

**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. Wstęp i cel pracy. 13](#_Toc469405079)

[2. Wprowadzenie w zagadnienie i przegląd zastosowań. 14](#_Toc469405080)

[2.1. Mechanika 15](#_Toc469405081)

[2.1.1. Układ Współrzędnych 15](#_Toc469405082)

[2.1.2. Kinematyka 15](#_Toc469405083)

[2.1.3. Siły i momenty siły 17](#_Toc469405084)

[2.1.4. Momenty bezwładności 18](#_Toc469405085)

[2.1.5. Dynamika 19](#_Toc469405086)

[3. Budowa 20](#_Toc469405087)

[3.1. Rama 21](#_Toc469405088)

[3.2. Sterownik lotu 22](#_Toc469405089)

[3.3. Bateria 23](#_Toc469405090)

[3.4. Kontrolery obrotów 23](#_Toc469405091)

[3.5. Silniki 23](#_Toc469405092)

[4. Projekt. 26](#_Toc469405093)

[5. Realizacja. 26](#_Toc469405094)

[6. Działanie w praktyce. 26](#_Toc469405095)

[7. Podsumowanie. 26](#_Toc469405096)

[8. Spis ilustracji. 27](#_Toc469405097)

[9. Spis tabel. 27](#_Toc469405098)

[10. Bibliografia. 28](#_Toc469405099)

[11. Załączniki. 29](#_Toc469405100)

# Wstęp i cel pracy.

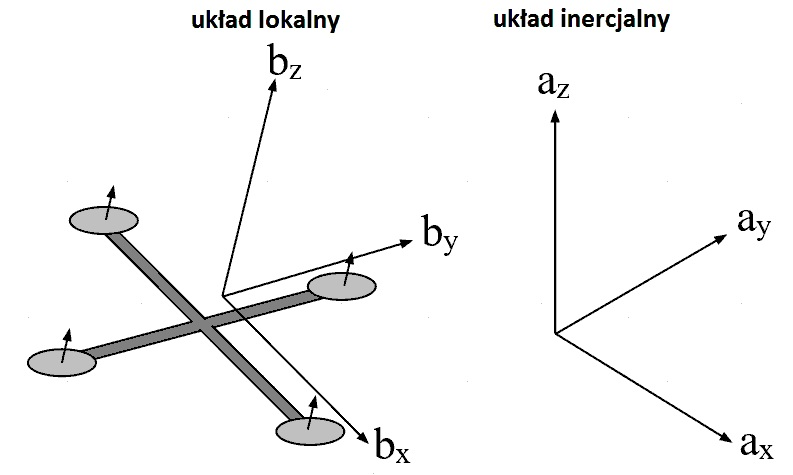
**Część I - teoretyczna**

# Wprowadzenie w zagadnienie i przegląd zastosowań.

Tekst wprowadzenia

## 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 rysunku... //TODO

### 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) |

## Budowa

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.

**Część II – projekt i realizacja**

# Projekt

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

## Konstrukcja

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 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 4.

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



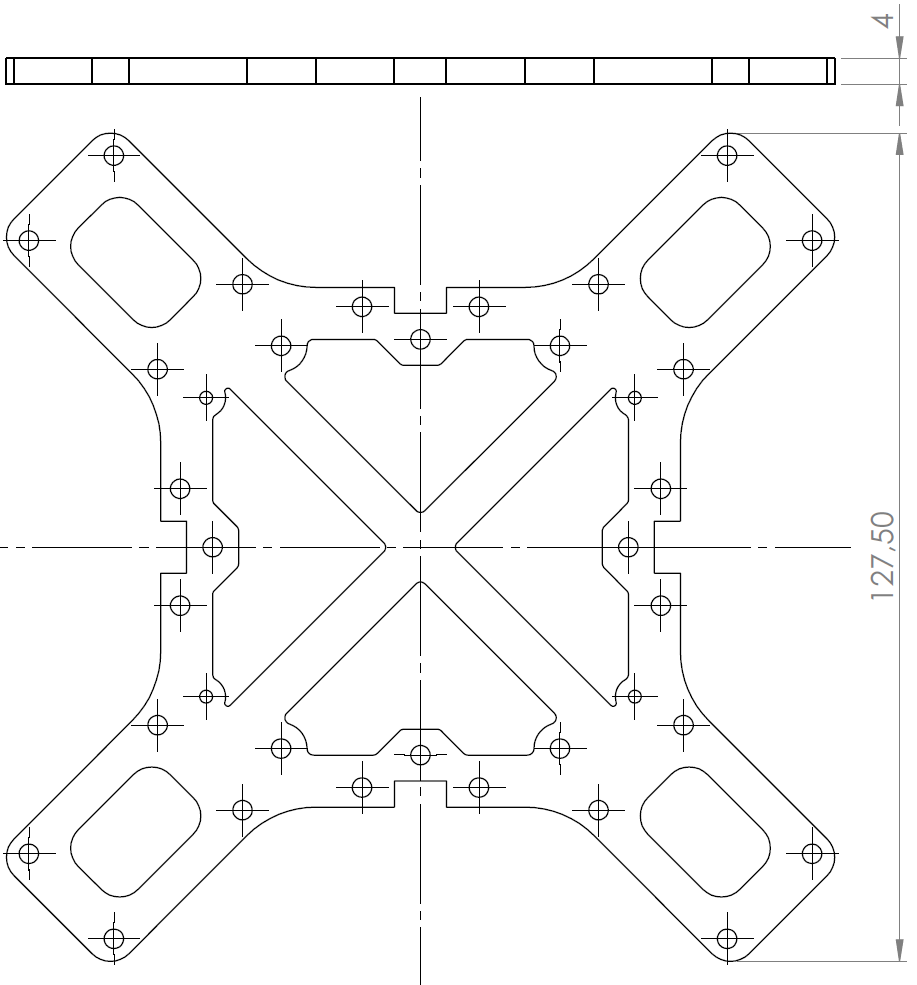
Ilustracja 1: Render zaprojektowanego modelu 3D

### 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.

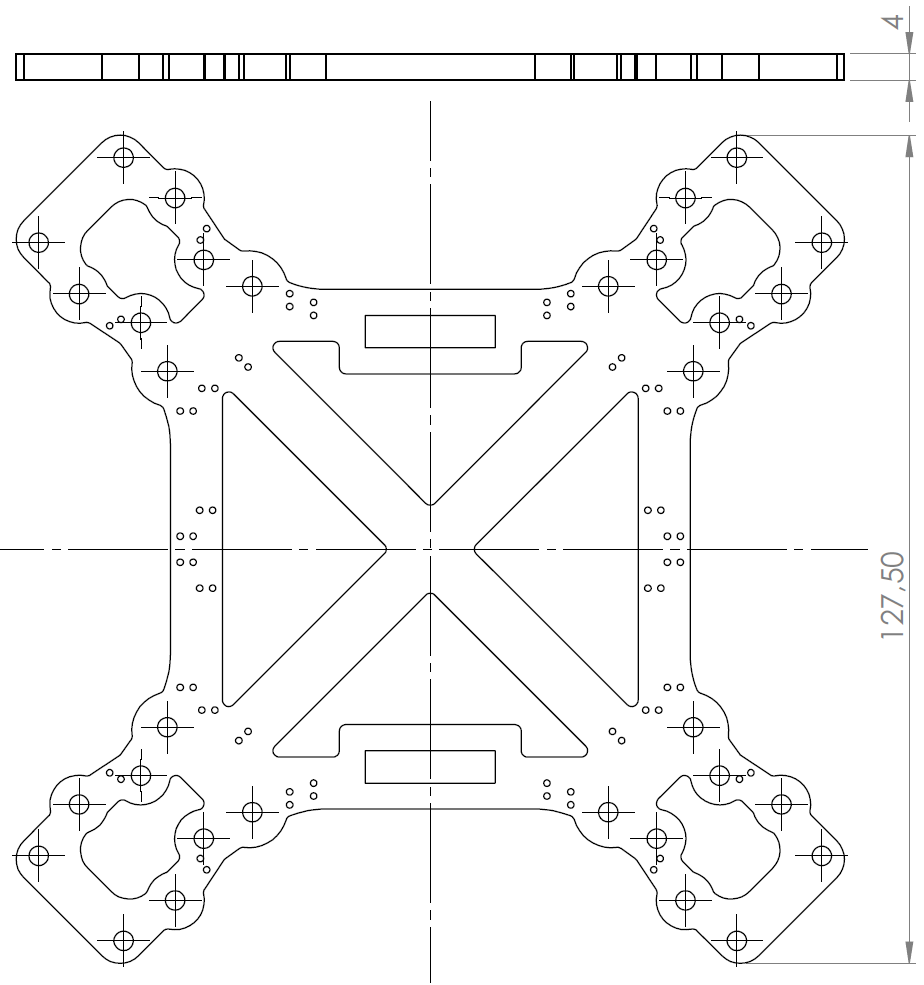


Ilustracja 2: Płytka górna ramy

//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 taka potrzeba



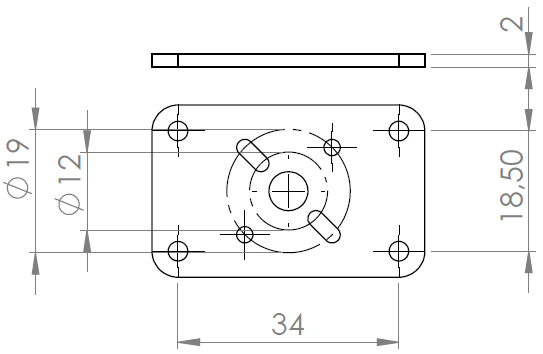
Ilustracja 3: Płytka dolna ramy

//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

### Płytka montażowa silnika

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

Ilustracja 4: 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

# Realizacja.

# Działanie w praktyce.

# Podsumowanie.

# Spis ilustracji.

# Spis tabel.

# Bibliografia.

[1] Luukkonen, 2011

*[2]* Gibiansky, 2012

*[3]* Mathew Thomas, 2016

*[4]* Manarvi, et al., 2013

*[5]* Bondyra, et al., 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

# Załączniki.