

Raport z projektu

CALMAR



AGH

Autorzy:

Michał Frankiewicz

Filip Adamaszek

Paweł Jamro

Spis treści:

Wstęp

Cel i założenia projektu	3
---------------------------------------	----------

Harmonogram pracy nad projektem	4
--	----------

Rozdział I

Przegląd rozwiązań.....	5
--------------------------------	----------

Podrozdział 1.1.O dronach i ich zastosowaniu.....	5
---	---

Podrozdział 1.2. Podział modeli latających ze względu na przeznaczenie...	6
---	---

Podrozdział 1.3. Podział modeli latających ze względu na budowę.....	7
--	---

Rozdział II

Projektowanie modelu latającego.....	8
---	----------

Podrozdział 2.1. Mechanika i dynamika.....	8
--	---

Podrozdział 2.2. Elektronika.....	13
-----------------------------------	----

Podrozdział 2.3. Sterowanie.....	19
----------------------------------	----

Rozdział III

Analiza i interpretacja.....	24
-------------------------------------	-----------

Podrozdział 3.1. Implementacja, testy, modyfikacje.....	24
---	----

Podrozdział 3.2. Przedstawienie finalnej wersji modelu.....	25
---	----

Zakończenie

Wnioski/Podsumowanie	27
-----------------------------------	-----------

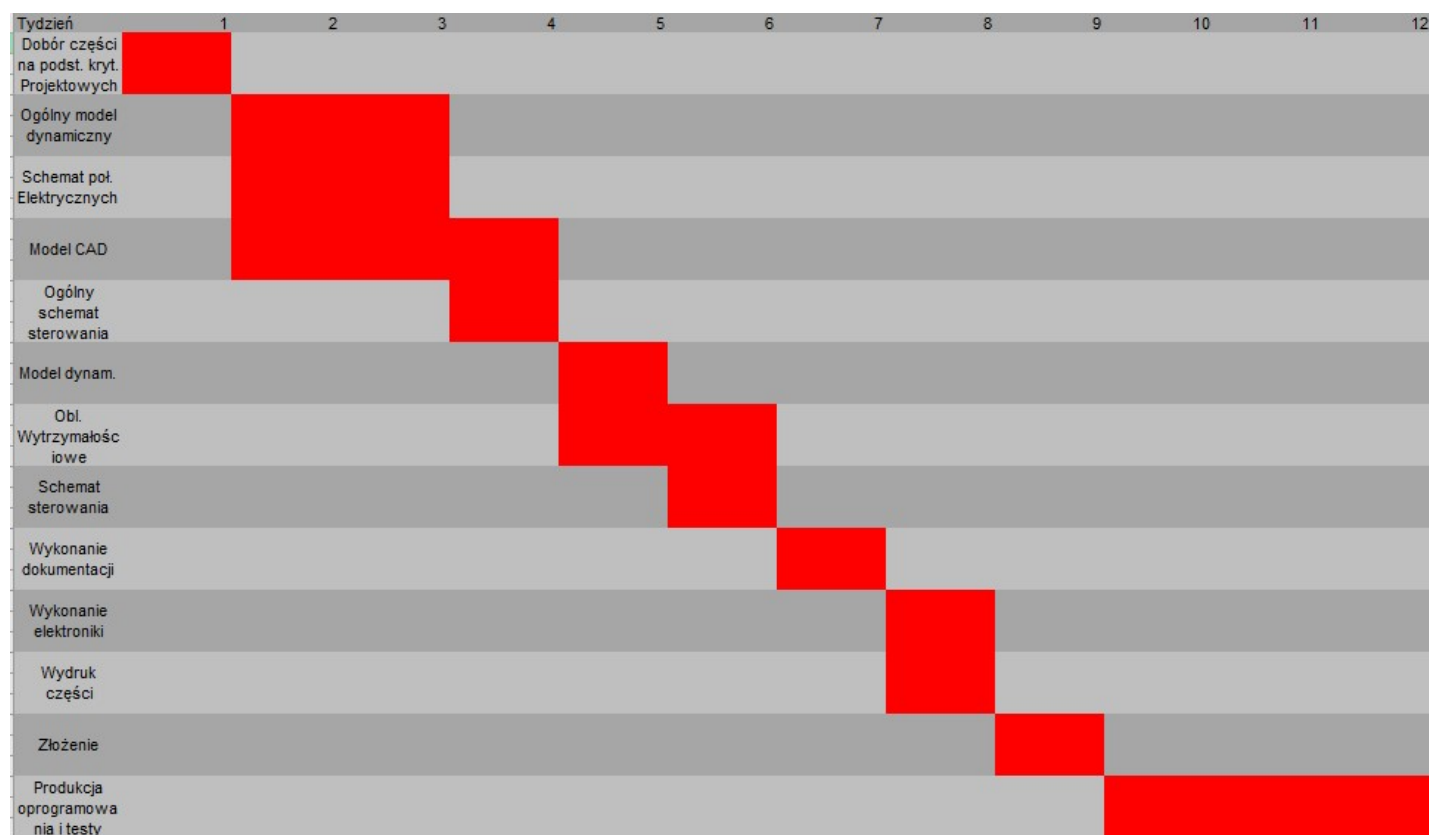
Bibliografia/Wykaz literatury	28
--	-----------

Cel i założenia projektu

Celem projektu jest wykonanie czterorotorowego modelu latającego wyposażonego w system stabilizacji lotu. Wydawanie poleceń będzie odbywać się za pomocą specjalnie przygotowanego i wyposażonego we wszystkie potrzebne elementy nadajnika. Wykorzystana będzie komunikacja radiowa ze względu na duży zasięg komunikacji i sporą niezawodność przy stosunkowo niskich kosztach. Model latający będzie zaprojektowany przy wykorzystaniu oprogramowania SolidWorks i wykonany w głównej mierze dzięki technologii druku 3D. Głównymi założeniami produkcyjnymi jest niska masa, niewielkie gabaryty modelu, ekonomiczność, a także intuicyjność i komfort użytkowania.

My zdecydowaliśmy się zaprojektować, złożyć i zaprogramować Quadrocopter RPV.

Harmonogram pracy nad projektem



Początek pracy: Marzec 2019

Koniec pracy: Czerwiec 2019

Rozdział 1. Przegląd rozwiązań

Podrozdział 1.1 O dronach i ich zastosowaniu.

Drony - są bezzałogowymi statkami latającymi. Początkowo wykorzystywano je tylko do celów militarnych do obserwowania i wykonywania działań wojskowych, następnie znalazły także zastosowanie w:

- celach cywilnych do badania trudno dostępnych terenów,
- celach komercyjnych do filmowania i fotografowania,
- celach rekreacyjnych jako zabawki.

Drony a prawo

W Polsce każdy może mieć drona pod warunkiem, że lata on w zasięgu wzroku jego użytkownika oraz poza przestrzenią powietrzną kontrolowaną czy strefą D, P i R. Poza tym obowiązują pewne ograniczenia w tym zakresie. W przypadku dronów cięższych niż 25 kg trzeba posiadać pozwolenie na lot w kategorii specjalnej. Samolot musi też znajdować się w zasięg wzroku jego operatora. Urządzenie powinno również przechodzić badania techniczne. Osoby wykonujące odpłatne usługi za pomocą drona muszą też uzyskać świadectwo kwalifikacji, wykupić ubezpieczenie OC oraz przejść odpowiednie badania lekarskie.

Nazewnictwo modeli latających

RPV (Remote Piloted Vehicle) - modele sterowane za pomocą kontrolera

RC FPV (First Person View) - urządzenia zdalnie sterowane z kamerą

UAV - urządzenia sterowane za pomocą komputera, można też w ich przypadku z góry zaprogramować trasę

Podrozdział 1.2 Podział dronów ze względu na przeznaczenie.

Ze względu na przeznaczenie wyróżniamy następujące rodzaje dronów:

a) **Rekreacyjne** - modele do nauki latania, do zabawy - idealne jako pierwszy model latający.



b) **Profesjonalne** - profesjonalne modele z GPsem, stabilizacją kamery firm takich jak DJI, Yuneec, Parrot.



c) **Przemysłowe**-specjalistyczne modele przemysłowe przeznaczone do zadań specjalnych



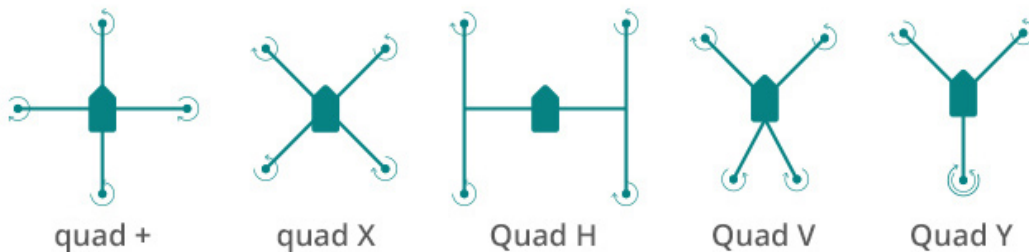
Podrozdział 1.3 Podział modeli latających ze względu na budowę.

Pod względem układów śmigieł w stosunku do kierunku lotu wyróżnia się natomiast pięć typów:

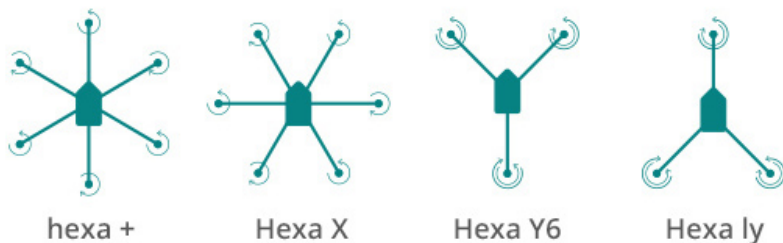
- + - jedno śmigło jest wiodące (przy co najmniej 4 śmigłach),
- X – najczęstsza konstrukcja, dwa śmigła są wiodące (przy parzystej liczbie śmigieł),
- Y – trzy ramiona ułożone w znak Y, jedno lub dwa ramiona mogą być wiodące,
- V – bardzo rzadki układ, gdzie dwa śmigła prowadzą na wyciągniętych ramionach,
- H – bardzo rzadki układ, gdzie konstrukcja opiera się na kształcie litery H, z dwoma śmigłami prowadzącymi

Ze względu na budowę wyróżniamy następujące typy modeli:

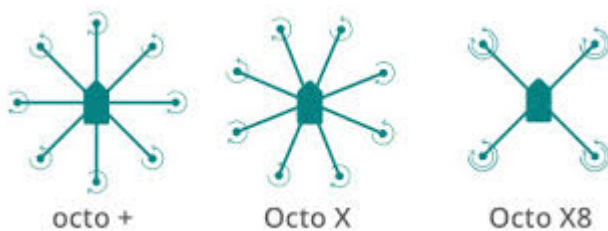
- a) **Quadcoptery** - najpopularniejsze modele z czterema śmigłami, wykorzystywane jako zabawka lub w celach komercyjnych.



- b) **Hexacoptery** - maszyny profesjonalne z sześcioma śmigłami, często stosowane do nagrywania filmów.



- c) **Octocoptery** - posiadają 8 wirników.

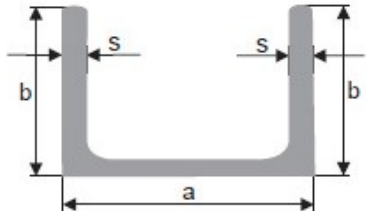


Rozdział 2. Projektowanie modelu latającego

Podrozdział 2.1 Mechanika i dynamika

a) Dobrane części:

- Ceownik wykonany z aluminium 20x10x2



- Silnik BLDC 2200 (obr/min)/V



Dane techniczne	
Liczba Cel	2 - 3 Li-Poly
Kv	5 - 7 NiCd/NiMH
Max wydajność	2200 RPM/V
Maksymalna wydajność prądowa	75%
Prąd bez obciążenia:	14 - 22A (>72%)
Opór	1.4A @10V
Prąd MAX	0.045 ohms
Watt	28A for 60S
Waga	220W
Wymiary	51.5 g / 1.82 oz
Średnica wału	27.8 mm x 31 mm
Bieguny	3.2 mm
Waga modelu	14
	300 - 1000g / 10.5 - 35 oz

- Śmigła prawe i lewe 5.5x5 cali



- Szpula filamentu PLA



b) Budowa quadrocoptera i model CAD wykonany za pomocą oprogramowania SolidWorks

Elementy z jakich składa się dron:

1) **Rama** - Szkieletem całej konstrukcji multikoptera jest rama. Jest bazą do której przymocowane są pozostałe części. Rama musi być dostosowana rozmiarem do ciężaru jaki ma unieść.

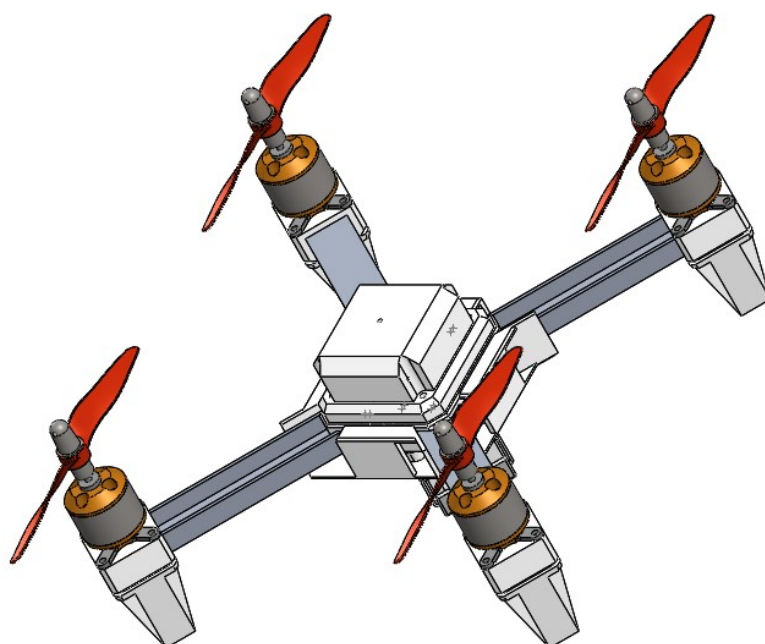
2) **Silniki i śmigła** - Są chyba najważniejszymi elementami dronów, ponieważ stanowią główny system napędowy. Na nich spoczywa też całe obciążenie. Toteż każdy gram modelu jest dźwigany przez łopaty śmigieł. Im większe łopaty tym większą siłę nośną wytworzą. Im większe śmigła z kolei, tym silniejszy powinien być silnik, żeby mógł osiągnąć moment obrotowy, niezbędny do wprowadzenia śmigieł w ruch.

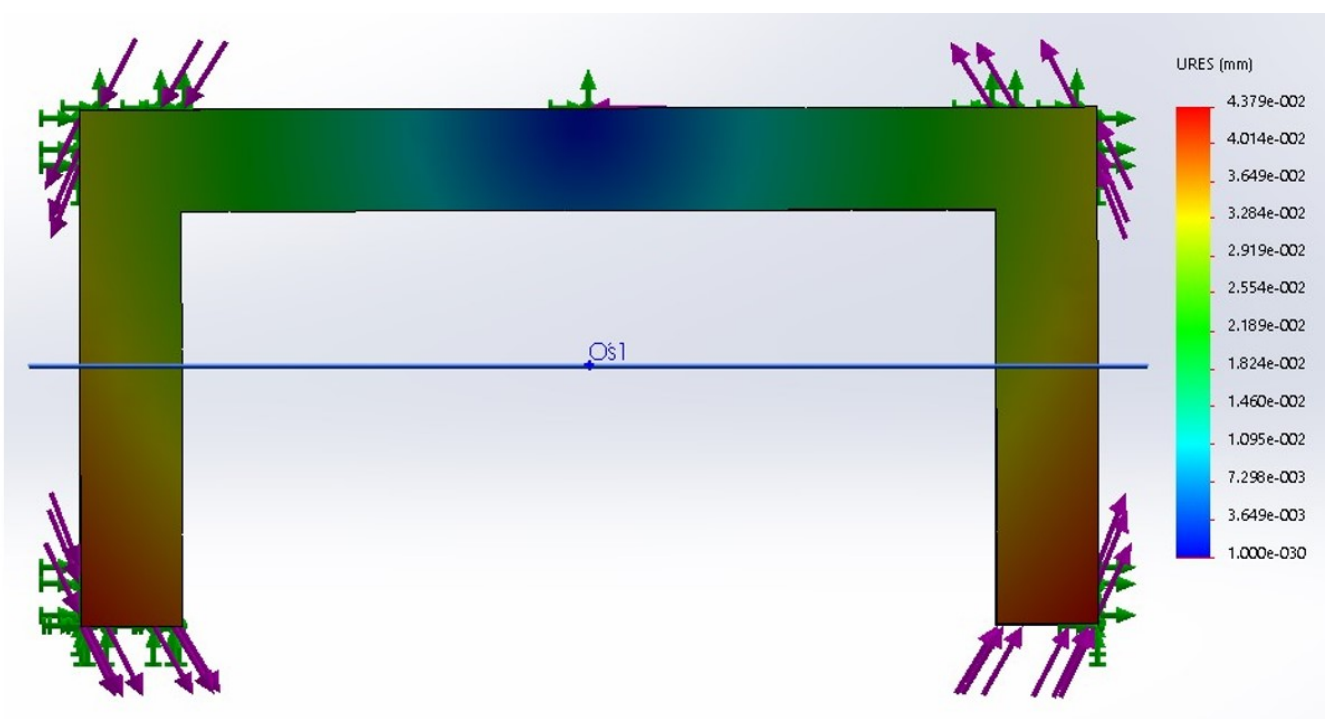
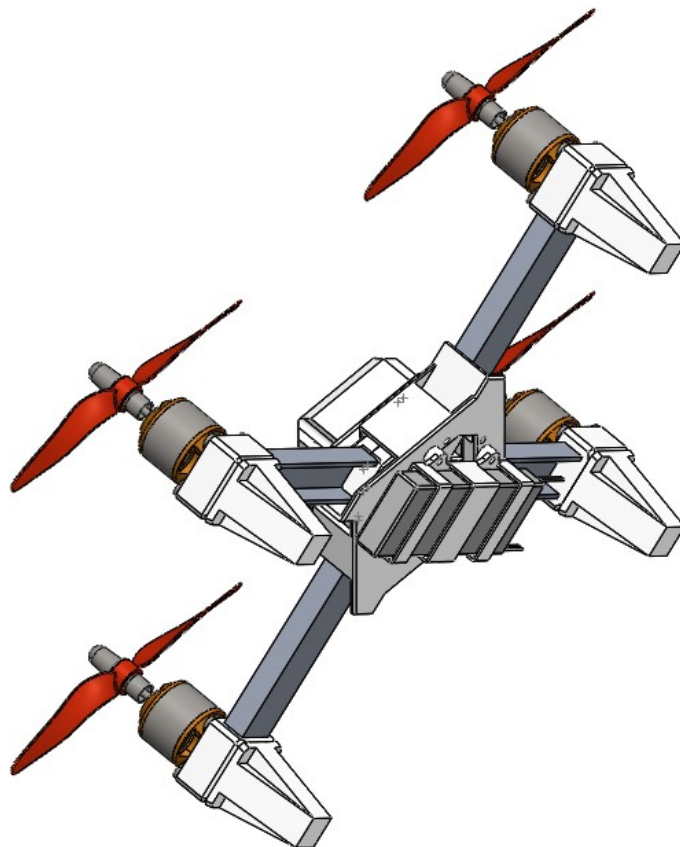
3) **Regulatory obrotów silnikowych (ESC)**– czyli elektroniczna kontrola prędkości. Pozwala na kontrolowanie silnika w zakresie kierunku obrotów, hamulca i zakresie obrotów

4) **Akumulator** - z którego czerpiemy prąd do latania. Wybór akumulatora powinien być podyktowany rodzajem silników, śmigieł a także wszystkimi elementami, które składają się na całkowitą masę naszego multikoptera. Od dobrze dobranego akumulatora zależy długość lotu na jaki będziemy mogli sobie pozwolić.

5) **Aparatura sterująca**– czyli nadajnik i odbiornik zdalnego sterowania. Potocznie nazywana radiem lub pilotem – stanowi niezbędny element będący naszym łącznikiem z dronem. Nadajnik trzyma w dłoni sterująca osoba i wysyła sygnał do odbiornika zamontowanego w latającym kopterze. Powinna posiadać przyjazny interfejs, żebyśmy mogli łatwo i intuicyjnie sterować naszą maszyną.

Przygotowany przez nas model CAD:





Wizualizacja odkształcenia elementów w wyniku działania momentu skręcającego.

Model poza wcześniej wymienionymi elementami, które zostały zakupione, składa się z kilku elementów wydrukowanych za pomocą technologii 3D FDM/FFF z filamentu PLA:

- mocowania silników
- nogi Quadrocoptera
- dwuczęściowy łącznik centralny
- mocowanie baterii
- mocowanie ESC

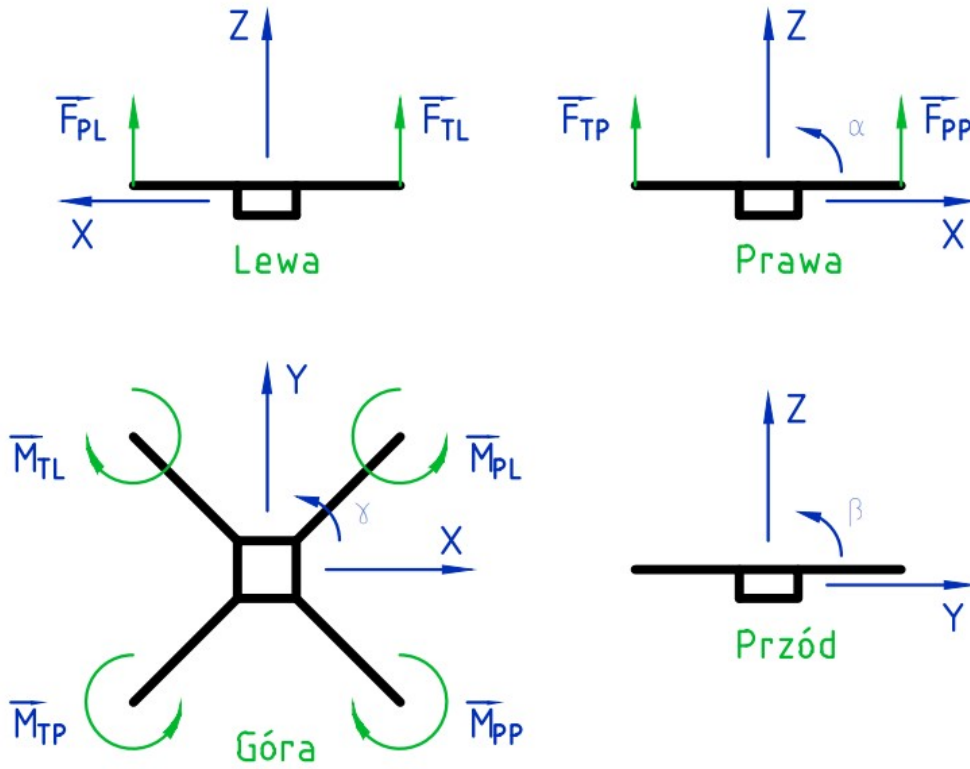
FDM / FFF – drukowanie z polimerów termoplastycznych, poprzez doprowadzenie tworzywa do postaci półpłynnej. Proces rozgrzewania odbywa się w głowicy drukującej, która pobiera je w postaci żyłki. Warstwy są nakładane najpierw w osiach XY, a gdy drukarka 3D skończy je układać, głowica albo się podnosi do góry, albo stół roboczy opuszcza się w dół o wysokość warstwy i nakładana jest kolejna warstwa. Półpłynne tworzywo sztuczne spaja się pod wpływem wysokiej temperatury i szybko zastyga tworząc (niemalże) jednolitą strukturę. Różnica w nazewnictwie (FDM / FFF) wynika z faktu, że FDM jest nazwą handlową zastrzeżoną przez twórcę tej technologii – firmę Stratasys.

Filament PLA – jeden z dwóch najpopularniejszych materiałów do druku 3D w technologii FDM. W odróżnieniu od ABS, PLA jest biodegradowalny i wywodzi się z naturalnych składników takich jak skrobia kukurydziana czy trzcina cukrowa (dzięki czemu zasłużył sobie na miano zielonego plastiku). Materiał nie wydziela tak szkodliwych oparów podczas procesu drukowania jak inne tworzywa sztuczne, dlatego może być stosowany w pomieszczeniach w których przebywają ludzie np. podczas zajęć edukacyjnych w szkołach. Niemniej jednak pomieszczenie w którym odbywa się drukowanie, wciąż musi być wentylowane.

Jego cechy charakterystyczne to:

- idealny do wydruków o charakterze pokazowym, prototypów – również w dużych rozmiarach,
- nieduży skurcz materiału – podgrzewany stół nie jest koniecznością,
- dobra wytrzymałość (jednak mniejsza niż w przypadku ABS),
- możliwość odkształceń pod wpływem wysokich temperatur,
- ograniczona elastyczność,
- stosunkowo niska temperatura druku (180-220°C),
- jest nierozpuszczalny.

d) Dynamika modelu



$$\begin{cases} I_\alpha \ddot{\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{4} (F_{TP} + F_{TL} - F_{PP} - F_{PL}) \\ I_\beta \ddot{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{4} (F_{PL} + F_{TL} - F_{PP} - F_{TP}) \\ I_\gamma \ddot{\gamma} = c(F_{TP} - F_{TL} + F_{PL} - F_{PP}) \end{cases} \quad \begin{cases} M_{TP} = cF_{TP} \\ M_{TL} = cF_{TL} \\ M_{PP} = cF_{PP} \\ M_{PL} = cF_{PL} \end{cases}$$

$$\ddot{\alpha} I_x = a(P_1 + P_2 - P_3 - P_4)$$

$$\ddot{\beta} I_y = a(-P_1 + P_2 + P_3 - P_4)$$

$$\ddot{\gamma} I_z = (-M_1 + M_2 - M_3 + M_4)$$

$$\ddot{\alpha} I_x = 4acx_b \quad x_b \in \langle -5; 5 \rangle [\%]$$

$$\ddot{\beta} I_y = 4acy_b \quad y_b \in \langle -5; 5 \rangle [\%]$$

$$\ddot{\gamma} I_z = 4kz_b \quad z_b \in \langle -5; 5 \rangle [\%]$$

r – długość ramion [m]

c – przelicznik pwm \rightarrow siła ciągu $\left[\frac{N}{\%} \right]$

k – przelicznik pwm \rightarrow moment ciągu $\left[\frac{Nm}{\%} \right]$

$$P_1 = c(w + x_b - y_b - z_b)$$

$$P_2 = c(w + x_b + y_b + z_b)$$

$$P_3 = c(w - x_b + y_b - z_b)$$

$$P_4 = c(w - x_b - y_b + z_b)$$

$$M_1 = k(w + x_b - y_b - z_b)$$

$$M_2 = k(w + x_b + y_b + z_b)$$

$$M_3 = k(w - x_b + y_b - z_b)$$

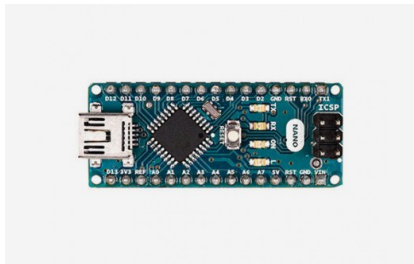
$$M_4 = k(w - x_b - y_b + z_b)$$

$$a = \frac{r}{\sqrt{2}}$$

Podrozdział 2.2 Elektronika

a) Dobrane części

- 2x Arduino Nano



Arduino to moduły z mikrokontrolerami, które programuje się w bardzo łatwy sposób, z wykorzystaniem ogólnodostępnych bibliotek, w języku zbliżonym do C/C++.

- Moduł radiowy nRF24L01 PA+LNA 2.4 GHz + antena



- Moduł radiowy nRF24L01 2.4GHz



Układ komunikuje się z zarządzającym nim kontrolerem za pomocą szeregowego interfejsu SPI (piny MISO, MOSI, CLK). Transmisja ma charakter pół-duplexowy (ang. *half-duplex*) – tzn. na raz dane przesyła tylko jedno z urządzeń.

- 2x Rejestry SIPO i 2x Rejestry PISO

Rejestr przesuwający (ang. shift register) jest rejestrem zbudowanym z przerzutników połączonych ze sobą w taki sposób, iż w takt impulsów zegarowych przechowywana informacja bitowa przemieszcza się (przesuwa) do kolejnych przerzutników. Rejestry przesuwające mogą być budowane z przerzutników synchronicznych D, RS, JK.

Rejestry różnią się przede wszystkim sposobem wprowadzania i wyprowadzania pamiętanej informacji. Pod tym względem można je podzielić na:

- PIPO (Parallel In Parallel Out)**- rejestry równoległe umożliwiające równoległe wprowadzanie i wyprowadzanie informacji (jednocześnie ze wszystkich i do wszystkich pozycji rejestru) PIPO – Parallel In Parallel Out
- SISO (Serial In Serial Out)** - rejestry szeregowo umożliwiające szeregowe wprowadzanie i wyprowadzanie informacji, tzn. kolejno bit po bicie
- SIPO (Serial In Parallel Out)**- szeregowo-równoległe umożliwiające szeregowe wprowadzanie i równoległe wyprowadzanie informacji
- PISO (Parallel In Serial Out)** - równoległo-szeregowe umożliwiające równoległe wprowadzanie i szeregowe wyprowadzanie informacji,

- 2 cyfrowy wyświetlacz 7 segmentowy



- Przyciski
- Diody LED
- ESC dla każdego z silników BLDC



ESC (Electronic Speed Controller) Elektroniczny regulator prędkości – pozwala na kontrolowanie silnika w zakresie kierunku obrotów, hamulca i zakresie obrotów. Jest on nazywany popularnie regulatorem. Ze względu na budowę wyróżniamy regulatory do silników szczotkowych i bezszczotkowych a jeśli chodzi o oprogramowanie to podział jest następujący: na regulatory do helikopterów, wielowirnikowców, aut, łodzi, samolotów.

- Akumulator 7.4V 2200mAh Li-Po



- Baterie 3x1.5V
- Żyroskop/Akcelerometr MPU 6050

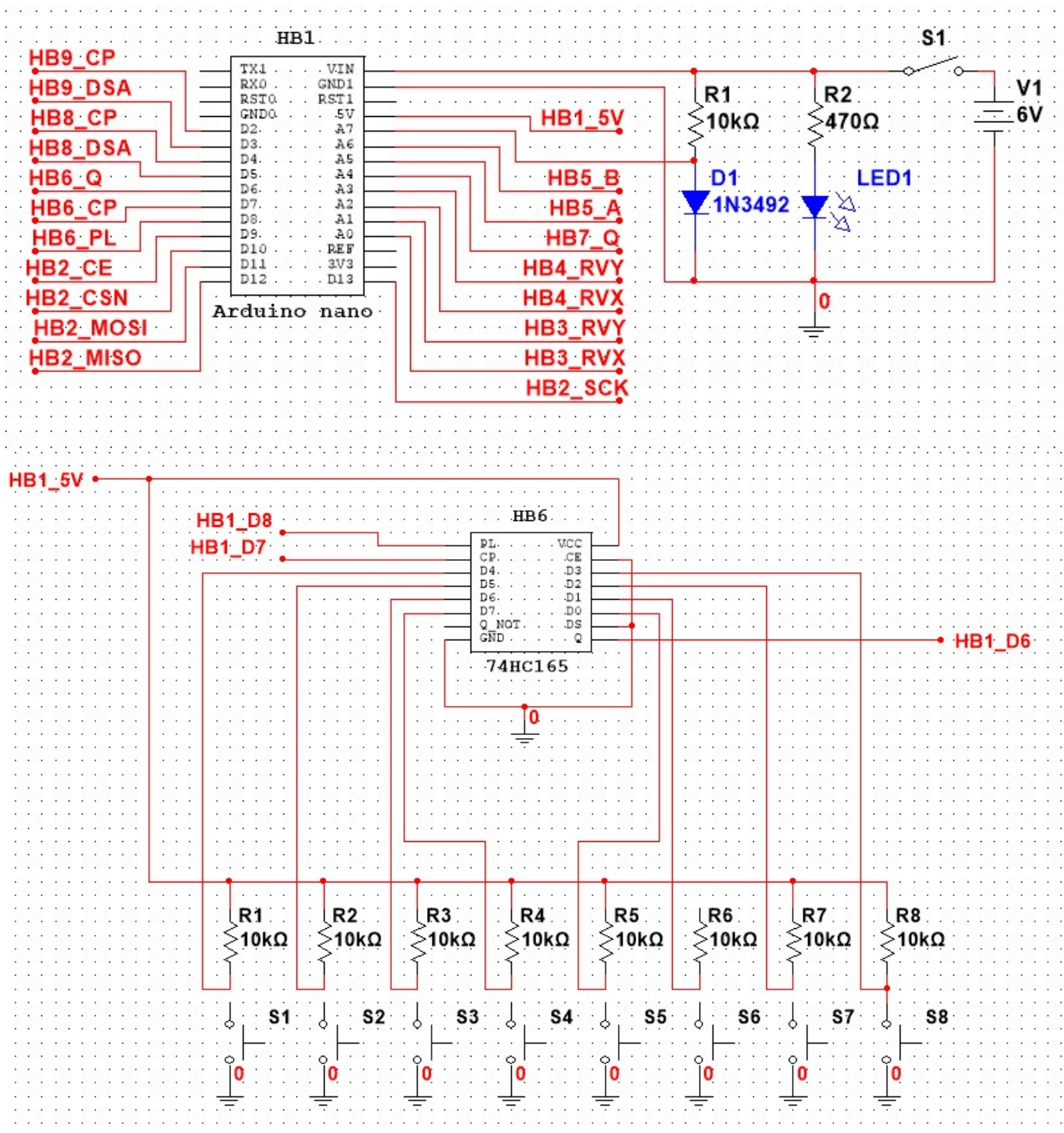
Żyroskop/Akcelerometr MPU 6050 - czujnik do pomiaru przyspieszeń oraz prędkości kątowej w trzech osiach. Jest połączeniem 3-osiowego akcelerometru i żyroskopu. Charakteryzuje się prostą obsługą, komunikuje się poprzez magistralę I2C.

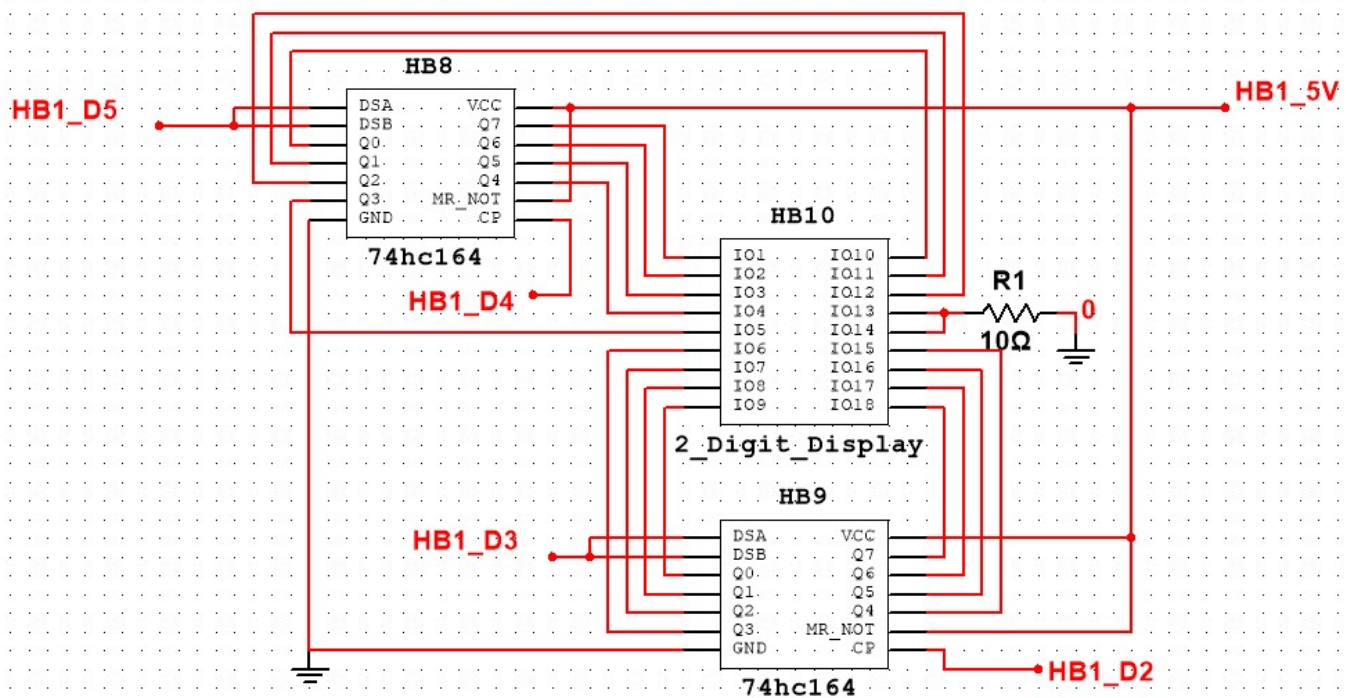
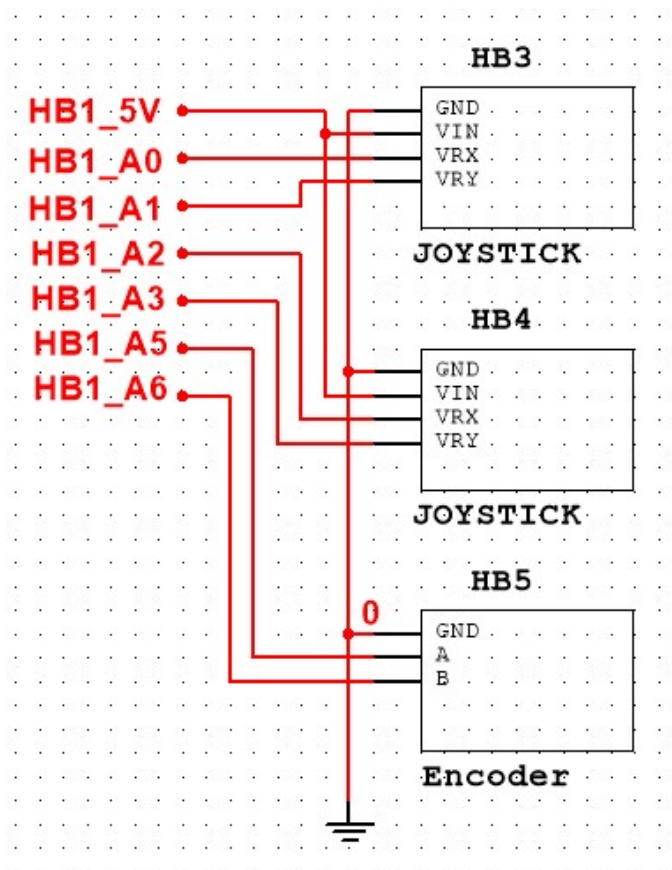


- Enkoder inkrementalny - przetwornik, którego zadaniem jest generowanie impulsów (przyrosty kątowe) odpowiadających ruchowi obrotowemu
- 2 Joysticki
- Regulator napięcie wraz filtrem dolnoprzepustowym dla modułu nrf24L01 z anteną

b) Schematy elektroniczne

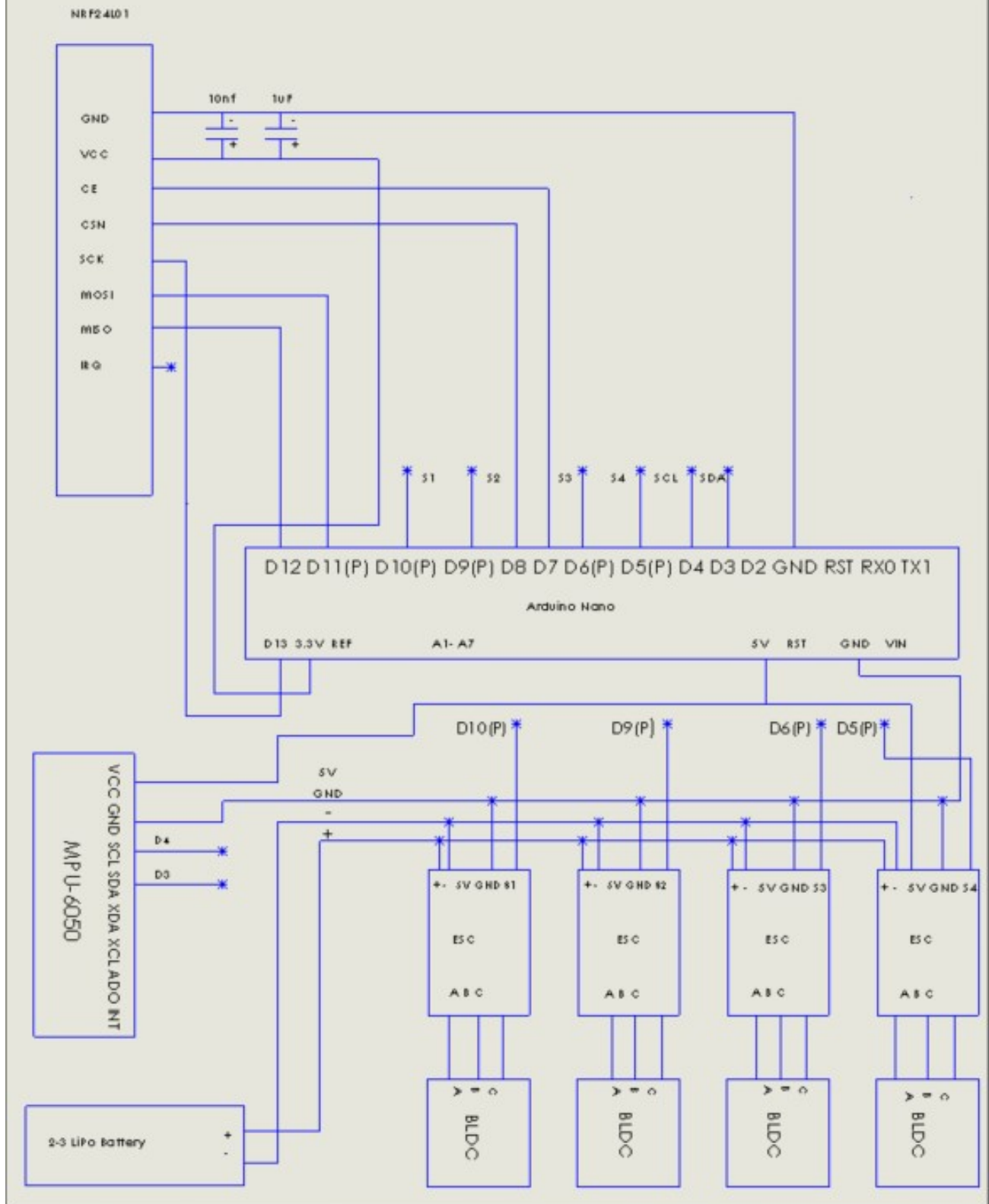
- Kontroler





- Układ elektroniczny Quadrocoptera

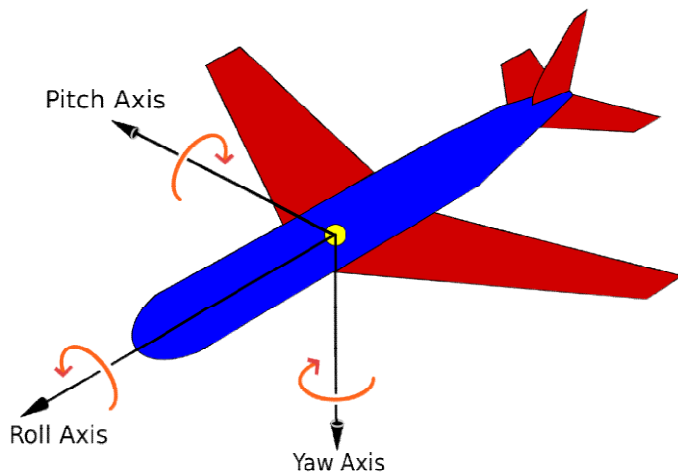
Układ elektroniczny nr 2.



Podrozdział 2.3 Sterowanie

a) Oprogramowanie akcelerometr i żyroskop

Zadaniem akcelerometru jest zmierzenie przyspieszenia wynikającego z siły grawitacyjnej. Kierunek przyspieszenia, pozwala na ustalenie pozycji względem ziemi. Żyroskop ma za zadanie ustalić pochylenie, przechylenie oraz odchylenie drona.



Odczyt kątów RPY i prędkości:

$$\begin{aligned}
 R_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix} & R_y &= \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix} & R_z &= \begin{bmatrix} C\gamma & -S\gamma & 0 \\ S\gamma & C\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 R &= R_x \cdot R_y \cdot R_z \\
 &= \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & -C\beta S\gamma & S\beta \\ C\alpha S\gamma + C\gamma S\alpha S\beta & C\alpha C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\beta \\ S\alpha S\gamma - C\alpha C\gamma S\beta & C\gamma S\alpha + C\alpha S\beta S\gamma & C\alpha C\beta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} -\sin(\beta) \\ \cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \alpha_A &= \text{atan2}\left(\frac{a_y}{-a_z}\right) \\ \beta_A &= \text{asin}(-a_x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \vec{\varphi} &= \Delta \vec{\varphi}_x + \Delta \vec{\varphi}_y + \Delta \vec{\varphi}_z & \Delta \vec{\omega} &= \Delta \vec{\omega}_x + \Delta \vec{\omega}_y + \Delta \vec{\omega}_z & \vec{X} &= R * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \Delta \alpha_G &= \vec{X} \cdot \Delta \vec{\varphi} & \Delta \omega_x &= \vec{X} \cdot \Delta \vec{\omega} & \vec{Z} &= R * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \Delta \beta_G &= \vec{Y} \cdot \Delta \vec{\varphi} & \Delta \omega_y &= \vec{Y} \cdot \Delta \vec{\omega} & \vec{Y} &= R * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \Delta \gamma_G &= \vec{Z} \cdot \Delta \vec{\varphi} & \Delta \omega_z &= \vec{Z} \cdot \Delta \vec{\omega}
 \end{aligned}$$

Łączenie akcelerometru z żyroskopem

$$\alpha_{i+1} = (1 - k)\alpha_A + k(\alpha_i + \Delta\alpha_G)$$

$$\beta_{i+1} = (1 - k)\beta_A + k(\beta_i + \Delta\beta_G)$$

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i + \Delta\gamma_G$$

Program do obsługi żyroskopu przedstawia się następująco:

Komunikacja z modulem:

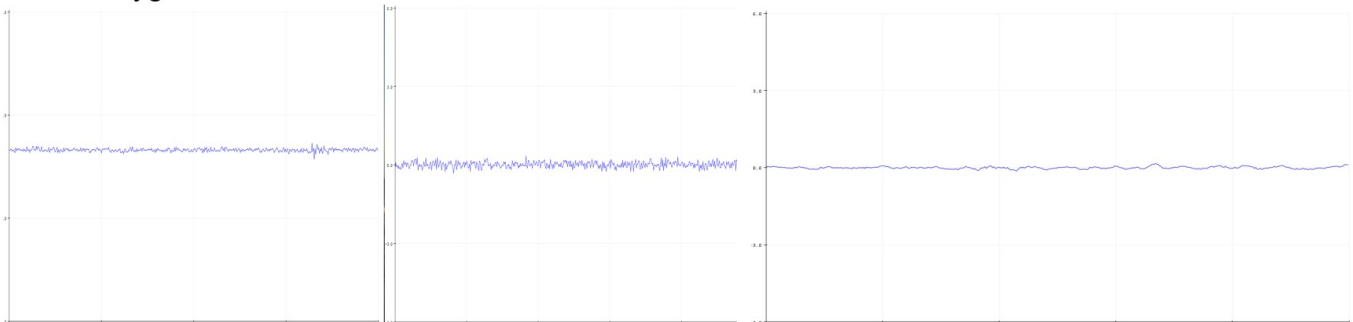
```
void readGyro()
{
  Wire.beginTransmission(MPU_adr);
  Wire.write(0x3B);
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(MPU_adr, 14, true);
  AcX = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) * 9.81 / 16384 - AcXoffset;
  AcY = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) * 9.81 / 16384 - AcYoffset;
  AcZ = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) * 9.81 / 16384 - AcZoffset;
  Tmp = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read());
  GyX = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 131 * DEG_TO_RAD - GyXoffset;
  GyY = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 131 * DEG_TO_RAD - GyYoffset;
  GyZ = (float)(Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 131 * DEG_TO_RAD - GyZoffset;

  filterAcc();
  calcRPY();
}
```

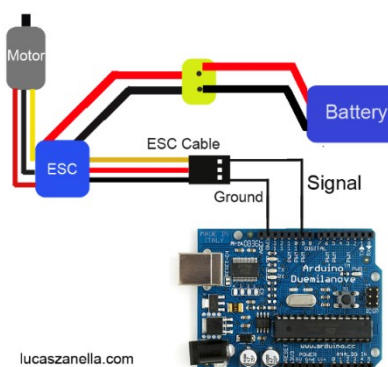
Filtr dolnoprzepustowy (ang. low-pass filter) – układ elektroniczny, akustyczny lub inny element przetwarzający sygnał (np. odpowiedni algorytm), który przepuszcza częstotliwości sygnału poniżej ustalonej częstotliwości granicznej

Kalibracja – odejmowanie wartości średniej od sygnału

Filtracja – filtr uśredniający (wyłącznie do przyspieszeń)

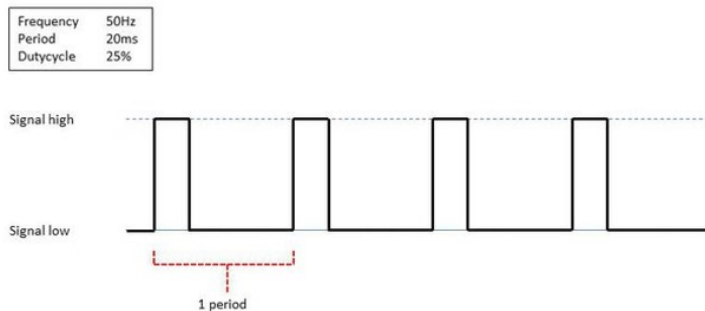


b) Sterowanie silnikami



PWM (Pulse-Width Modulation) – metoda regulacji sygnału prądowego lub napięciowego, o stałej amplitudzie i częstotliwości, polegająca na zmianie wypełnienia sygnału, używana w zasilaczach impulsowych, wzmacniaczach impulsowych i układach sterujących pracą silników elektrycznych. Układ PWM zasila urządzenie bezpośrednio lub przez filtr dolnoprzepustowy wygładzający zmiany natężenia prądu elektrycznego i napięcia.

$1000\mu s \rightarrow 0\%$
 $2000\mu s \rightarrow 100\%$
 $f = 50Hz$



Program do sterowania silnikami przedstawia się następująco:

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo ESC1,ESC2;  
int powV, difV;
```

```
void setup()
```

```
{  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.print("Start\n");
```

```
  ESC1.attach(3,1000,2000);  
  ESC2.attach(5,1000,2000);  
}
```

```
void loop()
```

```
{  
  powV = analogRead(A0);  
  powV = map(powV, 0, 1023, 0, 200);  
  difV = analogRead(A1);  
  difV = map(difV, 0, 1023, -100, 100)*powV/200;
```

```
  ESC1.write(powV+difV);  
  ESC2.write(powV-difV);  
}
```

2 rotory:

$$F_{1,2} = F_g/2*(1 \pm a)$$

4 rotory:

$$F_{1,2,3,4} = F_g/4*(1 \pm a_r \pm a_p \pm a_y)$$

c) Dobór regulatora PD

Regulator – jeden z elementów składających się na obwód regulacji. Zadanie regulatora polega na wygenerowaniu odpowiedniego sygnału sterującego, tak aby obiekt sterowany zachowywał się w pożądanym sposób (na przykład w jak najkrótszym czasie osiągał wartość zadaną). Regulator służy do doprowadzenia obiektu dożądanego stanu lub poprawy niekorzystnych właściwości obiektu regulowanego. Regulator może przykładowo poprawić dynamikę regulowanego obiektu (np. silnik będzie szybciej osiągał żądaną prędkość). Niewłaściwe jego zastosowanie może prowadzić do niestabilności obwodu regulacji.

Działanie proporcjonalne: Działanie to zmniejsza uchyb regulacji w stanie ustalonym, nieznacznie wpływa na skrócenie czasu regulacji (zwiększa prędkość odpowiedzi) i zwiększa przeregulowanie.

Działanie całkujące: Działanie likwiduje błędy statyczne. Ujemnym skutkiem samej składowej całkującej jest wydłużenie czasu regulacji. W naszym wypadku zastosowanie tej składowej regulatora nie było uzasadnione ze względu na „całkującą naturę obiektu”.

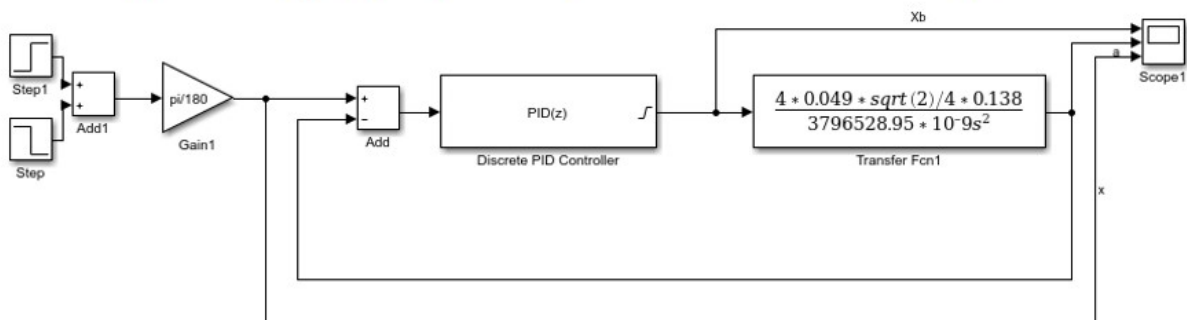
Działanie różniczkujące: Działanie to nie wpływa na uchyb regulacji w stanie ustalonym, wpływa na skrócenie czasu regulacji i zmniejsza przeregulowanie.

Schemat regulatora przygotowany w pakiecie Simulink w programie Matlab:

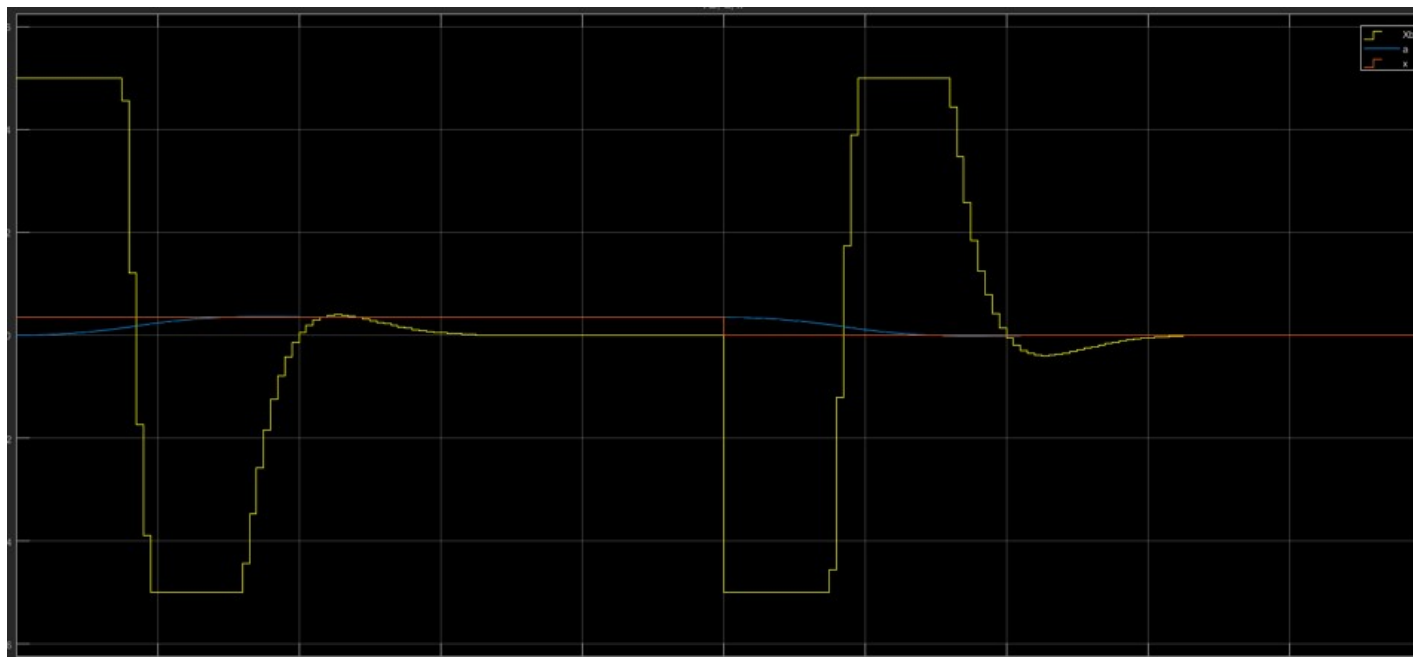
$$P + I \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} + D \cdot \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z}$$

$$\begin{aligned} P &= 110 \\ D &= 10 \\ T_s &= 0.01 \end{aligned}$$

$$Z^{-1} \left[\left(P + \frac{D * (z - 1)}{T_s * z} \right) * U(z) \right] = P * U(t_i) + \frac{U(t_i) - U(t_{i-1})}{h} * D$$



Efekt działania regulatora po doborze odpowiednich parametrów:



Implementacja regulatora w kodzie:

```
void setPWMfill(Vec b)
{
    PWMfill[0] = Map(power+b.x-b.y-b.z,0,100,1000,2000);
    PWMfill[1] = Map(power+b.x+b.y+b.z,0,100,1000,2000);
    PWMfill[2] = Map(power-b.x+b.y-b.z,0,100,1000,2000);
    PWMfill[3] = Map(power-b.x-b.y+b.z,0,100,1000,2000);

    for(int i=0; i<4; i++){
        motors[i].writeMicroseconds(PWMfill[i]);
    }
}

Vec calcBalances()
{
    Vec b(0,0,0);
    Vec error = desiredState-state;

    b.x = PID[1]*error.x - PID[0]*Gy.x - PID[2]*(Gy.x-prevGy.x)/loop_time*1000000;;
    if(abs(b.x)>10) b.x = 10 * ((float)(b.x>0)*2-1);
    b.y = PID[1]*error.y - PID[0]*Gy.y - PID[2]*(Gy.y-prevGy.y)/loop_time*1000000;;
    if(abs(b.y)>10) b.y = 10 * ((float)(b.y>0)*2-1);
    b.z = PID[4]*error.z - PID[4]*Gy.z - PID[5]*(Gy.z-prevGy.z)/loop_time*1000000;
    if(abs(b.z)>10) b.z = 10 * ((float)(b.z>0)*2-1);

    prevError = error;
    prevGy = Gy;
    return b;
}
```

Funkcja calcBalances() kalkuluje 3 zmienne pochodzące z 3 regulatorów PID dla osi x,y,z a następnie ów wektor jest przekazywany do funkcji setPWMFill() która podaje moz na silniki w zależności od wyjść z regulatorów

Rozdział 3. Analiza i implementacja

Podrozdział 3.1 Implementacja, testy, modyfikacje.

1) Podczas pierwszych testów można było dostrzec niedoskonałości w doborze parametrów regulatora. Kluczowe więc było zmodyfikowanie parametrów w celu zapewnienia maszynie latającej odpowiedniej stabilizacji lotu. Najskuteczniejsza okazała się metoda prób i błędów.

2) Z uwagi na upływający czas i naszą ciekawość pierwsze testy odbyły się w terenie. Jednak było to pewne ryzyko, gdyż nie wiedzieliśmy jak zachowa się quadcopter w powietrzu. Narażało to maszynę na upadki i uszkodzenia. Finalnie zdecydowaliśmy się kontynuować testy za pomocą specjalnej konstrukcji, która sprawiła, że były one bezpieczniejsze.

3) Finalnie quadcopter waży około 600g. W przyszłości warto byłoby opracować lżejszą konstrukcję, która zwiększyłaby dynamikę quadcoptera. Mimo aktualnej wagi ciąg na silnikach jest wystarczający ze sporym zapasem.

4) Do quadcoptera zdecydowaliśmy się zamontować oświetlenie. Sprawilo, że sterowanie quadcopterem, dzięki takiej prostej i dosyć szybkiej modyfikacji, stało się bardziej intuicyjne. Zostało zastosowane oświetlenie dwukolorowe co pozwala zidentyfikować przód i tył quadcoptera. Wcześniej podczas lotu panowała pewna dezorientacja. Dodatkowo dzięki temu quadcopter też wygląda w locie okazalej, a także umożliwia to latanie w nocy.

5) W celu ułatwienia sterowania quadcopterem został wykonany w pilocie interface użytkownika w którym znajdują się dwa menu: dla pilota i dla quadcoptera

Menu pilota:

- Przełączanie trybów quadcopter/pilot
- Stan baterii
- Ustawianie offsetu dla poszczególnych kanałów pilota tj.: moc i obroty wokół osi x,y,z
- Ustawianie wielkości kroku offsetu

Menu quadcoptera:

- Przełączanie trybów quadcopter/pilot
- Stan baterii
- Przełączanie trybu lotu: z auto poziomowaniem i bez
- Załączenie kalibracji żyroskopu i akcelerometru
- Ustawianie wartości PID dla obrotów wokół osi x,y
- Ustawianie wartości PID dla obrotów wokół osi z

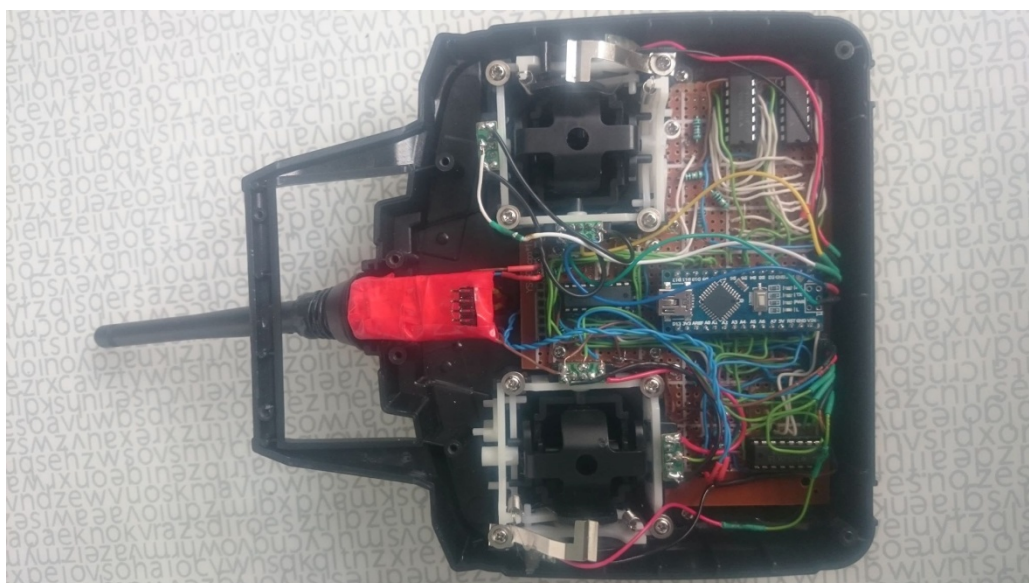
Podrozdział 3.2 Przedstawienie finalnej wersji modelu.

a) Kontroler

- Złożony



- Połączenia elektroniczne



b) Quadrocopter



b) Quadrocopter na uwięzi w trakcie kalibracji regulatora PID



Zakończenie/Wnioski/Podsumowanie

Po 3 miesiącach pracy nad Quadrocopterem ostatecznie możemy powiedzieć, że projekt zakończył się częściowym sukcesem. Efektem naszych działań jest maszyna latająca o zasięgu około 300m sterowana za pomocą komunikacji radiowej. Quadrocopter waży około 600 gram. Planowany jest dalszy rozwój tego projektu. Dalsze prace przede wszystkich opierać się będą na opracowanie lżejszej konstrukcji, a także wprowadzenia trybu autonomicznego, czyli tak naprawdę stworzenie z Quadrocoptera drona z prawdziwego zdarzenia. Z pewnością też będą trwały prace na coraz to lepszą stabilizacją lotu, gdyż jeszcze jest sporo do poprawienia. Doszliśmy także do wniosku, że słuszne mogłoby okazać się zamiast akumulatora 2S, zastosować akumulator 3S. Przełożyłoby się to na większą ilość obrotów na minutę (RPM), a więc także większy ciąg. Jednak i tak jesteśmy bardzo zadowoleni z efektów naszych działań. Doświadczenie i wiedza zdobyta podczas pracy nad tym projektem będzie z pewnością bardzo cenna.

Bibliografia:

- 1) <https://megadron.pl/pl/info/poznaj-rodzaje-i-modele-dronow-dostepnych-w-megadron-31.html>
- 2) <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>
- 3) SIMULATION AND CONTROL OF A QUADROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE Michael David Schmid
- 4) <http://blog.nettigo.pl/2014/modem-radiowy-nrf24l01-programowanie/>
- 5) <http://uczmy.edu.pl/wp/na-warsztacie/modul-nrf24l01/>
- 6) <http://dron-rc.pl/z-jakich-elementow-zbudowany-jest-multikopter-czyli-czesci-skladowe-drona/>