokalnego:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (17) |

## Podstawowe elementy

Każdy quadcopter zdalnie sterowany składa się z podstawowych, niezbędnych do realizacji lotu elementów. Są to następujące elementy:

* Rama
* Sterownik lotu
* IMU – Inertial Measurement Unit – jednostka pomiaru orientacji modelu
* 4 Silniki ze śmigłami
* ECS – Electronic Speed Control – kontroler obrotów do każdego silnika
* Odbiornik RC
* Bateria

Minimum niezbędbych części do budowy quadcoptera i kierunek zależności zostały przedstawione na poniższym schemacie, analogicznie do [6].  
Gdzie:  
kolor czarny – przepływ informacji  
kolor niebieski – przepływ zasilania

Rama

Silnik

CS

Silnik

CS

ECS

ECS

IMU

Odbiornik RC

Bateria

ECS

ECS

Silnik

CS

Silnik

CS

### Rama

Multicoptery wymagają sztywnych i lekkich ram do zamocowania wszystkich części. Istnieje bardzo dużo mozliwych konstrukcji różniących się kształtem, wymiarami i materiałami. Z powodu mniejszych ugięć i wypaczeń, sztywniejsza rama zapewnia stabilniejszy lot. Z drugiej strony, jeżeli rama jest zbyt krucha, nieuniknione upadki będą owocować częstszymi uszkodzeniami i potrzebami naprawy. Rama powinna być jednocześnie lekka, ponieważ niższa masa wpływa korzystnie na czas lotu.  
 Jednym z najbardziej powszechnych materiałów używanych komercyjnie do wykonania ramy jest włókno węglowe. Zapewnia wysoki stosunek sztywności do masy i dobrą wytrzymałość zmęczeniową. Największymi minusami są możliwość blokowania sygnałów radiowych przez laminat węglowy i przewodnictwo elektryczne [3].  
 Inne często używane materiały to między innymi laminat szklano-epoksydowy, aluminium [4], ABS i PLA. Charakteryzują się niższą sztywnością i odpornością na uszkodzenia, jak również niższym stosunkiem sztywności do masy. Dodatkowo, elementy z tworzywa sztucznego mogą być dowolnie ukształtowane. Niektóre komercyjne drony, jak np. DJI Phantom, odeszły od powszechnej konstrukcji: płytka centralna ramy + ramiona. Zamiast tego rama jest jednolita, bez wyraźnie oddzielonych ramion.  
 Powszechna jest integracja układów zasilania z centralną płytą ramy. Daje to możliwość przylutowania przyłączy baterii i zasilania ESC bezpośrednio do ramy, co ogranicza potrzebę prowadzenia dużej ilości kabli. Nie jest to niezbędne rozwiązanie, lecz ogranicza możliwość powstania bałaganu, jak również zapewnia większą niezawodność.  
 Głównym parametrem charakteryzującym rozmiar ramy jest rozpiętość mierzona między osiami dwóch silników zamieszczonych po przekątnej. Dla modeli typu quad jest to jedyna możliwa przekątna. Dla modeli typu hexa-, octa-, lub innych jest to przekątna pomiędzy osiami silników najbardziej od siebie odległych. Ramę dobiera się w zależności od zastosowania quadcoptera.

### Sterownik lotu

Sterownik lotu jest głównym elementem każdego modelu latającego. Jest on odpowiedzialny prawidłową pracę wszystkich systemów. W minimalnym wariancie składa się z mikrokontrolera i peryferii pozwalających na przeprowadzanie obliczeń; sensorów dostarczających danych pozwalających na estymację położenia i orientacji drona; oraz modułu radiowego którym odbierane są sygnały radiowe. Jednostka logiczna przetwarza informacje z sensorów dotyczące położenia i orientacji i sygnały z modułu radiowego, a następnie odpowiednio steruje wyjściami na kontrolery obrotów silników [5]. Sterownik lotu może wykonywać dodatkowe zadania, takie jak obliczanie trasy, czy przetwarzanie parametrów lotu, w zależności od zastosowania.

### Bateria

Dominujący rodzaj baterii to akumulatory litowo-polimerowe. Model latający zazwyczaj wyposażony jest w jedną baterię, wspólną dla układu napędowego (silników) i układu logicznego (sterownika lotu). Jest to możliwe poprzez zastosowanie BEC (Battery Eliminator Circuit), który jest częścią kontrolera obrotów. W praktyce używa się baterii 2-6 komorowych (7,4 V – 22,2 V).

### Kontrolery obrotów

ESC (Electronic Speed Controler) jest układem elektronicznym działającym jako regulator obrotów silnika, sterującym jego prędkością obrotową i kierunkiem. Również pełni funkcję hamulca dynamicznego [3] zazwyczaj posiada 3 piny dostosowane do rastra 2,54 mm, wpinane do sterownika lotu. Piny te to: pin sygnałowy, masa, oraz 5 V (BEC). Komunikacja z kontrolerem odbywa się poprzez modulację szerokości impulsów (PWM - Pulse-Width Modulation), lub modulację położenia impulsu (PPM – Pulse-Position Modulation). Kontroler obrotów zasilany jest z bezpośrednio z baterii. Wyjścia są podłączone do jednego silnika.

### Silniki

W modelach latających powszechnie stosuje się silniki bezszczotkowe, jak np. w [6]. Są to silniki synchroniczne, nie korzystające ze szczotek, funkcję komutatora pełni układ elektroniczny. Magnesy znajdują się na wirniku, a cewki są nieruchome. Dzięki wyeliminowaniu szczotek, które są szybko zużywającym się elementem, silniki bezszczotkowe odznaczają się wyższą trwałością i niezawodnością. Moc silnika może być nawet rzędu tysiąca watów.

### Śmigła

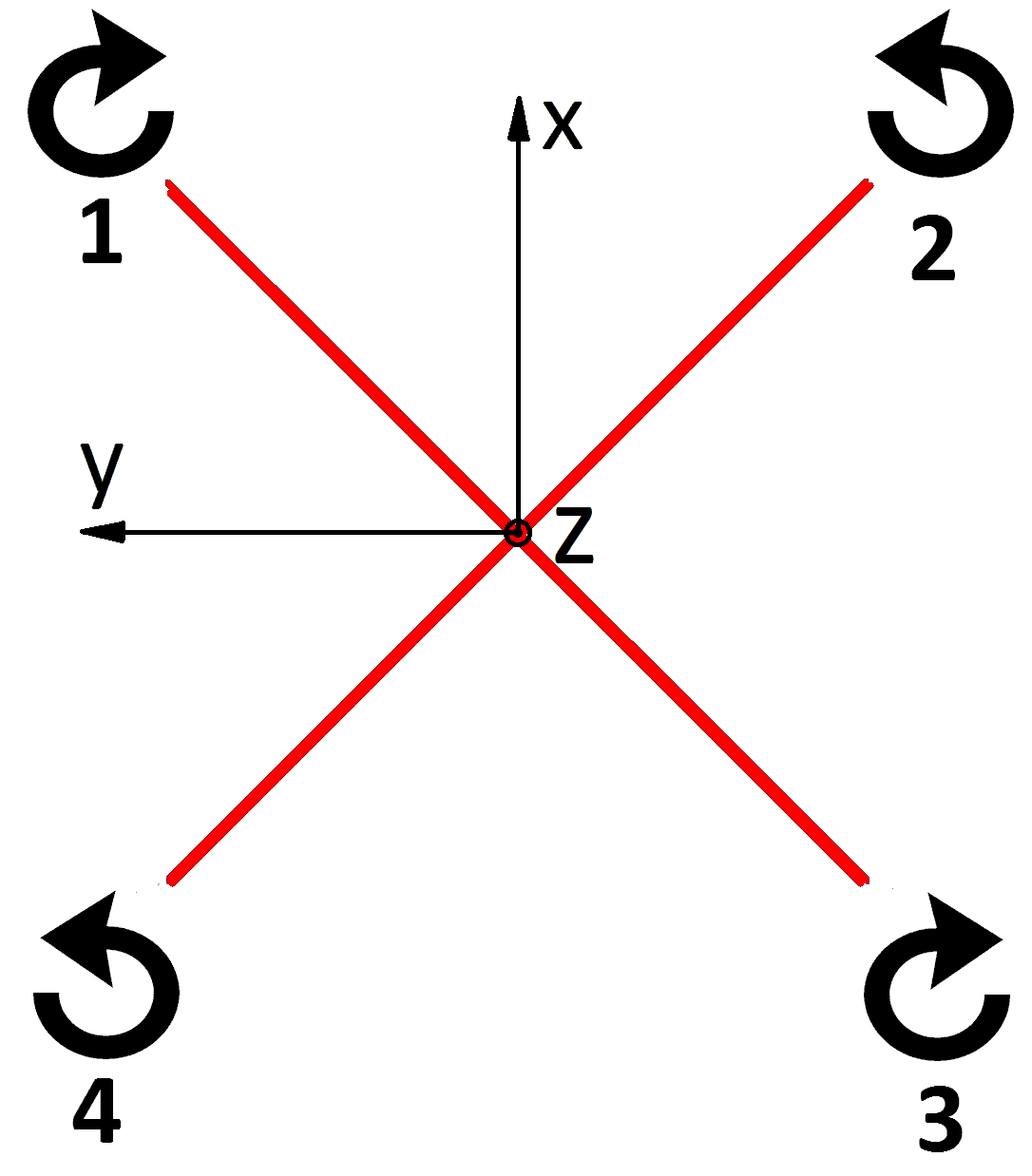
Podstawowymi parametrami opisującymi śmigło są średnica i skok. Wybór śmigła o odpowiednich parametrach powinien być dokonany w zależności od dobranych silników, rozmiaru ramy i szacowanej masy [9]. Stosuje się różne materiały do produkcji śmigieł, wśród których dominują tworzywo sztuczne i włókno węglowe [9]. Jako różnice między tymi materiałami można wyróżnić [10]:

* Śmigła z włókna węglowego są sztywniejsze
* Śmigła z włókna węglowego są lepiej fabrycznie wyważone
* Śmigła z włókna węglowego posiadają niższy moment bezwładności, przez co szybciej reagują na zmianę nastawy prędkości obrotowej regulatora obrotów
* Śmigła z tworzywa sztucznego są tańsze
* Śmigła z tworzywa sztucznego generują większy ciąg
* Śmigła z tworzywa sztucznego dzięki wyższej podatności na zniszczenia lepiej zabezpieczają wał silnika przed uszkodzeniem

**Część II – projekt i realizacja**

# Projekt

Przyjęto układ współrzędnych i numerację silników przedstawione na ilustracji [Ilustracja 3]



Ilustracja 3: Przyjęty w projekcie układ współrzędnych i zaznaczone kierunki obrotu śmigieł

W ramach projektu zdecydowano się na samodzielne zaprojektowanie następujących elementów:

* płytki centralnej ramy
* płytek montażowych silnika
* płytek montażowych IMU

Zlutowano również układ sterownika lotu, łącząc niezbędne połączenia zasilania i sygnałów.

Z gotowych rozwiązań komercyjnych dobrano następujące elementy:

* Moduł developerski Teensy 3.1 - ARM Cortex-M4, 96 MHz, 64 kB RAM, 256 kB flash
* MPU9250 – 3 osiowy żyroskop, 3 osiowy akcelerometr, 3 osiowy magnetometr
* Emax 2216 – 4 silniki,
* BLHeli 12 A – 4 regulatory obrotów
* Emax 8045 – 4 śmigła 8x4,5”
* HK-T6A V2 – aparatura i odbiornik RC 2,4GHz
* Vant LiPo 4500 mAh – bateria 14,8 V; 30 C
* Rura ϕ12x1000x0,5 mm - z włókna węglowego, wykonana w technologii owijania tkanin
* Obejmy tzw. Boom Block, 16 sztuk
* Podwozie – 4 nogi z zestawu DJI S500
* Śruby, nakrętki i tuleje dystansowe, poliamidowe

## Elementy ramy zaprojektowane

Do modelowania 3D wykorzystano oprogramowanie Solidworks 2016 w wersji studenckiej. Stworzenie modelu 3D miało dwa zasadnicze cele:

* zaprojektowanie płytki centralnej ramy, płytek montażowych silnika i płytki montażowej IMU do późniejszego wykonania
* zapewnienie wzajemnego dopasowania wszystkich elementów już na etapie projektu

Początkowo zamierzano zaprojektowane części wyciąć laserem CNC, lecz zarzucono ten pomysł na rzecz druku 3D, co opisano w rozdziale 0.

Poniżej zamieszczono render ukazujący wyniki pracy. Jest to model uproszczony względem rzeczywistego. Nie modelowano części nie mających wpływu na poprawne dopasowanie elementów łączonych, takich jak: kable, moduł RC, regulatory obrotów. Układ sterownika lotu i moduł MPU9250 zostały zamodelowane w sposób uproszczony jako płytki koloru kolejno: zielonego i granatowego; z zachowaniem wymiarów podłączeniowych i gabarytowych. //TODO: zmiana renderu na model bez amortyzatorów



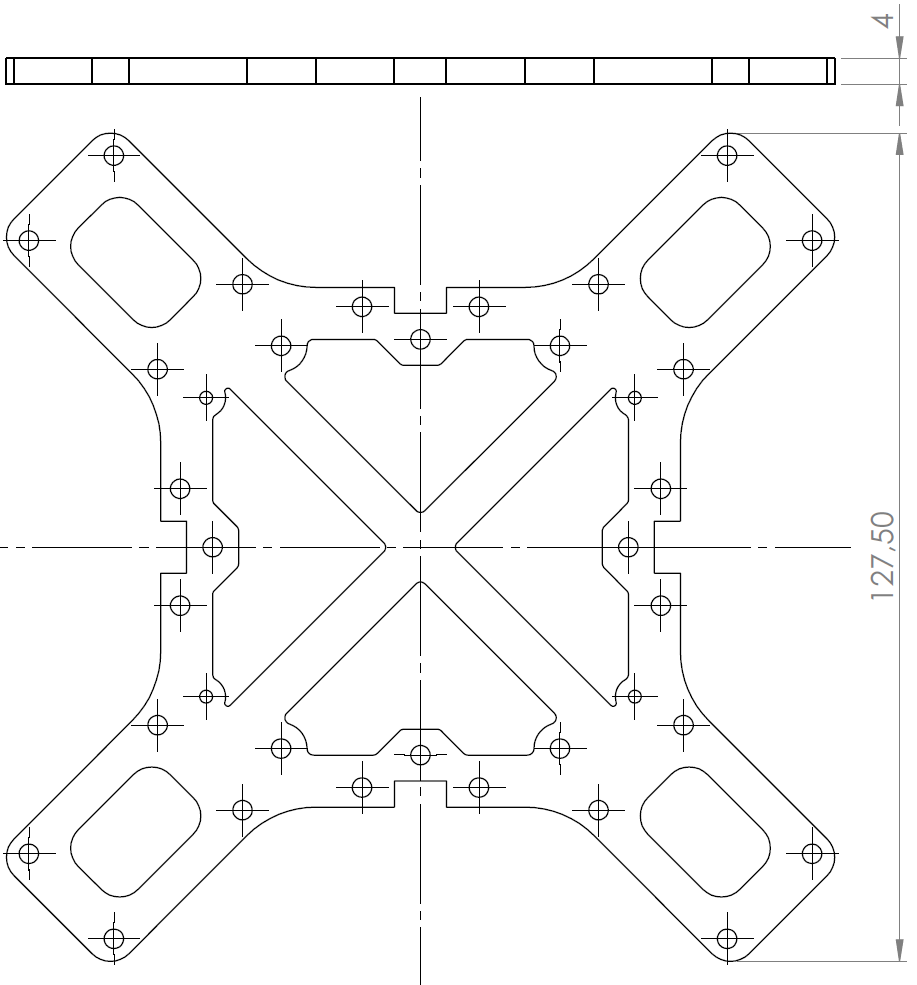
Ilustracja 4: Render zaprojektowanego modelu 3D

### Płytki centralne ramy

Zdecydowano się na samodzielne zaprojektowanie elementów centralnych ramy. Było to spowodowane następującymi względami:

* dowolność w przyjętych rozwiązaniach konstrukcyjnych
* możliwość zaprojektowania rozwiązania minimalnego, bez zbędnych elementów, które dominują w rozwiązaniach komercyjnych, jak np. uchwyt kamery
* otwartość na przyszłe zmiany
* możliwość uwzględnienia modułowości
* możliwość szybkiej zmiany wytrzymałości ramy poprzez zmianę grubości elementów, w zależności od potrzeb.

Rysunki zaprojektowanych elementów widoczne są poniżej. Z racji tego, że części były projektowane pod wycięcie CNC, nie było potrzeby tworzenia ich rysunków wykonawczych. Na ilustracjach są zaznaczone wymiary gabarytowe. Początkowo rysunki miały służyć do przeprowadzenia cięcia CNC, lecz ostatecznie skorzystano z wygenerowanych modeli 3D w formacie standardowym STL.

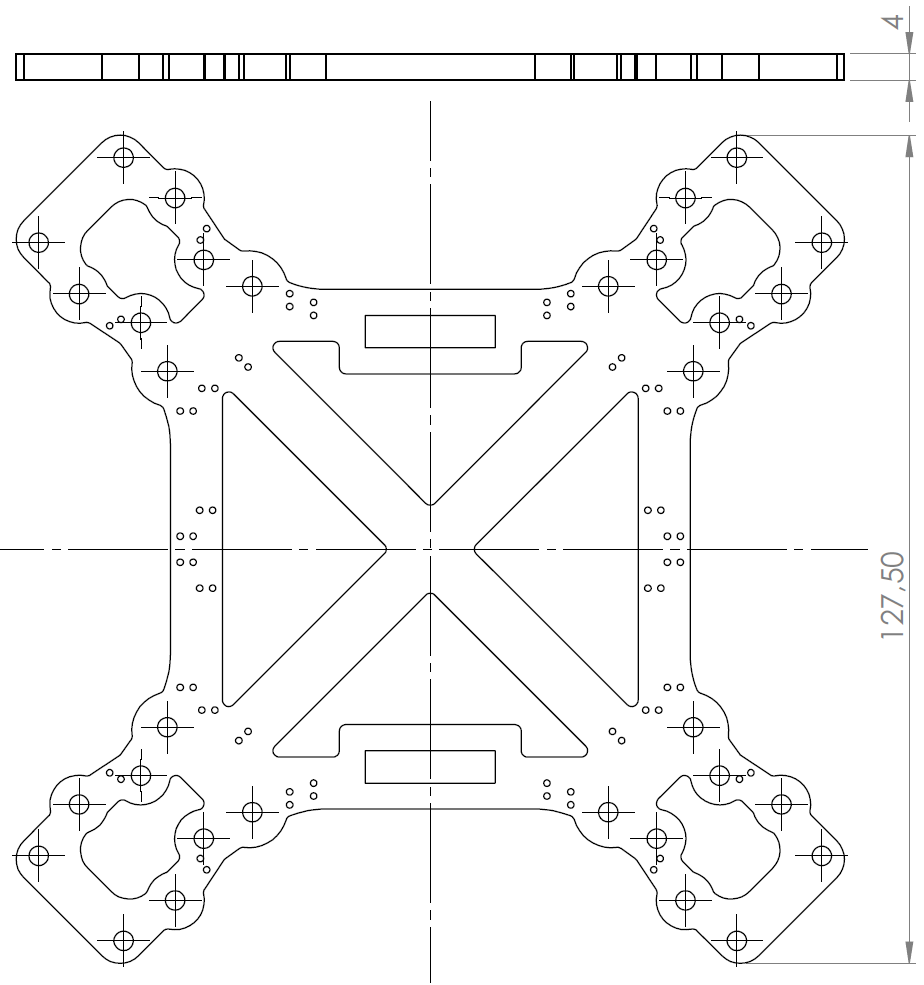


Ilustracja 5: Płytka górna ramy

//TODO zaznaczyć przelotowość otworów, wymiary podłączeniowe, zmienić oznaczenie grubości – x4 zamiast rzutu bocznego

Przy projektowaniu górnej części centralnej ramy zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 8 obejm typu Boom Block
* dopasowano rozstaw otworów do podłączenia płytki sterownika lotu i płytki modułu IMU, zamontowanej na tulejach dystansowych
* poprzez pozostawienie 3 otworów ϕ3 i wcięcia z 4 stron płytki otwarto możliwość przymocowania quadcoptera do ramy testowej ograniczającej stopnie swobody, jeżeli zaszłaby potrzeba prowadzenia testów



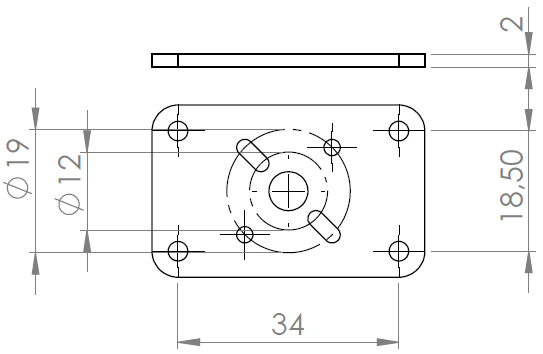
Ilustracja 6: Płytka dolna ramy

//TODO zaznaczyć przelotowość otworów, wymiary podłączeniowe, zmienić oznaczenie grubości – x4 zamiast rzutu bocznego, usunąć otwory fi1

Przy projektowaniu dolnej części centralnej ramy zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 8 obejm typu Boom Block, analogicznie do górnej płytki
* uwzględniono wymiary podłączeniowe nóg pełniących funkcję podwozia
* uwzględniono otwory niezbędne do montażu baterii od spodu quadcoptera za pomocą rzepa.
* zapewniono odpowiednią wytrzymałość dzięki nadaniu grubości 4mm

### Płytki montażowe silnika

Element ten jest prosty w swojej konstrukcji, lecz jego dokładne wykonanie jest wymogiem precyzyjnego umocowania silników. 

Ilustracja 7: Płytka montażowa silnika

//TODO wymiary podłączeniowe i gabarytowe

Przy projektowaniu dolnej części centralnej ramy zrealizowano następujące zadania:

* dostosowano rozmiar i rozstaw otworów do 2 obejm typu Boom Block
* wykorzystano uniwersalny rozmiar i rozstaw otworów do montażu silnika, wykorzystywany w rozwiązaniach komercyjnych.
* Zapewniono odpowiednią szerokość 34 mm pozwalającą na bezpieczny montaż silnika bez ryzyka kolizji ze śrubami łączącymi obejmy

### Płytka montażowa IMU

W początkowej fazie projektu zakładano możliwość wykorzystania silikonowych łączników jako amortyzatorów celem minimalizacji wpływu drgań na odczyty akcelerometru i żyroskopu. Przy późniejszej weryfikacji nie udało się znaleźć przykładu takiego rozwiązania w pracach naukowych lub produktach komercyjnych, więc tę formę profilaktyki przeciwko niepożądanym drganiom uznano za zbędną. W wyniku tego zaprojektowano możliwie nieskomplikowaną część, do której zamontowany zostanie układ MPU9250. Całość jest przymocowana do górnej płytki centralnej ramy za pośrednictwem 4 poliamidowych tulei dystansowych ϕ3 x 40 mm.

//TODO wstawić rysunek

Przy projektowaniu płytki montażowej IMU zrealizowano następujące zadania:

* dopasowano rozstaw otworów montażowych tulei do otworów w górnym centralnym elemencie ramy
* dopasowano rozstaw i średnicę otworów montażowych IMU na podstawie pomiarów modułu MPU9250 dokonanych suwmiarką
* część płytki montażowej przylegającą do IMU odsunięto od osi tak, by układ MEMS modułu MPU9250 znajdował się w osi quadcoptera

## Elementy ramy dobrane

### Nogi podwozia

Początkowo zakładano, że nogi podwozia również zostaną zaprojektowane, lecz ostatecznie dobrano je z kompletu ramy DJI S500. Jest to element, który będzie można w przyszłości zaprojektować i wykonać, zwracając uwagę mniejsze wymiary i wyższą sztywność.



Ilustracja 8: Nogi podwozia z zestawu DJI S500 et al., “3D-Printed ABS and PLA Scaffolds for Cartilage and Nucleus Pulposus Tissue Regeneration”, International Journal of Molecular Sciences, str. 15122, ISSN 1422-0067, 2015

[8] Grafika: Konfiguracje orientacji quadcoptera, http://ardupilot.org/copter/\_images/MOTORS\_QuadX\_QuadPlus.jpg

[9] How to choose motor and propeller for quadcopter, https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/, dostęp 22.12.2016

[10] Carbon Fibre Props vs plastic propeller, https://oscarliang.com/carbon-fibre-props-plastic-propeller/, dostęp 22.12.2016

11]

### Obejmy ramion

Uchwyt tzw. Boom block dostosowany jest do rur o średnicy zewnętrznej ϕ12.



Ilustracja 9: Obejma rury ϕ12 [12]

### Ramiona

Jako ramiona dobrano rury z włókna węglowego o splocie ukośnym o wymiarach ϕ12x11x230 . Zapewniają w pełni wystarczającą wytrzymałość i udarność.



Ilustracja 10: Rura z włókna węglowego [13], moneta dla skali

## Sterownik lotu

// schemat elektryczny?

# Realizacja.

## Algorytm sterowania

Jednym z przyjętych celów pracy była implementacja sterownika lotu w języku C++. Algorytm sterowania w sposób ogólny przedstawia schemat zamieszczony na Ilustracji Ilustracja 11. Pełna implementacja dostępna jest w repozytorium internetowym zamieszczonym w Załączniku pracy.

START

Inicjalizacja zmiennych sterownika

Czy UAV jest uzbrojony?

N

T

Odczyt nastaw

Odczyt stanu

Obliczenia regulatora

Odczyt nastaw

Czy port szeregowy obsłużył wszystkie zapytania?

N

T

Czy aparatura RC jest skalibrowana?

N

T

Obsługa portu szeregowego

Kalibracja kanałów aparatury

Ilustracja 11: Schemat algorytmu sterowania

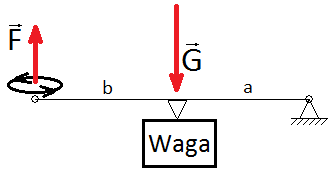
Przy implementacji należało uporać się z następującymi zagadnieniami:

* konfiguracja modułu MPU9250
* komunikacja z modułem MPU9250 poprzez szynę I2C
* odbiór sygnałów radiowych za pomocą przerwań[[2]](#footnote-2)
* interpretacja sygnałów radiowych i ich konwersja na zmienne sterujące
* implementacja nadążnego układu regulacji
* wysyłanie sygnału sterującego do kontrolerów obrotów
* możliwość odczytu / zapisu wybranych parametrów z / do pamięci nieulotnej EEPROM za pośrednictwem portu szeregowego
* możliwość kalibracji położenia neutralnego drążków aparatury RC

### Charakterystyka wirników w funkcji sygnału sterującego

Parametrami podlegającymi sterowaniu są nastawy każdego z regulatorów obrotów. Stawiono sobie za zadanie znalezienie zależności ciągu i momentu wirnika generowanych w funkcji sygnału sterującego nadawanego do regulatora. Z niejasnego opisu regulatora BLHeli 12 A [14] można wnioskować, że regulator zapewnia liniowość generowanego ciągu i momentu. Postanowiono to sprawdzić.

W tym celu zbudowano stanowisko do statycznego testowania ciągu silnika. Jego schemat jest przedstawiony na ilustracji Ilustracja 12.

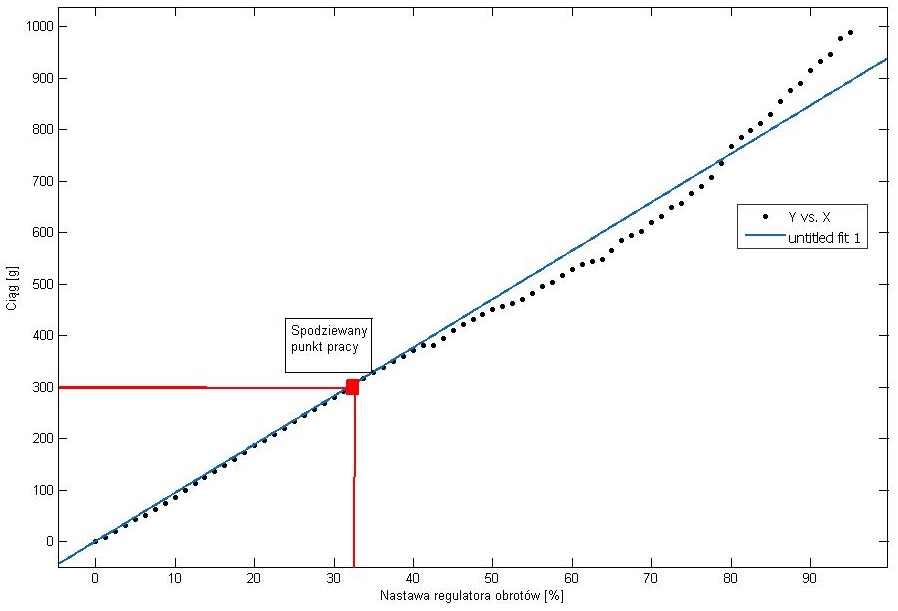


Ilustracja 12: Schemat stanowiska testowego do pomiaru ciągu silnika

Wykorzystano zależność:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (18) |
|  | gdzie: ∆W – zmiana wskazania wagi  - stała |  |

Wynik przeprowadzonych testów przedstawia wykres z ilustracji Ilustracja 13.



Ilustracja 13: Charakterystyka F(u)

Spodziewany punkt pracy przyjęto dla ciągu o wartości 300 g. Powyższy wykres potwierdza liniowy charakter ciągu w funkcji nastawy regulatora obrotów. Nieznaczące nieliniowości mogły być spowodowane zakłóceniami przy pomiarach dla wyższych prędkości obrotowych.

Zapisane więc zależność:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (19) |
|  | gdzie:  – stała proporcjonalności  – nastawa regulatora obrotów |  |

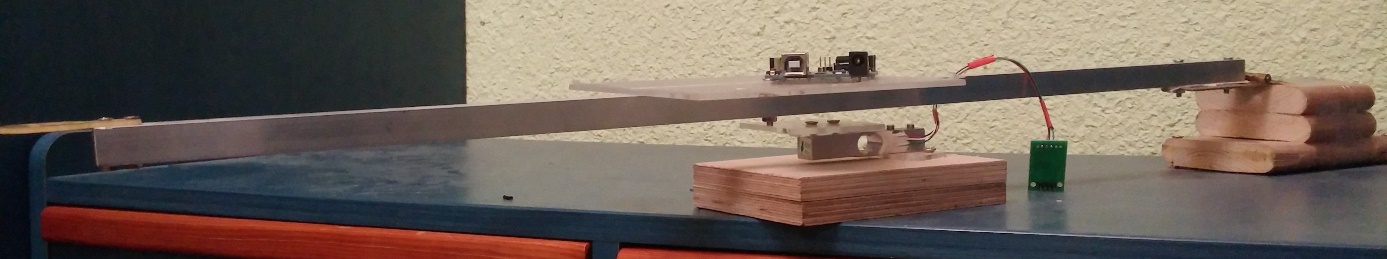
Na podstawie równań (9) i (12) zapisano:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Wynika z tego, że zależność momentu rekcji wirnika w funkcji nastawy regulatora obrotów również jest liniowa. Zapisano więc ostatecznie:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (20) |

Zdjęcie stworzonego stanowiska testowego przedstawia ilustracja

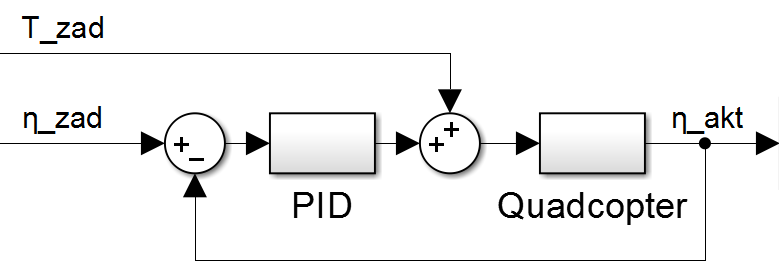


Ilustracja 14: Stanowisko testowe pomiaru ciągu silnika

Do pomiaru zmiany ciężaru układu wykorzystano belkę tensometryczną NA27 o zakresie do 50N i wzmacniacz SparkFun HX711. Program testujący zaimplementowano na platformie Arduino UNO.

### Regulacja nadążna – podejście 1

Przy pierwszym podejściu zaimplementowano możliwie najprostszy układ regulacji z jedną pętlą sprzężenia zwrotnego, wg schematu przedstawionego na ilustracji Ilustracja 15.



Ilustracja 15: Schemat blokowy regulacji - podejście 1

Przyjęto następujące oznaczenia

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (21) |
|  | – wartości kątów i prędkości kątowej wyznaczone z konwersji kanałów radiowych 1-3 |  |
|  | – zadana wartość ciągu wyznaczona z konwersji kanału 4 |  |

Następnie podjęto próbę wyznaczenia współczynników regulatora PID zapewniających stabilność układu. Rozpoczęto od wyznaczenia tylko współczynników wzmocnienia i , jak dla regulatora P.

Nie znaleziono współczynników dla stabilnej regulacji. Było to spowodowane błędnie przyjętym schematem regulacji. Wg tego schematu momenty siły wzdłuż osi x i y są proporcjonalne kolejno do uchybu regulacji kąta obrotu i uchybu regulacji kąta pochylenia . Po porażce doboru parametrów regulacji dla regulatora P nie podjęto się próby szukania współczynników dla części I i D regulatora. Rozpisując matematycznie zachowanie regulatora P otrzymano:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |
|  | (23) |

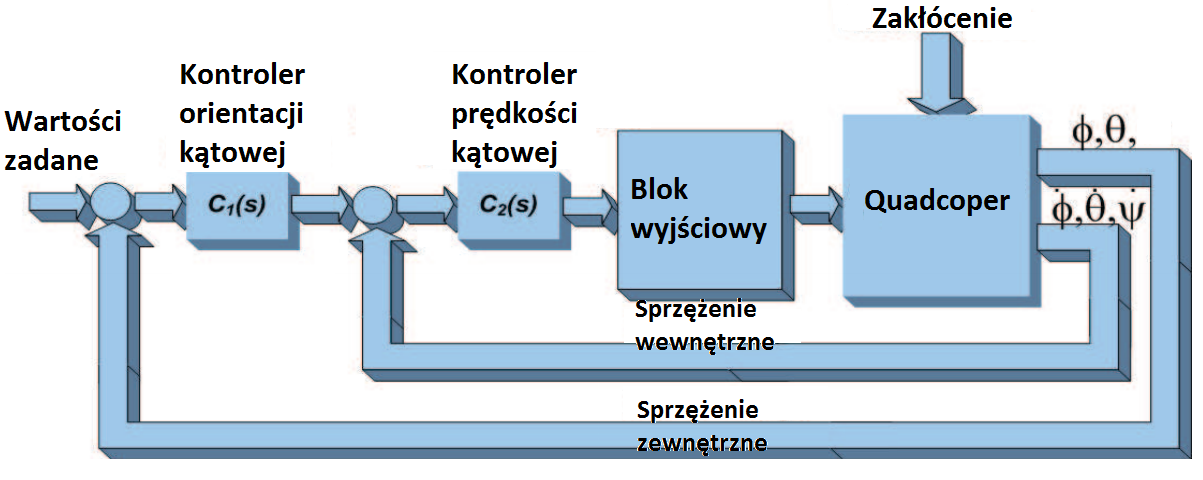
Na podstawie równania (2) w [15] zapisano rozwiązania równań:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |
|  | (25) |

Na podstawie powyższych równań można stwierdzić, że przyjęty model regulatora powoduje oscylacje, co w rzeczywistości niesie za sobą niezbywalną niestabilność.

### Regulacja nadążna – podejście 2

Przy drugiej próbie zaprojektowania układu regulacji przyjęto algorytm sterowania kaskadowego z dwoma pętlami sprzężenia zwrotnego, zaproponowany w [16]. Schemat algorytmu przedstawiony jest na ilustracji Ilustracja 16.



Ilustracja 16: Schemat blokowy regulacji - podejście 2 [16]

## Wykonanie części

### Próba wycięcia laserowego

Części opisane w rozdziale 3.1 początkowo próbowano wykonać w technologii cięcia laserowego CNC. Jako materiał wybrano arkusz laminatu szklano-epoksydowego. Niestety dwie firmy świadczące w Krakowie usługi cięcia laserowego nie były w stanie sprostać temu zadaniu. Wbrew założeniom, arkusz laminatu szklano-epoksydowego okazał się niepodatny na cięcie wiązką lasera. Nieudane próby cięcia przedstawione są na ilustracji…

//TODO wstawić zdjęcia nieudanych prób

### Druk 3D

Zdecydowano się na wykonanie zaprojektowanych części w technologii druku FDM. Polega ona na… //TODO dokończyć opis technologii. Zastanawiano się pomiędzy dwoma materiałami do druku 3D: ABS i PLA. Na podstawie ilustracji 2. w

[7] założono, że PLA zapewni wyższą wytrzymałość niż ABS. Pierwszy wydruk był niezadowalający z powodu niepoprawnie dobranej prędkości głowicy. Po dobraniu prawidłowych parametrów druku wykonano części opisane w rozdziale 3.1.

//TODO wstawić zdjęcia z procesu drukowania

Zmontowany model latający jest przedstawiony na ilustracji …

//TODO wstawić zdjęcia skończonego modelu

# Działanie w praktyce.

//TODO rozdział uzupełnię po implementacji poprawek sterownika. Najlepiej by udało się wzbić stabilnie w powietrze, ale wiem, że istnieje niezerowe prawdopodobieństwo, że może się to nie udać z nieznanych mi przyczyn.

# Podsumowanie.

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i wykonanie modelu latającego zdalnie sterowanego typu quadcotper. Sterownik lotu i zasadnicze części ramy zostały zaprojektowane prze autora. Dobrano niezbędne części: silniki, śmigła, regulatory obrotów, baterię, aparaturę i odbiornik RC.

W pracy zostały zawarte podstawowe informacje nt. przedmiotu pracy i przegląd zastosowań autonomicznych i sterowanych quadcopterów. Po zapoznaniu się z literaturą naukową przedstawiono uproszczony model matematyczny mechaniki wybranego modelu latającego.

Po zapoznaniu się z istniejącymi rozwiązaniami zaprojektowano model 3D w oprogramowaniu Solidwors2016. Zasadnicze elementy ramy zaprojektowano w sposób dokładny, co umożliwiło ich późniejsze wykonanie za pomocą druku 3D w technologii FDM. Resztę elementów w modelu 3D wykonano w sposób uproszczony z zachowaniem gabarytów i wymiarów podłączeniowych, co umożliwiło dopasowanie wszystkich części już na etapie projektu, bez późniejszych zaskoczeń. Zlutowano również układ sterownika lotu.

Po wykonaniu i połączeniu elementów fizycznych podjęto się implementacji sterownika realizującego wyszczególniony w pracy algorytm sterowania. Przy pierwszym podejściu zauważono błąd w przyjętym algorytmie sterowania, co usprawniono poprzez dołożenie wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego do algorytmu regulacji orientacji. W ten sposób zaimplementowano regulator kaskadowy. … //TODO tu jeszcze coś dodam, gdy skończę implementację poprawek w sterowniku lotu

Zdalnie sterowane wielowirnikowce, w szczególności quadcoptery, dają bardzo rozległe możliwości ich wykorzystania. Ostatecznie się to sprowadza do kreatywności i potrzeb inżyniera projektanta. Rynek quadcopterów rozwija się bardzo intensywnie i regularnie wchodzi w nowe sektory. Z biegiem czasu będzie oddziaływać na coraz to nowe sfery życia współczesnego człowieka.

# Spis ilustracji.

# Spis tabel.

# Bibliografia.

[1] T. Luukkonen, “Modelling and control of quadcopter”, School of Science, Mat-2.4108, Espoo, 22 sierpnia, 2011

[2] A. Gibiansky, “Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control”, źródło internetowe, <http://andrew.gibiansky.com/downloads/pdf/Quadcopter%20Dynamics,%20Simulation,%20and%20Control.pdf>, dostęp 18.12.2016

[3] M Thomas, et al., “Design and analysis of a quadcopter using CATIA”, International Journal of Scientific & Engineering Research, t. 7, wyd. 3, str. 143, 2016

[4] I. Manarvi, et al., “Design and Development of a Quad Copter (UMAASK) Using CAD/CAM/CAE” 2013, Department of Mechanical Engineering, HITEC University, Taxila Education City, Taxila, Pakistan, 2013

[5] A. Bondyra, et al., “A distributed control system for multirotor aerial platforms”, Measurement Automation Monitoring, t. 61, nr 07, str. 343-345, 2015

[6] S Jeremia, E. Kuantama, J. Pangaribuan, “Design and Construction of Remote-Controlled Quad-copter Based on STC12C5624AD”, International Conference on System Engineering and Technology, Indonesia, 2012

[7] E Carelli, et al., “3D-Printed ABS and PLA Scaffolds for Cartilage and Nucleus Pulposus Tissue Regeneration”, International Journal of Molecular Sciences, str. 15122, ISSN 1422-0067, 2015

[8] Grafika: Konfiguracje orientacji quadcoptera, http://ardupilot.org/copter/\_images/MOTORS\_QuadX\_QuadPlus.jpg

[9] How to choose motor and propeller for quadcopter, <https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>, dostęp 22.12.2016

[10] Carbon Fibre Props vs plastic propeller, https://oscarliang.com/carbon-fibre-props-plastic-propeller/, dostęp 22.12.2016

11] Sklep modelarski ABC-RC, <http://abc-rc.pl/quadcopter-s500-pcb>, dostęp: 18.12.2016

[12] Sklep modelarski Pitlab, http://www.pitlab.pl/pitlabsklep/akcesoria-dla-wielowirnikowcow/, dostęp 18.12.2016

[13] Sklep Carbon-CNC, http://www.carbon-cnc.eu/pl/rurki-matowe/11-12x10x1000-splot-ukosny-matowa.html, dostęp 18.12.2016

[14] Sklep modelarski Avifly, https://avifly.pl/pl/regulatory-obrotow-esc/regulator-esc-blheli-emax-12a-fastpwm-multicopter, dostęp 18.12.2016

[15] Ruch drgający, prof. zw. AGH dr hab. Inż. Krzysztof Wierzbanowski <http://www.ftj.agh.edu.pl/~wierzbanowski/R_Harm(7).pdf>, dostęp 18.12.2016

[16] G. Szafranski, R. Czyba, „Different Approaches of PID Control UAV Type Quadrotor”, Proceedings of the International Micro Air Vehicles conference 2011 summer edition, Gliwice, Polska, 2011

# Załączniki.

Repozytorium zawierające napisaną implementację sterownika lotu: https://github.com/lucas93/quadcopter-agh

1. W tym ustawieniu osie x i y układu współrzędnych nie pokrywają się z ramionami quadcoptera, lecz są obrócone względem nich wokół osi z o 45°. Więcej w rozdziale 2.2 [↑](#footnote-ref-1)
2. Moduł radiowy HK-T6A wystawia na piny sygnał wg modulacji położenia impulsu (PPM). Położenie impulsu jest proporcjonalne do wartości sygnału nadawanego przez aparaturę. Położenie impulsów jest obliczane dzięki zastosowaniu timerów wyzwalanych przerwaniami. [↑](#footnote-ref-2)