Dokumentacja Techniczna Drona QUAD 4X

Temat: Konstrukcja półautonomicznego drona z zastosowaniem algorytmu PID

Opracował: Krzychu Jura

SPIS TREŚCI

Krótki wstęp teoretyczny 3
Podłączenie Modułów elektronicznych 9
Ustawienie Śmigieł i pinnout motorów oraz warunkowy kierunek obrotu oraz dokrecenie CW oraz CCW 12
Co jeszcze jest niezbędne? 13
Schemat Programu 14
Działanie kodu, PID, Complementary filter, euler angles 15
FUNKCJA IMPCALIBTST() 19
FUNKCJA resetPID() oraz resetMotors() 19
FUNKCJA anglesRead() i Kalibracja MPU6050 20
FUNKCJA pidEquation() 22
FUNKCJe update() i fly() 23
FUNKCJA setup() i Loop() 25
Podsumowanie 44

WPROWADZENIE DO PROJEKTU

Konstrukcja półautonomicznego drona z zastosowaniem algorytmu PID

W ramach niniejszego projektu inżynierskiego zajmiemy się konstrukcją półautonomicznego drona, który będzie w stanie samodzielnie utrzymywać równowagę dzięki zastosowaniu zaawansowanego algorytmu PID (Proportional-Integral-Derivative). Celem projektu jest stworzenie systemu, który z jednej strony umożliwi dronowi autonomiczne stabilizowanie lotu, a z drugiej pozwoli operatorowi na pełną kontrolę kierunku i wysokości lotu za pomocą zdalnego sterowania. Konstrukcja półautonomicznego drona z zastosowaniem algorytmu PID i zdalnego sterowania stanowi ambitne wyzwanie inżynierskie, które ma na celu połączenie nowoczesnych technologii stabilizacji i precyzyjnego sterowania. Realizacja tego projektu nie tylko przyczyni się do rozwoju wiedzy i umiejętności w dziedzinie systemów bezzałogowych, ale także stworzy podstawy dla dalszych badań i innowacji w tej dynamicznie rozwijającej się branży.

Opis działania

Dron będzie wyposażony w system sterowania, który realizuje dwa główne zadania:

Autonomiczna stabilizacja lotu: Za utrzymanie równowagi drona w powietrzu odpowiadać będzie algorytm PID. Algorytm ten, poprzez ciągłą analizę i korektę parametrów lotu, takich jak pitch (pochylenie), roll (przechył) i yaw (obrót wokół osi pionowej), zapewni stabilność drona w każdych warunkach.

Zdalne sterowanie przez operatora: Operator drona będzie miał możliwość pełnego sterowania jego ruchem za pomocą kontrolera zdalnego sterowania. Przekazywanie poleceń do drona odbywać się będzie poprzez zadawanie odpowiednich wartości PWM (Pulse Width Modulation). Kontrola ta obejmuje następujące parametry:

- Throttle (przepustnica): kontroluje wysokość lotu drona,
- Pitch (pochylenie): kontroluje ruch drona do przodu i do tyłu,
- Roll (przechył): kontroluje ruch drona w lewo i w prawo,
- Yaw (obrót): kontroluje obrót drona wokół własnej osi pionowej.

Pozostałe aspekty stabilizacji lotu będą regulowane automatycznie przez system sterowania drona, co pozwoli operatorowi skupić się na precyzyjnym kierowaniu dronem w pożądanym kierunku.

Cele projektu

Głównym celem projektu jest stworzenie drona, który będzie łączył zalety autonomicznych systemów stabilizacji z elastycznością i precyzją zdalnego sterowania. Dzięki zastosowaniu algorytmu PID dron będzie w stanie szybko i efektywnie reagować na zmiany warunków lotu, minimalizując ryzyko utraty kontroli i zwiększając bezpieczeństwo operacji. Jednocześnie, dzięki zdalnemu sterowaniu, operator będzie mógł z łatwością nawigować dronem, wykorzystując jego pełen potencjał w różnych zastosowaniach praktycznych.

Zakres prac

Projekt obejmuje:

- Projektowanie i implementację algorytmu PID dla stabilizacji lotu drona,
- Integrację systemu zdalnego sterowania z dronem,
- Testowanie i optymalizację działania drona w różnych warunkach operacyjnych,
- Dokumentację procesu konstrukcji i wyników testów.

PRZEGLĄD LITERATURY

Drony, czyli bezzałogowe statki powietrzne (UAV - Unmanned Aerial Vehicles), zyskują na popularności dzięki ich szerokiemu zastosowaniu w różnych dziedzinach, takich jak fotografia, nadzór, dostawy, badania naukowe, czy rolnictwo. Jednym z kluczowych wyzwań w projektowaniu dronów jest utrzymanie ich stabilności w przestrzeni. W tym celu powszechnie stosuje się algorytmy PID (Proportional-Integral-Derivative), które pozwalają na precyzyjne sterowanie i stabilizację dronów. Ponadto, kontrola dronów może być realizowana za pomocą systemów transmitter & receiver, umożliwiających operatorowi zdalne sterowanie dronem.

Algorytm PID w stabilizacji dronów literatura

Algorytm PID jest jednym z najczęściej stosowanych regulatorów w inżynierii sterowania, w tym także w stabilizacji dronów. Składa się z trzech komponentów: proporcjonalnego (P), całkującego (I) i różniczkującego (D). Każdy z tych komponentów odpowiada za inną część odpowiedzi systemu, co pozwala na uzyskanie stabilnego i precyzyjnego sterowania.

"Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment" - Randal W. Beard, Timothy W. McLain

Beard i McLain omawiają teoretyczne i eksperymentalne aspekty dynamicznego sterowania quadkopterami, w tym zastosowanie algorytmów PID do stabilizacji lotu.

"Modern PID Control" - Katsuhiko Ogata

Ogata dostarcza szerokiego omówienia nowoczesnych technik sterowania PID, w tym ich zastosowań w różnych systemach inżynieryjnych, takich jak drony.

"PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches" - Ramon Vilanova, Antonio Visioli

Książka zawiera przegląd najnowszych osiągnięć i metod w dziedzinie sterowania PID, z naciskiem na aplikacje w nowoczesnych systemach, takich jak drony.

"Systemy sterowania dronami" - Janusz Szczepański

Szczepański przedstawia kompleksowe omówienie systemów sterowania dronami, w tym zastosowanie algorytmów PID do stabilizacji lotu.

"Podstawy sterowania dronami: teoria i praktyka" - Piotr Kowalski

Kowalski opisuje podstawowe zasady sterowania dronami, w tym wykorzystanie algorytmów PID w różnych scenariuszach lotu.

Sterowanie dronami za pomocą transmitter & receiver literatura

Sterowanie dronami przez operatora za pomocą systemów transmitter & receiver jest kluczowym elementem w wielu aplikacjach. Transmittery umożliwiają wysyłanie sygnałów sterujących zdalnie, podczas gdy receivery odbierają te sygnały i przekształcają je w odpowiednie komendy dla drona.

"Remote Control Systems: Principles and Applications" - Frank L. Lewis

Lewis omawia zasady działania i zastosowania systemów zdalnego sterowania, w tym systemów transmitter & receiver stosowanych w dronach.

"Radio Control for Dummies: A Comprehensive Guide" - John D. Grainger

Grainger przedstawia przewodnik po systemach radiowego sterowania, wyjaśniając techniczne aspekty transmitterów i receiverów.

"Technologie zdalnego sterowania dronami" - Marek Wiśniewski

Wiśniewski analizuje technologie wykorzystywane w zdalnym sterowaniu dronami, w tym szczegółowy opis systemów transmitter & receiver.

"Zdalne sterowanie w robotyce i dronach" - Adam Nowak

Nowak dostarcza przeglądu technologii zdalnego sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania w dronach.

Publikacje naukowe

"A Survey of Quadrotor Drones Control Methods and Related Challenges" - Journal of Intelligent & Robotic Systems

Artykuł przedstawia przegląd metod sterowania quadkopterami, w tym wykorzystanie algorytmów PID do stabilizacji lotu.

"Enhanced PID Control for Quadrotor UAV" - IEEE Transactions on Control Systems Technology

Publikacja omawia zaawansowane techniki PID w kontekście sterowania quadkopterami, przedstawiając wyniki eksperymentalne.

"Stabilizacja lotu dronów za pomocą algorytmu PID" - Pomiary Automatyka Kontrola

Artykuł opisuje zastosowanie algorytmu PID do stabilizacji lotu dronów, prezentując zarówno teoretyczne, jak i praktyczne aspekty.

"Systemy sterowania dronami: badania i rozwój" - Przegląd Elektrotechniczny

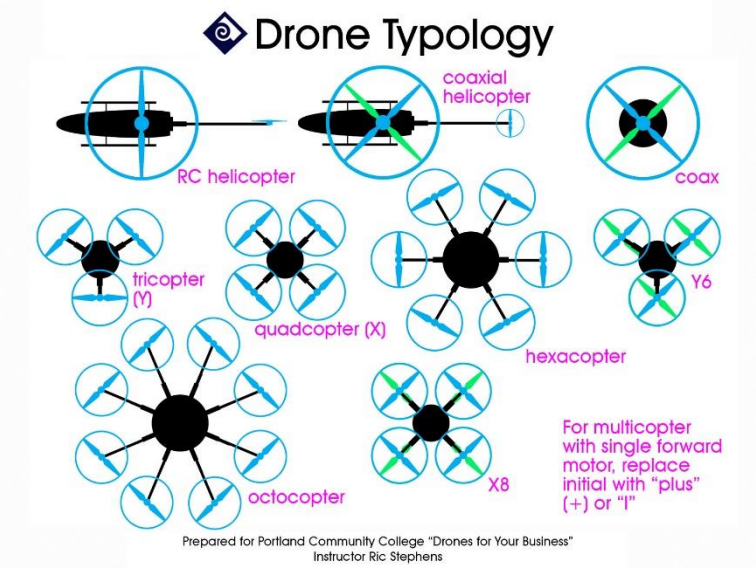
Publikacja zawiera przegląd najnowszych badań w dziedzinie systemów sterowania dronami, ze szczególnym uwzględnieniem algorytmów PID i systemów transmitter & receiver.

Literatura dotycząca stabilizacji dronów za pomocą algorytmu PID oraz zdalnego sterowania za pomocą systemów transmitter & receiver jest obszerna i obejmuje zarówno teoretyczne podstawy, jak i praktyczne zastosowania. Algorytm PID pozostaje kluczowym narzędziem w zapewnianiu stabilności i precyzji lotu, podczas gdy systemy zdalnego sterowania umożliwiają operatorom skuteczne zarządzanie dronami. Dostępne publikacje w języku angielskim i polskim dostarczają niezbędnej wiedzy i narzędzi do dalszych badań i rozwoju w tej dziedzinie.

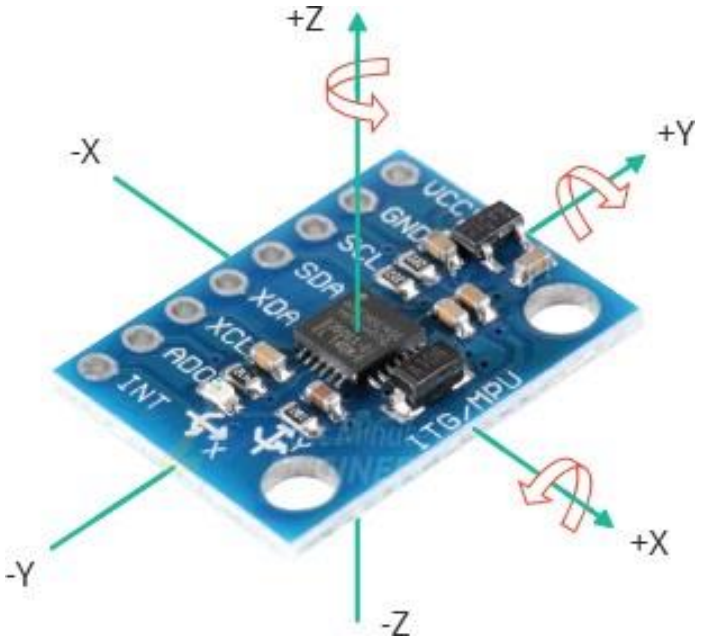
KRÓTKI WSTĘP TEORETYCZNY (METODOLOGIA CZ.1)

Nie będzie tu dużo (ogólnej) teorii (bez praktyki bezwartościowa) [w sensie podam Ci teorie która odnosi się do tego co ci się przyda TYLKO] więc przejdę do tego jak bym chciał żeby na początku mi ktoś to wyjaśnił (kiedy zaczynałem ten projekt):

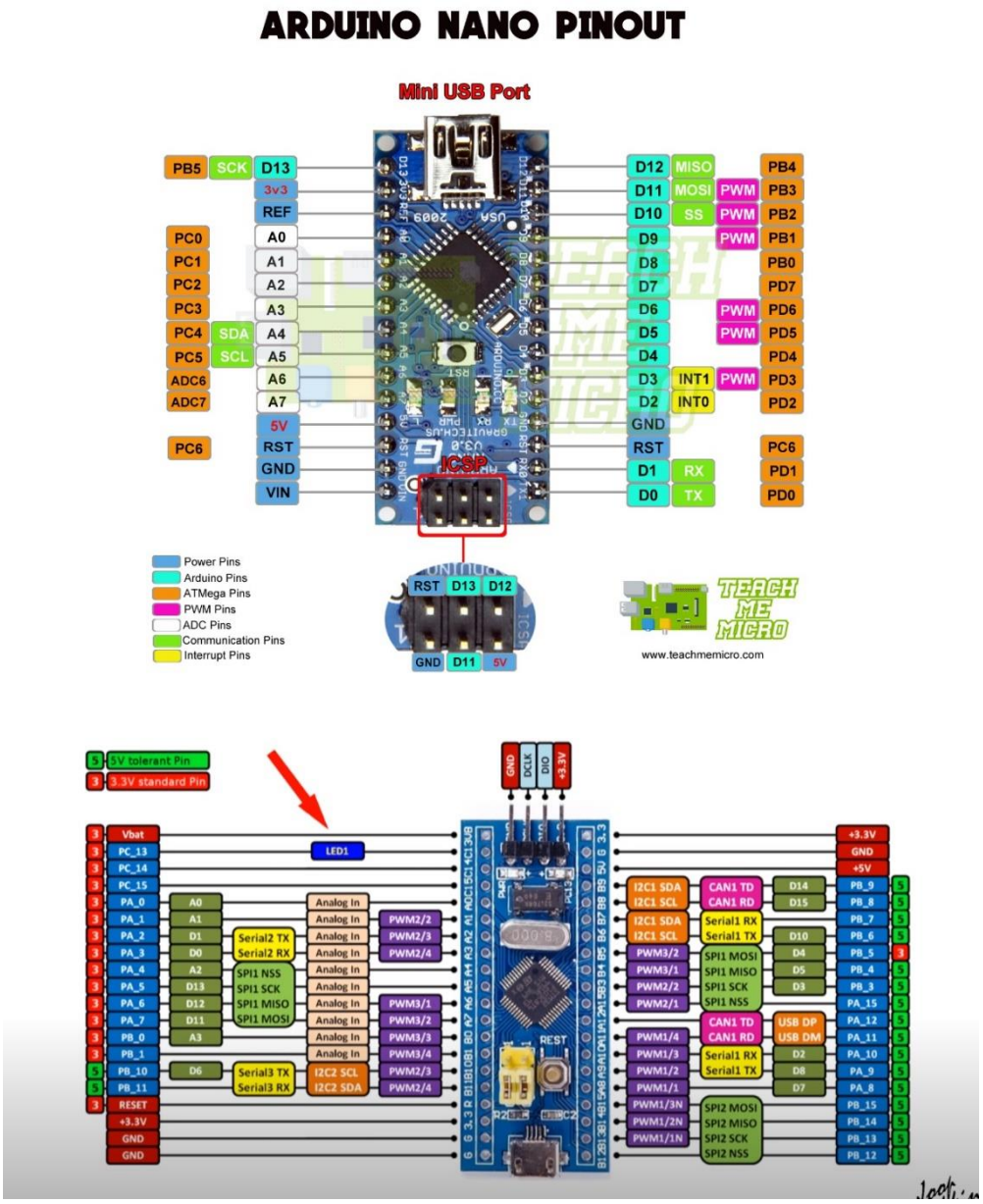
1. Typów dronów masz parę (masz rysunek poniżej), dlaczego o tym piszę? Bo każdym steruje się inaczej. To nie jest tak, że dasz sobie pwm i 7.4V (generalnie od 7.4 w naszym projekcie do 11.1V = 7.4 + 3.7 -> jak znasz lipo to wiesz o czym mowie jak nie to koniecznie się zapoznaj Akumulatory litowo–polimerowe, Li–po – kompendium cz.1 • FORBOT) i lecisz. Jest masakrycznie dużo kruczków które w rzeczywistości niestety istnieją (fizyka pozdrawia).



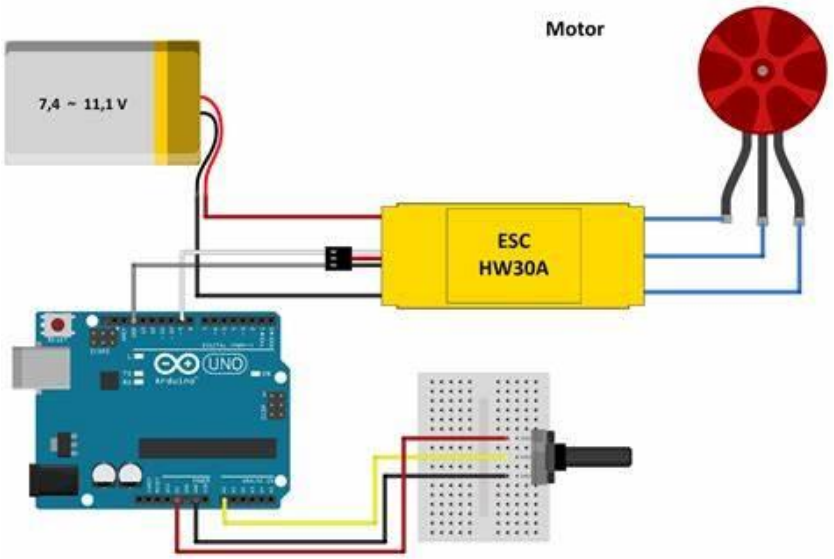
2. Musisz wiedzieć czym jest prędkość obrotowa (pulsacja) -> pochodzi z żyroskopu, przyspieszenie grawitacyjne -> pochodzi z akcelerometru. Akcelerometr + żyroskop = IMU. (celowo tłumaczę jak dla przedszkolaka żebyś mnie dobrze zrozumiał nie będę operował zbyt technicznym słownictwem, chyba że będzie to zupełnie konieczne). Nasze IMU = MPU6050. Bardzo proszę - zapoznaj się ze zdjęciem to jaką masz orientację mpu6050 zależy od wektorów przyspieszenia oraz od prędkości kątowej, masz zdjęcie poniżej (mega często pojawia się w kodzie, wzdłuż osi Z mierzysz acceleration Z oraz angular velocity Z i analogicznie z pozostałymi osiami). Co także bardzo istotne w kontekście tego konkretnego projektu to to żeby mpu6050 było skierowane pinoutem do tyłu drona tak żeby kropka na IC mpu6050 wskazywała left back motor naszego drona. Sterowanie drona w kodzie zostało napisane właśnie pod takie ułożenie (ma to znaczenie przy obliczaniu wartości regulacyjnych pwm podawanych do ESC przy PID)



3. Ponieważ pierwsza płytka (rewizje: 1, 2) do drona była także napisana pod AVR, powinieneś wiedzieć jak obsługiwać arduino nano (najlepiej sprawnie umieć cos napisać na tej platformie). Mowa głownie o umiejętności generowania pwm, obsługi wejść wyjść oraz posługiwania się zaawansowanymi strukturami oraz funkcjami programistycznymi (Kurs podstaw Arduino – spis treści, wstęp • FORBOT). Co nas także będzie interesowało to, to że w gruncie rzeczy ta platforma nie nadaje się do tak zaawansowanego projektu jakim jest dron Quad 4X, maksymalna częstotliwość taktowania dla mikrokontrolera Atmega 328p który siedzi na pokładzie arduino nano to 20MHz. Dla porównania dużo tańszy stm32f103 (w oparciu o który zostały opracowane rewizje: 3, 4 pcb do drona) ma ok 4 razy większe taktowani. Co także ważne to, to żebyś umiał się połapać w wyprowadzeniach pinów. Programowanie w AVR będzie bardzo przydatne także ze względu na fakt, że będziemy używać specjalnej nakładki na arduino ide która pozwoli nam programować STM w sposób analogiczny do arduino. (Możemy także w tym celu użyć stmcubeide, kwestia gustu).



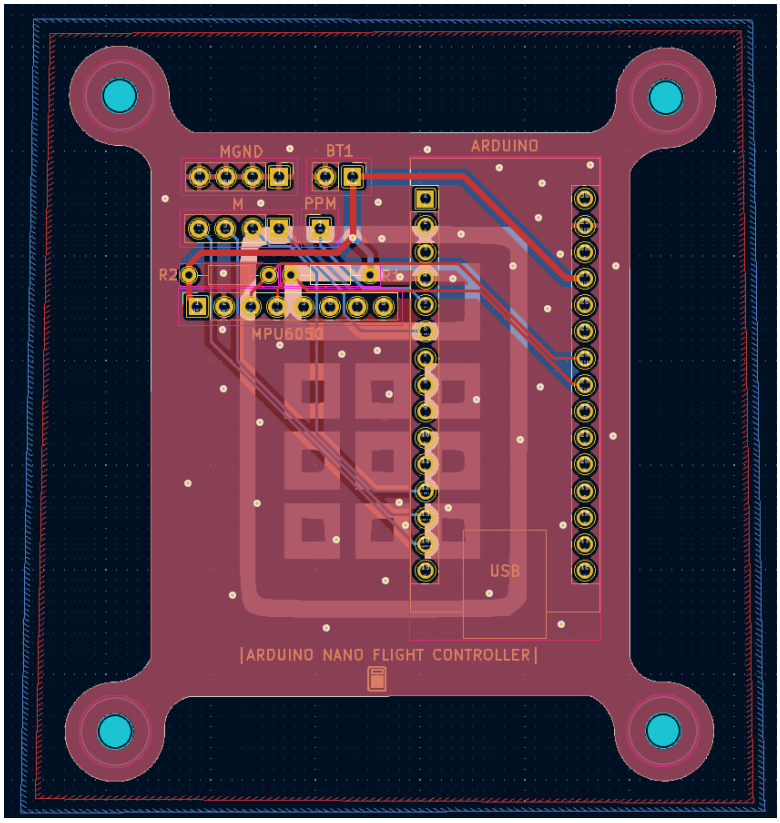
4. Nie będę się tu rozwodził nad działaniem silników BLDC ani ESC. Najważniejsze jest żebyś wiedział ze nie możesz sobie zrobić tak jak w DC ze dajesz sobie mostek H i sterujesz podając odpowiedni woltaż, tzn. żeby silniki BLDC zadziałały musisz je kontrolować przez ESC - electronic speed controler (nazwa mówi sama za siebie 😉). Upraszczając zasadę działania jak tylko się da: podajesz pwm na ESC -> im większy pwm (większe wypełnienie) tym szybciej silnik będzie się kręcił w 1 lub 2 stronę (bo TAK: ZALEZY TO NIESTETY OD SPECYFIKI ESC oraz od sposobu podłączenia przewodów ESC <-> motor)



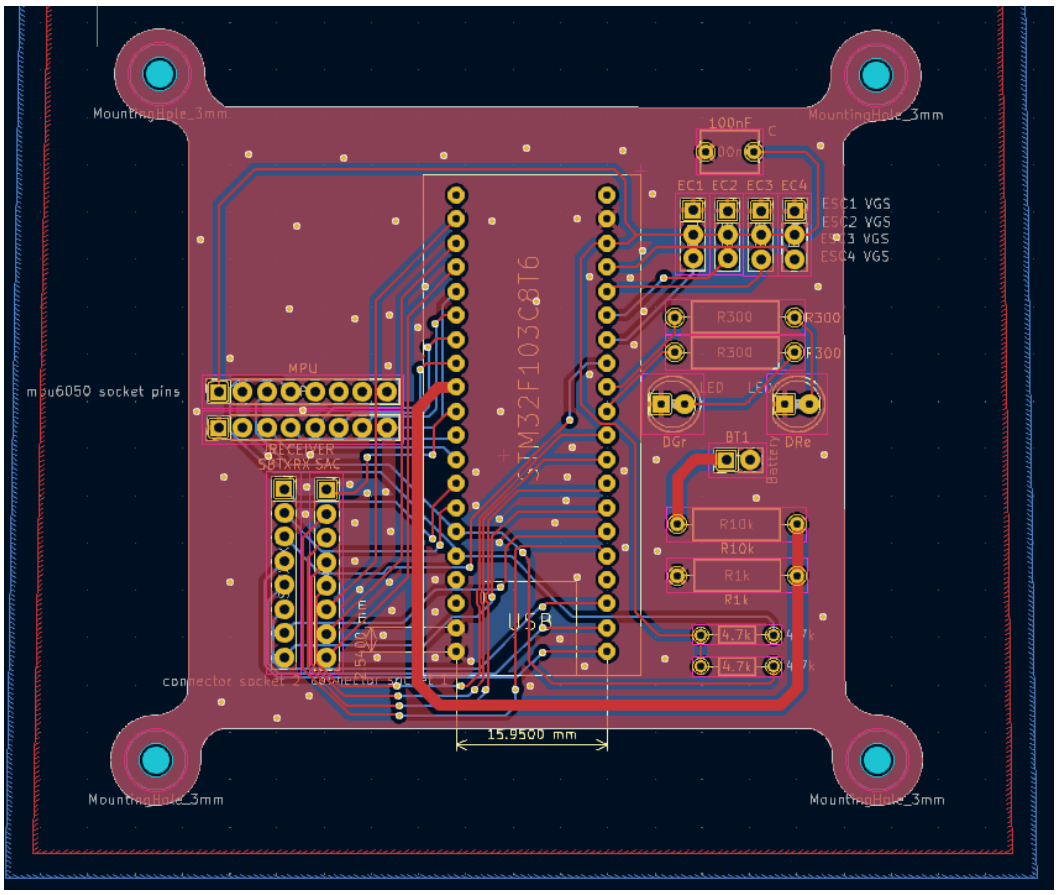
5. PID, katy Eulera, filtr komplementarny, filtr Kalmana, różne typy FC – flight controller oraz algorytmów regulacji (np. PID controller) nie będę omawiał dokładnie w tej części tekstu. Wyjaśnię je na przykładach praktycznych, kiedy przejdziemy do kodu (MUSIAŁBYM CI PODAWAC OGÓLNĄ zaawansowana TEORIE KTÓREJ PODAWAĆ NIE CHCE. Co istotne to do obliczenia kątów użyto prostych zależności geometrycznych (dla acceleration angles) oraz gyro angles z uwzględnieniem zjawiska gyro drift (spowodowanego własnościami całki, którą bierzemy z angular velocity), do tak obliczonych kątów stosujemy filtr komplementarny w celu otrzymania przybliżonych wartości kątów (obyliśmy się bez kątów Eulera). Do regulacji wartości PWM podawanych na ESC (obliczone jako błędy w odchyleniu od ustalonego setpointu, (0, 0, 0) użyto algorytmu PID.

PODŁĄCZENIE MODUŁÓW ELEKTRONICZNYCH (METODOLOGIA CZ.2)

Przedstawiam podłączenie modułów ESC -> motorów, mpu6050, baterii LIPO 3S, switch'a do AVR'ki (Jeżeli nie kapujesz mniej więcej polaczeń, które zrobiłem sięgnij proszę do fotki pinoutu dla arduino nano, masz tam piny sda, scl -> mpu, 5V, VIN, GND, PWM pins, to wszystko ma znaczenie, jeżeli czegokolwiek nie rozumiesz zgłoś się do Tomka, ew. do mnie na spokojnie wyjaśnimy o co chodzi.



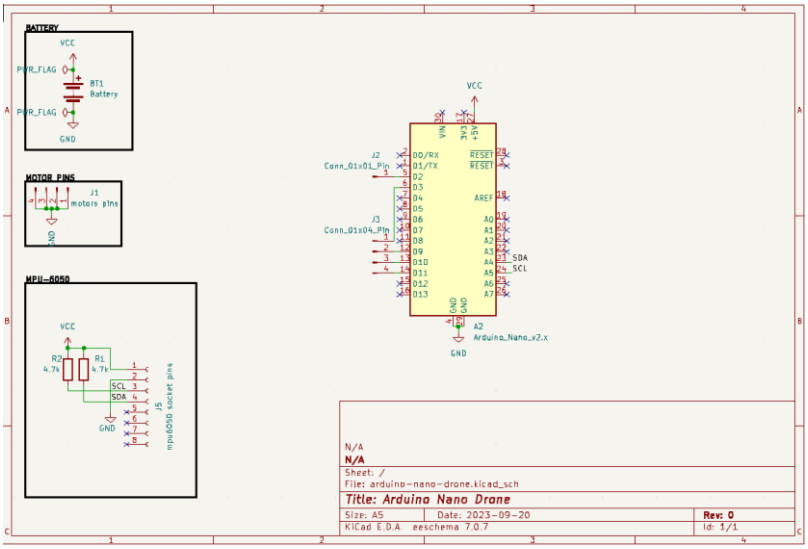
Rys. 1. projekt starej płytki pod AVR (Rev.1)



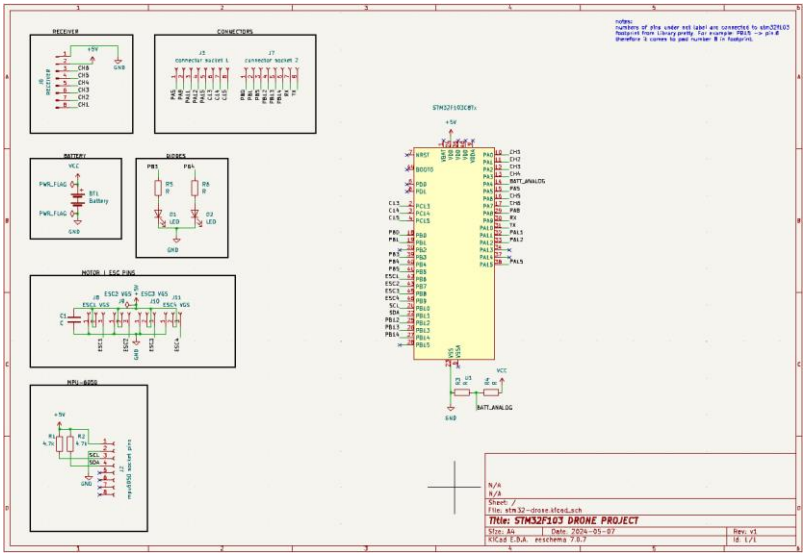
Rys. 2. Projekt nowej płytki pod STM32F103 (Rev.4)

Różnice między dwoma pokazanymi płytkami są bardzo duże. Na przełomie 6 miesięcy całkowicie wyeliminowano arduino nano z projektu zastępując je STM32F103C8T6, dodano wejście analogowe które poprzez dzielnik napięcia oraz przetwornik ADC analizuje stan napięcia na

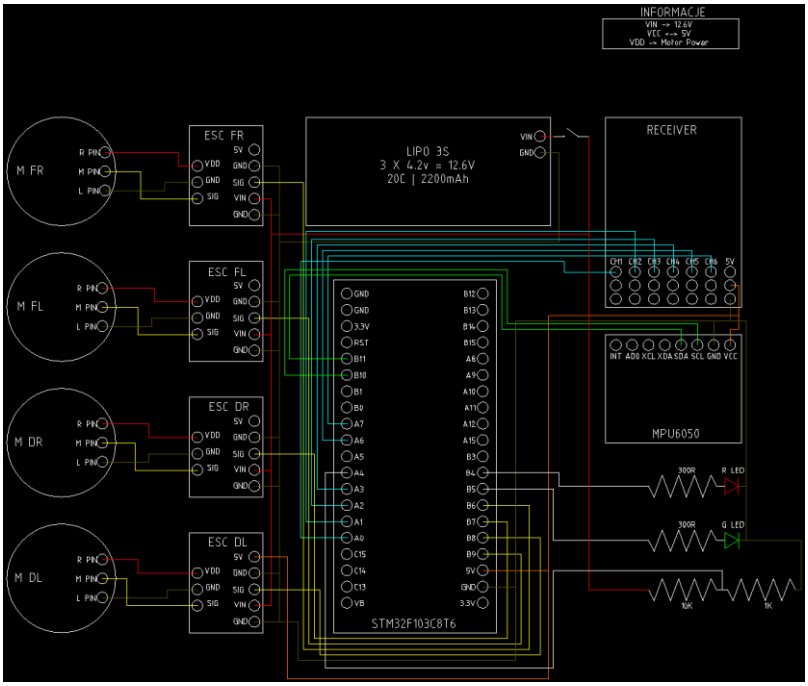
akumulatorku LIPO 3S zasilającym cały układ. Dodano diody sygnalizujące błędy w poprawnym działaniu drona, dodano także dodatkowe elementy poprawiające pracę całego układu (dodatkowe kondensatorki). Szerokość ścieżek także została dokładnie obliczona z użyciem wzoru z normy IPC-2221 (narzędzie https://www.digikey.pl/). Wyprowadzono także pozostałe piny STM32F103 w celu możliwości przyszłej rozbudowy układu. Pokazałem schemat płytki flight controllera pora na schemat połączeń zewnętrznych (zasadniczo się nie zmienił po dodaniu nowej płytki)



Rys. 5. Dokładny schemat połączeń na płytce (Rev. 1)



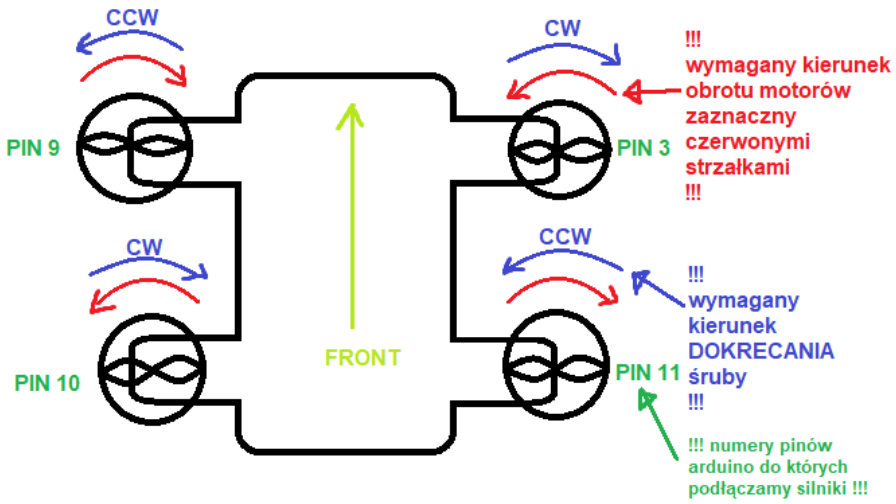
Rys. 4 Dokładny schemat połączeń na płytce (Rev. 4)



Rys. 3 Schemat połączeń poza płytką

USTAWIENIE ŚMIGIEŁ I PINNOUT MOTORÓW ORAZ WARUNKOWY KIERUNEK OBROTU ORAZ DOKRECENIE CW, ORAZ CCW (METODOLOGIA CZ.3)

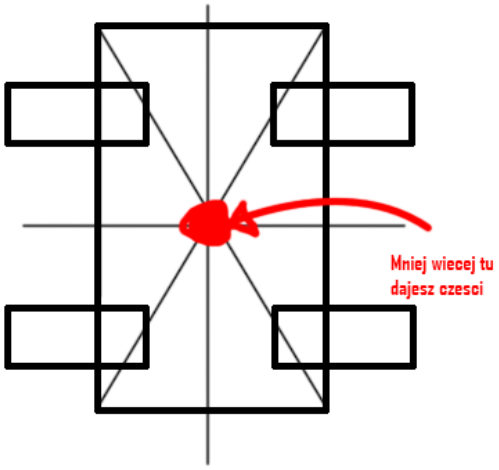
Krótki wstęp: każdy motor w zależności od swojego położenia (lewy górny, lewy dolny, …) ma swój własny niepowtarzalny sygnał pwm regulujący jego szybkość niepowtarzalność nadaje mu właśnie PID. Dlatego MA ZNACZENIE do jakiego pinu AVR/STM podłączysz wyprowadzenie SIG od ESC, NIESTETY… Dodatkowo każdy z silników musi się obracać także w odpowiednim kierunku (żeby odpowiednie warunki aerodynamiczne były spełnione). Dodatkowo na każdym z silników śruba powinna dokręcać się w zależności w kierunku clockwise (CW) lub counter clockwise (CCW) tak by działająca siła odśrodkowa dokręcała ją w trakcie obrotu łopatek. Sporo tych warunków prawda? Musze Cię jeszcze zasmucić to nie koniec warunków, ale uprzedzałem jak coś. Pokazuję zdjęcie jak powinny się silniki kręcić i kierunek dokręcania śruby:



Podobnie sprawa ma się ze śmigłami, żeby dron mógł latać odpowiednie wymagania fizyczne muszą być spełnione i zapewniona odpowiednia siła ciągu, zarówno od motorów jak i od charakteru współdziałania łopatek z powietrzem WIĘC TAK, TO W JAKIM MIEJSCU DASZ JAKĄ ŁOPATKE TAKŻE MA ZNACZENIE (jeżeli łopatkę z wychylenie dolnym dasz w miejsce łopatki z wychyleniem górnym dron zamiast ładnie polecieć będzie wirował w miejscu. Sposób ułożenia łopatek:

CO JESZCZE JEST NIEZBĘDNE? (METODOLOGIA CZ.4)

Musisz jeszcze ustawić odpowiednio środek ciężkości drona. Jeżeli nawalisz mu jakichś ciężkich gratów po bokach podczas startu będzie szorował łopatkami o podłogę - źle dla niego i źle dla Ciebie. Dlatego musisz zrobić tak by środek ciężkości drona znajdował się w przybliżeniu (dość dobrym) w dokładnie połowie konstrukcji samego drona, tzn:



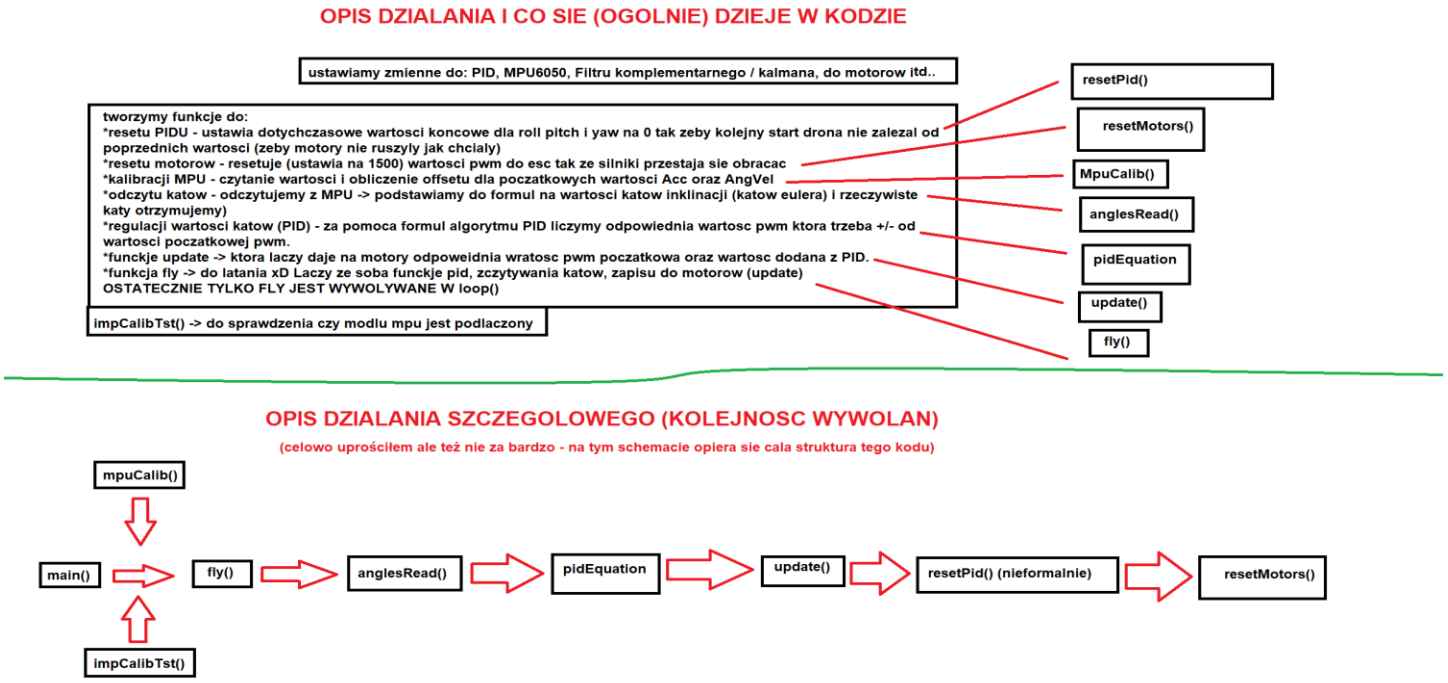
Zasadniczo warunek ten osiągnąć jest dość prosto wystarczy, że upper base drona będzie w przybliżeniu kwadratowy i arms drona będą ułożone w stosunku do siebie pod kątem 90 stopni.

Mniej ważnym lecz nadal istotnym z punktu widzenia całości jest odpowiednie zbalansowanie śmigieł drona. W celu odpowiedniego zbalansowania śmigieł możemy użyć propeller balancer lub też zwyczajnie przykleić igłę do idealnie poziomej nawierzchni i położyć na niej śmigło tak by jedna część śmigła była po lewej, a druga po prawej (jest to bardzo ciężkie do osiągnięcia bez posiadania odpowiednich narzędzi) dlatego zaleca się propeller balancer.

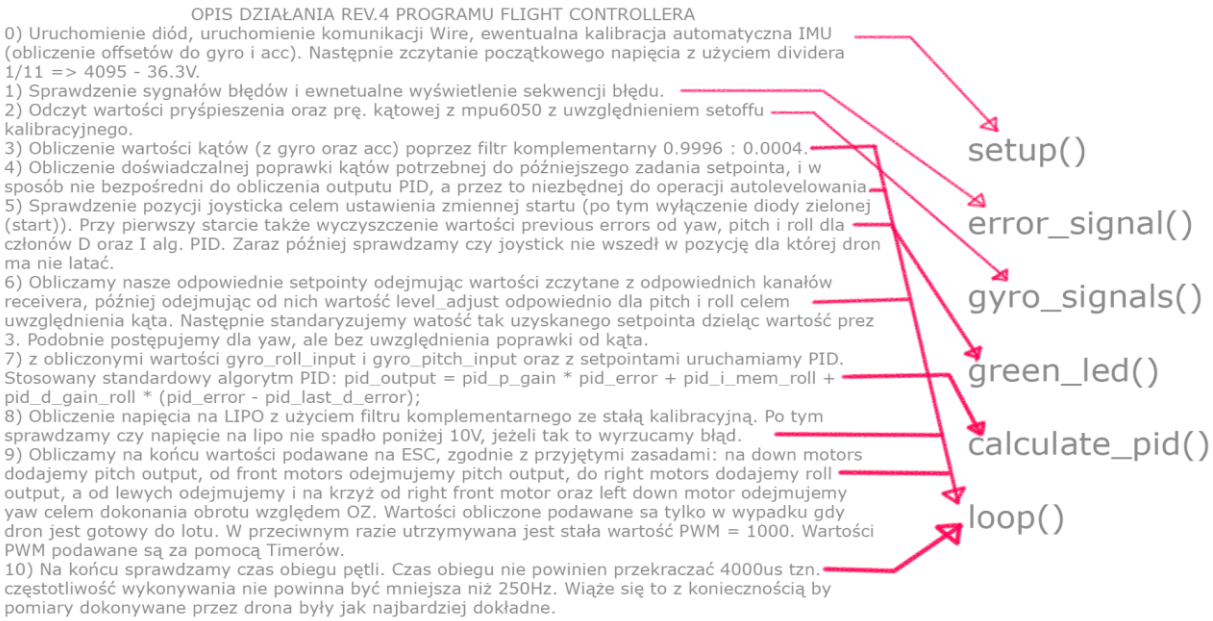
SCHEMAT PROGRAMU (METODOLOGIA CZ.5)

1. Jak działa program (schemat blokowy)

Myślę, że sam schemat działania już na podstawie tego co przeczytałeś powinien być w miarę jasny (jakby nie był to teraz wyjaśnię to jeszcze raz bardzo dokładnie (wszystko od początku), pamiętaj, że wtedy, kiedy to czytasz kod mógł ulec drobnym modyfikacjom które nie zostały jeszcze wprowadzone do tej pracy). Oczywiście funkcje (odpowiedzialne za określone, wypisane działanie) też wymagają wyjaśnienia, zrobimy to przy omawianiu kodu flight controllera.



Rys. 6. Opis działania kodu (Rev.1)



Rys. 7. Opis działania kodu (Rev.4)

KOD FLIGHT CONTROLLERA (AVR, REV.0)

Dobra pogadajmy teraz o czymś najważniejszym i zarazem najtrudniejszym, dotychczas były przedstawione kruczki mechaniczne, teraz będą przedstawione kruczki programistyczne.

```
#include <Wire.h>
#include <Servo.h>
#include <MPU6050_light.h>
#define MOTORDR 11   //Down Right motor
#define MOTORDL 10   //Down Left motor
#define MOTORUL 9    //Upper Left motor
#define MOTORUR 3    //Upper Right motor
#define MAXMICROSECONDS 2000
#define MINMICROSECONDS 1000



//motor vars
Servo upperLeftMotor;
Servo downLeftMotor;
Servo upperRightMotor;
Servo downRightMotor;
int throttleCutOff = 1500;
int maxFlyable = 1800;  //+140 from pid, = 1800
int minFlyable = 1650;  //+140 from pid, = 1650
float upperLeftPwm = 0.0f, downLeftPwm = 0.0f, upperRightPwm = 0.0f, downRightPwm = 0.0f;
float upperLeftPwmFinal = 0.0f, downLeftPwmFinal = 0.0f, upperRightPwmFinal = 0.0f, downRightPwmFinal = 0.0f;
float gainConst = 1.0f;
bool wasThereFlight = 0;
//pid vars
float rollPid = 0.0f, rollError = 0.0f, rollPrevError = 0.0f;    //vars for roll pid
float rollPTerm = 0.0f;    //initial values
float rollITerm = 0.0f;
float rollDTerm = 0.0f;
float rollPConstant = 0.7f; //3.55
float rollIConstant = 0.006f;   //0.003
float rollDConstant = 1.2f; //2.05
float desiredXAngle = 0.0f;    //desired roll angle 0 to stabilise
float pitchPid = 0.0f, pitchError = 0.0f, pitchPrevError = 0.0f; //vars for pitch pid
float pitchPTerm = 0.0f;   //initial values
float pitchITerm = 0.0f;
float pitchDTerm = 0.0f;
float pitchPConstant = 0.72f;   //3.55
float pitchIConstant = 0.006f;  //0.003
float pitchDConstant = 1.22f;   //2.05
float desiredYAngle = 0.0f;    //desired pitch angle
float yawPid = 0.0f, yawError = 0.0f, yawPrevError = 0.0f; //vars for pitch pid
float yawPTerm = 0.0f;   //initial values
float yawITerm = 0.0f;
float yawDTerm = 0.0f;
float yawPConstant = 0.72f;   //3.55
float yawIConstant = 0.006f;  //0.003
float yawDConstant = 1.22f;   //2.05
float desiredZAngle = 0.0f;    //desired yaw angle
//time vars
float time = 0.0f;
float timePrev = 0.0f;
```

```
float elapsedTime = 0.0f;
unsigned long flyTime = 0UL;
//GY521 vars
MPU6050 mpu(Wire);
double angleX = 0.0;
double angleY = 0.0;
double angleZ = 0.0;


void impCalibTst(void) {
    Wire.begin();
    byte status = mpu.begin();
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    while(status != 0) {
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
        delay(500);
        digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
        delay(500);
    }
}


void resetPid(void) {   //used for resettin pid after completed fly
    rollPrevError = 0; pitchPrevError = 0;
    rollITerm = 0; rollDTerm = 0; rollPTerm = 0;
    pitchITerm = 0; pitchDTerm = 0; pitchPTerm = 0;
    rollPid = 0; pitchPid = 0;
}


void resetMotors(void) {  //used to reset motors after flight
    upperLeftMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
    upperRightMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
    downLeftMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
    downRightMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
}


void anglesRead(void) {
    mpu.update();
    angleX = mpu.getAngleY();  //calculatin inclination angles usin complementary filter
    angleY = mpu.getAngleX(); //changing order cause of mpu placement
    angleZ = mpu.getAngleZ();
}


void pidEquation(void) {
    desiredXAngle = 0;   //pid desired angles of inclination we would normally inputh here values from communication modules
    desiredYAngle = 0;
    desiredZAngle = 0;
    rollError = angleX - desiredXAngle;  //difference between current angle and desired one
    pitchError = angleY - desiredYAngle;
    yawError = angleZ - desiredZAngle;
    rollPTerm = rollPConstant * rollError; //proportional terms of roll and pitch
    pitchPTerm = pitchPConstant * pitchError;
    yawPTerm = yawPConstant * yawError;
```

```
    rollITerm = rollITerm + (rollIConstant * (rollError + rollPrevError) * (elapsedTime / 2));    //integral term to smooth little error bet. -
3deg:3deg
    pitchITerm = pitchITerm + (pitchIConstant * (pitchError + pitchPrevError) * (elapsedTime / 2));
    yawITerm = yawITerm + (yawIConstant * (yawError + yawPrevError) * (elapsedTime / 2));
    if(rollITerm > 400)   rollITerm = 400;
    else if(rollITerm < -400)   rollITerm = -400;
    if(pitchITerm > 400)   pitchITerm = 400;
    else if(pitchITerm < -400)   pitchITerm = -400;
    if(yawITerm > 400)   yawITerm = 400;
    else if(yawITerm < -400)   yawITerm = -400;
    rollDTerm = rollDConstant * ((rollError - rollPrevError) / elapsedTime);   //derivative term = DConst*(dE/dt)
    pitchDTerm = pitchDConstant * ((pitchError - pitchPrevError) / elapsedTime);
    yawDTerm = yawDConstant * ((yawError - yawPrevError) / elapsedTime);
    rollPid = rollPTerm + rollITerm + rollDTerm;   //final "calib" values from pid
    pitchPid = pitchPTerm + pitchITerm + pitchDTerm;
    yawPid = yawPTerm + yawITerm + yawDTerm;
    if(rollPid < -400) {
        rollPid = -400;   //security check to not exceed min/max pwm
    }
    if(rollPid > 400) {
        rollPid = 400;
    }
    if(pitchPid < -400) {
        pitchPid = -400;
    }
    if(pitchPid > 400) {
        pitchPid = 400;
    }
    if(yawPid < -400) {
        yawPid = -400;
    }
    if(yawPid > 400) {
        yawPid = 400;
    }
}



void update(int throttleValue) {
    timePrev = time;
    time = millis();    //one loop iteration time used for integration
    elapsedTime = (time - timePrev) / 1000;   //ms -> s : 1 / 1000
    upperRightPwm = gainConst * (-rollPid - pitchPid - yawPid);   //motors pwm calculation
    downRightPwm = gainConst * (-rollPid + pitchPid + yawPid);
    downLeftPwm = gainConst * (rollPid + pitchPid - yawPid);
    upperLeftPwm = gainConst * (rollPid - pitchPid + yawPid);
    upperLeftPwmFinal = upperLeftPwm + throttleValue;
    downLeftPwmFinal = downLeftPwm + throttleValue;
    upperRightPwmFinal = upperRightPwm + throttleValue;
    downRightPwmFinal = downRightPwm + throttleValue;
    if(upperRightPwmFinal < 1100) {  //security check to not exceed min/max pwm
        upperRightPwmFinal = 1100;
    }
    if(upperRightPwmFinal > 2000) {
        upperRightPwmFinal = 2000;
    }
    if(upperLeftPwmFinal < 1100) {
```

```
        upperLeftPwmFinal = 1100;
    }
    if(upperLeftPwmFinal > 2000) {
        upperLeftPwmFinal = 2000;
    }
    if(downRightPwmFinal < 1100)
    {
        downRightPwmFinal = 1100;
    }
    if(downRightPwmFinal > 2000) {
        downRightPwmFinal = 2000;
    }
    if(downLeftPwmFinal < 1100) {
        downLeftPwmFinal = 1100;
    }
    if(downLeftPwmFinal > 2000) {
        downLeftPwmFinal = 2000;
    }
    rollPrevError = rollError; //storin prev errors for roll and pitch
    pitchPrevError = pitchError;
    yawPrevError = yawError;
    upperLeftMotor.writeMicroseconds(upperLeftPwmFinal);
    downLeftMotor.writeMicroseconds(downLeftPwmFinal);
    upperRightMotor.writeMicroseconds(upperRightPwmFinal);
    downRightMotor.writeMicroseconds(downRightPwmFinal);
    Serial.println("UR, DR: " + String(upperRightPwmFinal) + " " + String(downRightPwmFinal) + " UL, DL: " + String(upperLeftPwmFinal) + " " +
String(downLeftPwmFinal));
}


void fly(void) {
    if (wasThereFlight == 0) {
        for (int i = throttleCutOff; i < maxFlyable; i++) { //increasing throttle from 1500
            update(i);
        }
        flyTime = millis();
        while (millis() - flyTime < 5000UL) { //fly up until less than 5s
            anglesRead(); //readin angles
            pidEquation();  //readin final pid for roll and pitch angles
            update(maxFlyable);
        }
        rollPid = 0; pitchPid = 0;
        for (int i = maxFlyable; i > minFlyable; i--) { //decreasing throttle
            update(i);
        }
        rollPid = 0; pitchPid = 0;
        flyTime = millis();
        while (millis() - flyTime < 20000UL) { //falling
            anglesRead(); //readin angles
            pidEquation();  //readin final pid for roll and pitch angles
            update(minFlyable);
        }
        rollPid = 0; pitchPid = 0;
        for (int i = minFlyable; i > throttleCutOff; i--) { //slowin motors to no rotation pwm value
            update(i);
        }
```

```
        wasThereFlight = 1; //security check
        resetPid();
        resetMotors();
    }
}


void setup() {
    impCalibTst();
    upperLeftMotor.attach(MOTORUL, MINMICROSECONDS, MAXMICROSECONDS); //left front motor
    downLeftMotor.attach(MOTORDL, MINMICROSECONDS, MAXMICROSECONDS); //left back motor
    upperRightMotor.attach(MOTORUR, MINMICROSECONDS, MAXMICROSECONDS); //right front motor
    downRightMotor.attach(MOTORDR, MINMICROSECONDS, MAXMICROSECONDS); //right back motor
    delay(250); //for esc conf
    mpu.calcOffsets();  //gy521 calibration
    time = millis();
    delay(250); //for 1st dt
    Serial.begin(9600);
}


void loop() {
    fly();
}
```

Tak dobrze widzisz wkleiłem Ci cały kod…

FUNKCJA IMPCALIBTST()

Zacznijmy go omawiać: na początku definiujemy zmienne do wszystkich funkcji, które określiliśmy sobie w części dotyczącej schematu programu. Pierwsza funkcja:

```
void impCalibTst(void) {
  Wire.begin();
  byte status = mpu.begin();
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  while(status != 0) {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    delay(500);
  }
}
```

Rozpoczynamy komunikację przez Wire i patrzymy czy funkcja begin() zwróci 0, jeżeli tak to bardzo dobrze komunikacja się powiodła, jeżeli nie to zamigaj dioda wbudowana (użyto makra LED_BUILTIN). Przejdźmy dalej…

FUNKCJA RESETPID() ORAZ RESETMOTORS()

Funkcje resetPid oraz resetMotors omówimy razem ponieważ maja taka sama zasadę działania -> resetują 😉 funkcja resetPid ustawia NAJWAŻNIEJSZE rollPid oraz pitchPid, yawPid na 0. Poza tym daje tez wszystkie inne parametry wykorzystywane podczas algorytmu PID na 0 tak żeby dron NIE MIAŁ PRAWA JUŻ POLECIEC.

```
void resetPid(void) {   //used for resettin pid after completed fly
   rollPrevError = 0; pitchPrevError = 0;
   rollITerm = 0; rollDTerm = 0; rollPTerm = 0;
   pitchITerm = 0; pitchDTerm = 0; pitchPTerm = 0;
   rollPid = 0; pitchPid = 0; yawPid = 0;
}
```

Funkcja resetMotors analogicznie… dajemy wykrywany przez ESC sygnał PWM 1500 odpowiadający informacji: CHEJ WEŹ TE SILNIKI WYŁĄCZ! (czyli 0mm/s). Realizujemy za pomocą funkcji writeMicroseconds(). Da się tez od razu powiem za pomocą analog write ale jest to trudne ponieważ jak wiesz mamy tam do wyboru tylko zakres 0-255 (ciężko jest w tak małym zakresie regulować tak potężne silniki (mała zmiana PWM a ogromne zmiany szybkości)

```
void resetMotors(void) {  //used to reset motors after flight
   upperLeftMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
   upperRightMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
   downLeftMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
   downRightMotor.writeMicroseconds(throttleCutOff);
}
```

FUNKCJA ANGLESREAD() I KALIBRACJA MPU6050

Dobra teraz zaczyna się zabawa, spojrzmy na niepozorna funckje aglesRead():

```
void anglesRead(void) {
   mpu.update();
   angleX = mpu.getAngleY();  //calculatin inclination angles usin complementary filter
   angleY = mpu.getAngleX(); //changing order cause of mpu placement
   angleZ = mpu.getAngleZ();
}
```

W pierwszym kroku aktualizujemy wskazania z MPU6050 (odczytujemy wartość z rejestru za pomocą funkcji update() następnie za pomocą funkcji katów eulera odczytujemy wartości odpowiednich katów: ROLL (kat obrotu wokół osi X), PITCH (kat obrotu wokół osi Y) i YAW (kat obrotu wokół osi Z). W tym przykładzie celowo użyłem biblioteki żeby nie utrudniać zbytnio tej funkcji. Po odczytaniu katów biblioteka już za nas odpowiednio łączy ze sobą katy odczytane za pomocą akcelerometru oraz żyroskopu za pomocą filtru komplementarnego. Jak działa filtr komplementarny? Uproszczę tutaj sprawę jest to kombinacja tkz. LPF i HPF (low pass filter i high pass filter). Tzn. ponieważ wiemy, że na skutek całkowania pojawia się zjawisko gyro drift a na skutek zbyt dużych szumów dla acceleration angles nie możemy brać tylko jednej z tych wartości musimy je jakość sprytnie zsumować tak żeby w rezultacie wynik był jak najbliższy rzeczywistości. Dlatego w praktyce przepuszczamy w większości kąt obliczony od gyro, a w mniejszości przepuszczamy kod od acceleration, tak tylko żeby korygować wartości kątów z gyro (tzn. dajemy HPF do gyro i LPF do accelerometer), w rezultacie mamy: 0.99 * gyroAngle + 0.01 * accAngle. Wkleję tutaj jeszcze kod starej funkcji do odczytu katów (używający wlasnie tego algorytmu, tyle że w postaci jawnej:

```
void anglesRead(void) {
   Wire.beginTransmission(0x68);   //startin communication for gyro
   Wire.write(0x43);   //gyro register
   Wire.endTransmission(false);
   Wire.requestFrom(0x68, 4, true);
   rateY = Wire.read() << 8 | Wire.read(); //readin y first beacause of mpu placement on drone
   rateX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
   rateX = (rateX / 32.8) - rateXError;    //32.8 corresponding 1000dps value
   rateY = (rateY / 32.8) - rateYError;  //convertin to deg/s
   angleXRate = rateX * elapsedTime;   //takin discrete for of integral for angle
   angleYRate = rateY * elapsedTime;
   Wire.beginTransmission(0x68);   //startin communication for acc
```

```
  Wire.write(0x3B);   //acc register
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(0x68, 6, true);
  accY = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0;   //readin y first beacause of mpu placement on drone
  accX = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0;  //converting to m/s^2
  accZ = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0;
  angleXAcc = (atan((accY) / sqrt(pow((accX), 2) + pow((accZ), 2))) * radToDeg) - accAngleXError;
  angleYAcc = (atan(-1 * (accX) / sqrt(pow((accY), 2) + pow((accZ), 2))) * radToDeg) - accAngleYError;
  angleX = 0.99 * (angleX + angleXRate) + 0.01 * angleXAcc;  //calculatin inclination angles usin complementary filter
  angleY = 0.99 * (angleY + angleYRate) + 0.01 * angleYAcc;
}
```

Na temat katów eulera tez mógłbym się rozpisywać bardzo długo, ale nie jest to konieczne, my po prostu używamy wzorów tylko i aż tylko. Jeżeli chcesz poczytać więcej dobrze jest opisane to zagadnienie na stronie anglosaskiej wiki: Euler angles - Wikipedia

Nasze IMU (MPU6050) musimy jeszcze jakoś skalibrować chcemy w końcu, żeby przy starcie kąt roll, pitch, yaw były równe zero by mieć prawidłowy punkt odniesienia. Jak to zrobić? SKALIBROWAĆ 😊 Służy do tego funkcja także z libki MPU6050_light.h o nazwie: mpu.calcOffsets(). Zczytujemy od 1000 – 4000 pomiarów wartości kątowej oraz wartości przyspieszenia i limy z nich średnia. Po to by na końcu odejmować ta wartość początkowego odchyłu od pozostałych wartości tak by w rezultacie mieć 0 na początku, starzy kod, który robił to w sposób jawny (oczywiście odczytów z rejestrów nie będę tłumaczył nie ma to najmniejszego sensu, jest to po prostu sposób komunikacji z większości układów elektronicznych):

```
void calibMpu(void) {
  Wire.begin(); //start wire comunication
  Wire.beginTransmission(0x68); //start communication with gy521
  Wire.write(0x6B); //reset current config
  Wire.write(0x00);
  Wire.endTransmission(true);   //end transmission
  Wire.beginTransmission(0x68); //start communication for gyro config
  Wire.write(0x1B); //gyro register
  Wire.write(0x10); //settin gyro register (1000dps scale)
  Wire.endTransmission(true);
  Wire.beginTransmission(0x68); //start communication for acc config
  Wire.write(0x1C); //acc register
  Wire.write(0x10); //settin acc register (8g scale)
  Wire.endTransmission(true);
  if(accCalib == 0) { //calibration for accelerometer
    for(int a = 0; a < 2000; a++) {
      Wire.beginTransmission(0x68);
      Wire.write(0x3B); //acc register address
      Wire.endTransmission(false);
      Wire.requestFrom(0x68, 6, true);  //16b for 1 info about acc
      accY = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0;
      accX = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0; //1 reister address = 8b = 2B
      accZ = (Wire.read() << 8 | Wire.read()) / 4096.0;
      accAngleXError = accAngleXError + ((atan((accY) / sqrt(pow((accX), 2) + pow((accZ), 2))) * radToDeg));  //calculatin sum of acc angles
      accAngleYError = accAngleYError + ((atan(-1 * (accX) / sqrt(pow((accY), 2) + pow((accZ), 2))) * radToDeg));
    }
    accAngleXError = accAngleXError / 2000;
    accAngleYError = accAngleYError / 2000;
    accCalib = 1;
  }
  if(rateCalib == 0) {    //calibration for gyro
    for(int i = 0; i < 2000; i++) {
      Wire.beginTransmission(0x68);
      Wire.write(0x43); //gyro registr address
      Wire.endTransmission(false);
      Wire.requestFrom(0x68, 4, true);  //16b for 1 info about gyro, total of 4 * 8 = 32b here
      rateY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
```

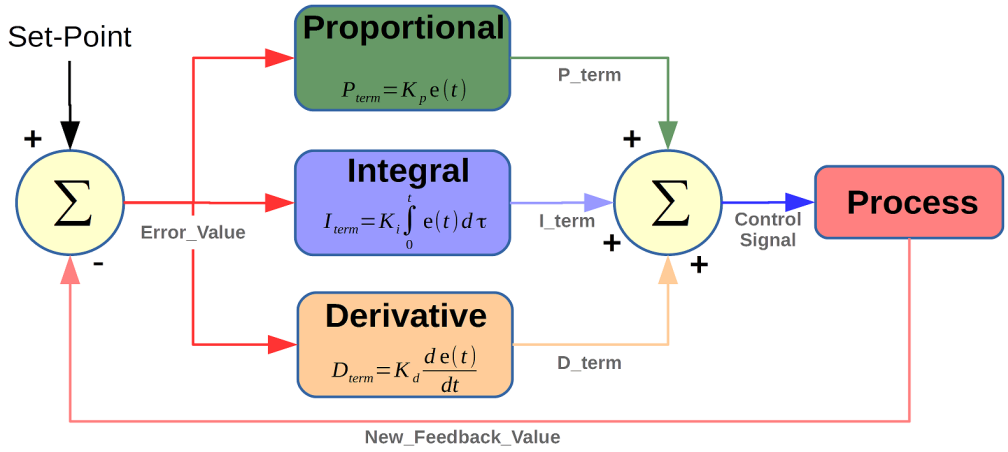
```
        rateX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
        rateXError = rateXError + (rateX / 32.8);   //calculatin sum of rates
        rateYError = rateYError + (rateY / 32.8);
      }
      rateXError = rateXError / 2000;
      rateYError = rateYError / 2000;
      rateCalib = 1;
    }
}
```

FUNKCJA PIDEQUATION()

Kolejna ciężka rzecz to PID… Teraz tak omówmy działanie tego algorytmu jedynie dla wartości ROLL angle, bo dla pitch i yaw jest to analogiczne. do prawidłowego działania pid potrzebuje wartość błędu miedzy wartością docelowa pewnej wartości która regulujemy a wartością aktualna. Żeby ta różnice uzyskać, dajemy rollError = angleX - desiredXAngle; W samym algorytmie mamy 3 części: cześć proporcjonalna, całkująca i różniczkująca które operują wlasnie na tym błędzie, przy czym za pomocą części proporcjonalnej liczmy wartość błędu aktualnego, różnicującej – części przyszłego i całkującej błędu przeszłego. Kombinacja tych 3 części daje nam bardzo dobre przybliżenie co dzieje się obecnie z regulowanym obiektem i jaki sygnał powinniśmy mu dać by odpowiedni wyregulować go do wartości oczekiwanej (setpoint). Potrzebujemy także odstępu czasu który liczmy odejmując od aktualnej wartości czasu zmierzonej za pomocą millis(), wartość poprzednia zmierzona w zmiennej time. Mamy więc wzory:

- rollPTerm = rollPConstant * rollError
- rollITerm = rollITerm + (rollIConstant * (rollError + rollPrevError) * (elapsedTime / 2));
- rollDTerm = rollDConstant * ((rollError - rollPrevError) / elapsedTime);

Cały schemat działania PID świetnie ilustruje tabela:



Kodzik:

```
void pidEquation(void) {
   desiredXAngle = 0;   //pid desired angles of inclination we would normally inputh here values from communication modules
   desiredYAngle = 0;
   desiredZAngle = 0;
   rollError = angleX - desiredXAngle;  //difference between current angle and desired one
   pitchError = angleY - desiredYAngle;
   yawError = angleZ - desiredZAngle;
   rollPTerm = rollPConstant * rollError; //proportional terms of roll and pitch
   pitchPTerm = pitchPConstant * pitchError;
   yawPTerm = yawPConstant * yawError;
   rollITerm = rollITerm + (rollIConstant * (rollError + rollPrevError) * (elapsedTime / 2));    //integral term to smooth little error bet. -
3deg:3deg
   pitchITerm = pitchITerm + (pitchIConstant * (pitchError + pitchPrevError) * (elapsedTime / 2));
   yawITerm = yawITerm + (yawIConstant * (yawError + yawPrevError) * (elapsedTime / 2));
   if(rollITerm > 400)   rollITerm = 400;
   else if(rollITerm < -400)   rollITerm = -400;
   if(pitchITerm > 400)   pitchITerm = 400;
   else if(pitchITerm < -400)   pitchITerm = -400;
   if(yawITerm > 400)   yawITerm = 400;
```

```
  else if(yawITerm < -400)   yawITerm = -400;
  rollDTerm = rollDConstant * ((rollError - rollPrevError) / elapsedTime);   //derivative term = DConst*(dE/dt)
  pitchDTerm = pitchDConstant * ((pitchError - pitchPrevError) / elapsedTime);
  yawDTerm = yawDConstant * ((yawError - yawPrevError) / elapsedTime);
  rollPid = rollPTerm + rollITerm + rollDTerm;   //final "calib" values from pid
  pitchPid = pitchPTerm + pitchITerm + pitchDTerm;
  yawPid = yawPTerm + yawITerm + yawDTerm;
  if(rollPid < -400) {
    rollPid = -400;   //security check to not exceed min/max pwm
  }
  if(rollPid > 400) {
    rollPid = 400;
  }
  if(pitchPid < -400) {
    pitchPid = -400;
  }
  if(pitchPid > 400) {
    pitchPid = 400;
  }
  if(yawPid < -400) {
    yawPid = -400;
  }
  if(yawPid > 400) {
    yawPid = 400;
  }
}
```

Co jeszcze bardzo istotne to to żebyśmy zabezpieczyli drona przed tkz. zjawiskiem integral windup związanym z kumulowanie przeszłych błędów. Stąd dajemy ograniczenie: if(rollITerm > 400)   rollITerm = 400; else if(rollITerm < -400)   rollITerm = -400; No I też nie chcemy by wartości końcowe regulacji rollPid przekraczały zbyt duże wartości (to ustawiamy arbitralnie, poprzez doświadczenia). Natomiast stale P, I, D używane w procesie (u nas:

```
float rollPConstant = 0.7f; //3.55
float rollIConstant = 0.006f;   //0.003
float rollDConstant = 1.2f; //2.05
```

) Wyznaczamy w sposób doświadczalny tak żeby dron nie wariował, u nas się to jeszcze nie udało :/ (służy do tego m.in. metoda Zieglera-Nicholsa, Cohena lub metoda lambda)

FUNKCJE UPDATE() I FLY()

Funkcje update() i fly() służą do kontroli lotu stricte dlatego omówimy je razem. Funkcja update oblicza odpowiednie wartości sygnałów podawanych na odpowiednie silniki te wartości obliczane są według ścisłych wzorów, tak żeby wszystko działało, np. dla prawego górnego silnika mamy: upperRightPwm = gainConst * (-rollPid - pitchPid - yawPid);   Gdzie gain const to dodatkowa stała wzmocnienia używana gdy wartość sygnału jest za słaba w stosunku do oczekiwań gdy dron zbyt słabo reaguje na wartości zmiany kata inklinacji. Od 1 do 4 doświadczalnie u nas przyjęta. Później sprawdzamy czy wypadkowa wartość, którą teraz mamy jako np.: upperRightPwmFinal = upperRightPwm + throttleValue; tzn. wartość, która chcemy uzyskać + wartość regulacji z Pid, mieści się w wymaganym zakresie od 1100 do 2000 tylko na takie wartości reaguje nasze ESC. Na końcu przypisujemy np. upperRightPwmFinal do motora upperRight za pomocą writeMicroseconds().

```
void update(int throttleValue) {
  timePrev = time;
  time = millis();   //one loop iteration time used for integration
  elapsedTime = (time - timePrev) / 1000;   //ms -> s : 1 / 1000
  upperRightPwm = gainConst * (-rollPid - pitchPid - yawPid);   //motors pwm calculation
  downRightPwm = gainConst * (-rollPid + pitchPid + yawPid);
  downLeftPwm = gainConst * (rollPid + pitchPid - yawPid);
  upperLeftPwm = gainConst * (rollPid - pitchPid + yawPid);
  upperLeftPwmFinal = upperLeftPwm + throttleValue;
  downLeftPwmFinal = downLeftPwm + throttleValue;
```

```
  upperRightPwmFinal = upperRightPwm + throttleValue;
  downRightPwmFinal = downRightPwm + throttleValue;
  if(upperRightPwmFinal < 1100) {  //security check to not exceed min/max pwm
    upperRightPwmFinal = 1100;
  }
  if(upperRightPwmFinal > 2000) {
    upperRightPwmFinal = 2000;
  }
  if(upperLeftPwmFinal < 1100) {
    upperLeftPwmFinal = 1100;
  }
  if(upperLeftPwmFinal > 2000) {
    upperLeftPwmFinal = 2000;
  }
  if(downRightPwmFinal < 1100)
  {
    downRightPwmFinal = 1100;
  }
  if(downRightPwmFinal > 2000) {
    downRightPwmFinal = 2000;
  }
  if(downLeftPwmFinal < 1100) {
    downLeftPwmFinal = 1100;
  }
  if(downLeftPwmFinal > 2000) {
    downLeftPwmFinal = 2000;
  }
  rollPrevError = rollError; //storin prev errors for roll and pitch
  pitchPrevError = pitchError;
  yawPrevError = yawError;
  upperLeftMotor.writeMicroseconds(upperLeftPwmFinal);
  downLeftMotor.writeMicroseconds(downLeftPwmFinal);
  upperRightMotor.writeMicroseconds(upperRightPwmFinal);
  downRightMotor.writeMicroseconds(downRightPwmFinal);
  Serial.println("UR, DR: " + String(upperRightPwmFinal) + " " + String(downRightPwmFinal) + " UL, DL: " + String(upperLeftPwmFinal) + " "
+ String(downLeftPwmFinal));
}
```

Funkcja fly() służy już tylko i wyłącznie do obsługi lotu, tzn. chcemy zrealizować zadanie lec w górę na obrotach danych przez wartość 1800us = maxFlyable przez 5 sekund, zacznij zwalniać do 1650 (żeby zaczął opadać) i tak przez 20 sekund utrzymuj tą wartość żeby dron opadł na ziemie. W miedzy czasie reguluj wartość kata inklinacji drona za pomocą PID oraz anglesRead() który będzie mu dostarczał aktualne wartości katów. Na końcu ustaw zmienna kontrolna na 1 żeby dron już więcej nie poleciał, zresetuj pid i motory (żeby mieć dodatkowa pewność).

```
void fly(void) {
  if (wasThereFlight == 0) {
    for (int i = throttleCutOff; i < maxFlyable; i++) { //increasing throttle from 1500
      update(i);
    }
    flyTime = millis();
    while (millis() - flyTime < 5000UL) { //fly up until less than 5s
      anglesRead(); //readin angles
      pidEquation();  //readin final pid for roll and pitch angles
      update(maxFlyable);
    }
    rollPid = 0; pitchPid = 0;
    for (int i = maxFlyable; i > minFlyable; i--) { //decreasing throttle
      update(i);
    }
```

```
      rollPid = 0; pitchPid = 0;
      flyTime = millis();
      while (millis() - flyTime < 20000UL) { //falling
        anglesRead(); //readin angles
        pidEquation();  //readin final pid for roll and pitch angles
        update(minFlyable);
      }
      rollPid = 0; pitchPid = 0;
      for (int i = minFlyable; i > throttleCutOff; i--) { //slowin motors to no rotation pwm value
        update(i);
      }
      wasThereFlight = 1; //security check
      resetPid();
      resetMotors();
    }
}
```

FUNKCJA SETUP() I LOOP()

I to by było na tyle jeszcze może komentarza wymagałoby co dzieje się funkcji setup()? Jeżeli tak to po prostu dołączamy tam silniki BLDC zgodnie ze standardem nadając wartości krańcowe dla ESC 1000 oraz 2000. (taki jest schemat po prostu). Oprócz tego kalibrujemy MPU6050 tak jak to opisaliśmy powyżej oraz sprawdzamy czy wgl. jest podłączone nasze MPU jak nie to migamy diodka. Jak wszystko jest git to przechodzimy do loop() która wywołuje fly(), która wywołuje anglesRead(), pidEquation(), update() i swoje działania realizuje i tak w kółeczko 😊

KOD FLIGHT CONTROLLERA (STM32F103C8T6, REV.4)

Kod jest odpowiedzialny za sterowanie dronem, w tym za konfigurację i kalibrację żyroskopu, obsługę sygnałów z odbiornika, implementację regulatorów PID oraz kontrolę diod LED sygnalizujących stan drona. Zaczniemy podobnie co poprzednio także wkleję Ci cały kod, a później przejdę do szczegółowego objaśniania go.

```
#include <Wire.h>
TwoWire Wire2(2, I2C_FAST_MODE); // inicjalizacja I2C2 (piny B10 - SCL, B11 - SDA (domyslnie wire obsluguje I2C1)

// ustawienia pid dla roll
float pid_p_gain_roll = 1.3;
float pid_i_gain_roll = 0.04;
float pid_d_gain_roll = 18.0;
int pid_max_roll = 400;
// ustawienia pid dla pitch
float pid_p_gain_pitch = pid_p_gain_roll;
float pid_i_gain_pitch = pid_i_gain_roll;
float pid_d_gain_pitch = pid_d_gain_roll;
int pid_max_pitch = pid_max_roll;
// ustawienia pid dla yaw
float pid_p_gain_yaw = 4.0;
float pid_i_gain_yaw = 0.02;
float pid_d_gain_yaw = 0.0;
int pid_max_yaw = 400;
// odpowiada za wlaczenie kontroli poziomu do drona
boolean auto_level = true;
float pid_error_temp;
float pid_i_mem_roll, pid_roll_setpoint, gyro_roll_input, pid_output_roll, pid_last_roll_d_error;
float pid_i_mem_pitch, pid_pitch_setpoint, gyro_pitch_input, pid_output_pitch, pid_last_pitch_d_error;
float pid_i_mem_yaw, pid_yaw_setpoint, gyro_yaw_input, pid_output_yaw, pid_last_yaw_d_error;
//do standaryzacji setpointu dla pidu
float roll_level_adjust, pitch_level_adjust;

// ustawienie wartosci kalibracyjnych manualnych dla temp ~25*C
uint8_t use_manual_calibration = true;
int16_t manual_acc_pitch_cal_value = 115;
int16_t manual_acc_roll_cal_value = -78;
int16_t manual_gyro_pitch_cal_value = -212;
int16_t manual_gyro_roll_cal_value = 504;
int16_t manual_gyro_yaw_cal_value = -45;
// adres gy521
uint8_t gyro_address = 0x68;
// zmienne  kalibracyjne oraz do acc i gyro
int16_t temperature, count_var;
int16_t acc_x, acc_y, acc_z;
int16_t gyro_pitch, gyro_roll, gyro_yaw;
int32_t acc_total_vector;
int32_t gyro_roll_cal, gyro_pitch_cal, gyro_yaw_cal;
float angle_roll_acc, angle_pitch_acc, angle_pitch, angle_roll;

// zmienne pomocnicze do sygnalizacji stanow drona
uint8_t last_channel_1, last_channel_2, last_channel_3, last_channel_4;
uint8_t highByte, lowByte, start;
```

```
uint8_t error, error_counter, error_led;
float battery_voltage;

// pwm do esc i zmienne do motors
int16_t esc_1, esc_2, esc_3, esc_4;
int16_t throttle, cal_int;

// zmienne do receivera
int32_t channel_1_start, channel_1;
int32_t channel_2_start, channel_2;
int32_t channel_3_start, channel_3;
int32_t channel_4_start, channel_4;
int32_t channel_5_start, channel_5;
int32_t channel_6_start, channel_6;

// do kontrolowania czasu obiegu kazdej iteracji
uint32_t loop_timer, error_timer;



// do ustawienia stanu na diodzie (sygnalizacja stanu drona) DO IMPL !!!NA PLYTCE!!!
void red_led(int8_t level) {
  digitalWrite(PB4, level);
}

void green_led(int8_t level) {
  digitalWrite(PB3, level);
}



// funkcja pid dzialajaca w przerwaniach
void calculate_pid(void){
  // obliczenie dla czesci integrujacej, prop, roznicz roll
  pid_error_temp = gyro_roll_input - pid_roll_setpoint;
  pid_i_mem_roll += pid_i_gain_roll * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_roll > pid_max_roll)
    pid_i_mem_roll = pid_max_roll;
  else if(pid_i_mem_roll < pid_max_roll * -1)
    pid_i_mem_roll = pid_max_roll * -1;
  // output dla roll KpEp + KiEi + KdEd
  pid_output_roll = pid_p_gain_roll * pid_error_temp + pid_i_mem_roll + pid_d_gain_roll * (pid_error_temp - pid_last_roll_d_error);
  if(pid_output_roll > pid_max_roll)
    pid_output_roll = pid_max_roll;
  else if(pid_output_roll < pid_max_roll * -1)
    pid_output_roll = pid_max_roll * -1;
  pid_last_roll_d_error = pid_error_temp;

  // obliczenie dla czesci integrujacej, prop, roznicz pitch
  pid_error_temp = gyro_pitch_input - pid_pitch_setpoint;
  pid_i_mem_pitch += pid_i_gain_pitch * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_pitch > pid_max_pitch)
    pid_i_mem_pitch = pid_max_pitch;
  else if(pid_i_mem_pitch < pid_max_pitch * -1)
    pid_i_mem_pitch = pid_max_pitch * -1;
  // output dla pitch KpEp + KiEi + KdEd
```

```
  pid_output_pitch = pid_p_gain_pitch * pid_error_temp + pid_i_mem_pitch + pid_d_gain_pitch * (pid_error_temp - pid_last_pitch_d_error);
  if(pid_output_pitch > pid_max_pitch)
    pid_output_pitch = pid_max_pitch;
  else if(pid_output_pitch < pid_max_pitch * -1)
    pid_output_pitch = pid_max_pitch * -1;
  pid_last_pitch_d_error = pid_error_temp;

  // obliczenie dla czesci integrujacej, prop, roznicz yaw
  pid_error_temp = gyro_yaw_input - pid_yaw_setpoint;
  pid_i_mem_yaw += pid_i_gain_yaw * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_yaw > pid_max_yaw)
    pid_i_mem_yaw = pid_max_yaw;
  else if(pid_i_mem_yaw < pid_max_yaw * -1)
    pid_i_mem_yaw = pid_max_yaw * -1;
  // output dla yaw KpEp + KiEi + KdEd
  pid_output_yaw = pid_p_gain_yaw * pid_error_temp + pid_i_mem_yaw + pid_d_gain_yaw * (pid_error_temp - pid_last_yaw_d_error);
  if(pid_output_yaw > pid_max_yaw)pid_output_yaw = pid_max_yaw;
  else if(pid_output_yaw < pid_max_yaw * -1)pid_output_yaw = pid_max_yaw * -1;
  pid_last_yaw_d_error = pid_error_temp;
}



// funkcja pid dzialajaca w przerwaniach
void calibrate_gyro(void) {
  // przeskakujemy kalibracje gdy mamy wartosci doswiadczalne ;)
  if (use_manual_calibration)
    cal_int = 2000;
  else {
    cal_int = 0;
    manual_gyro_pitch_cal_value = 0;
    manual_gyro_roll_cal_value = 0;
    manual_gyro_yaw_cal_value = 0;
  }
  //jezeli ustawilismy kalib automatyczna (podstawy drona musza byc !!!IDEALNIE ROWNE!!! -> do poprawy)
  if (cal_int != 2000) {
    //probkujemy (2000d) dane z gyro
    for (cal_int = 0; cal_int < 2000 ; cal_int ++) {
      if (cal_int % 25 == 0)
        digitalWrite(PB4, !digitalRead(PB4));
      gyro_signals();
      gyro_roll_cal += gyro_roll;
      gyro_pitch_cal += gyro_pitch;
      gyro_yaw_cal += gyro_yaw;
      delay(4);
    }
    red_led(HIGH);
    //bierzemy srednia artmetyczna z danych w celu uzyskania wart z kalibracji AVR be like
    gyro_roll_cal /= 2000;
    gyro_pitch_cal /= 2000;
    gyro_yaw_cal /= 2000;
    manual_gyro_pitch_cal_value = gyro_pitch_cal;
    manual_gyro_roll_cal_value = gyro_roll_cal;
    manual_gyro_yaw_cal_value = gyro_yaw_cal;
  }
}
```

```
// funkcja do pokazania sygnalu bledu
void error_signal(void){
  if (error >= 100)
    red_led(HIGH);
  //sprawdzenie czy minelo >= 250ms i stanu error'ow
  else if (error_timer < millis()){
    error_timer = millis() + 250;
    //do kodow bledow kazdy blad ma inny kodzik ;)
    if(error > 0 && error_counter > error + 3)
      error_counter = 0;
    if (error_counter < error && error_led == 0 && error > 0){
      red_led(HIGH);
      error_led = 1;
    }
    // wylaczamy diode i zwiekszamy counter bledow o 1
    else{
      red_led(LOW);
      error_counter++;
      error_led = 0;
    }
  }
}



// funkcja do nawiazywania polaczenia z gy521
void gyro_setup(void){
  // nawiazujemy polaczenie z gy521 i je aktywujemy
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  Wire2.write(0x6B);
  Wire2.write(0x00);
  Wire2.endTransmission();
  // ustawiamy skale 500dps
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  Wire2.write(0x1B);
  Wire2.write(0x08);
  Wire2.endTransmission();
  // ustawiamy skale (+/-)8g
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  Wire2.write(0x1C);
  Wire2.write(0x10);
  Wire2.endTransmission();
  // ustawiamy lpf w celu wyeliminowania zaklocen wysokiego pasma (tzn. ok. 42Hz)
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  Wire2.write(0x1A);
  Wire2.write(0x03);
  Wire2.endTransmission();
}



//funkcja do obslugi receivera (channel 1)
void handler_channel_1(void) {
```

```
  //jezeli stan na A0 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR  >> 0) {
    channel_1_start = TIMER2_BASE->CCR1;
    TIMER2_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC1P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_1 = TIMER2_BASE->CCR1 - channel_1_start;
    if (channel_1 < 0)
      channel_1 += 0xFFFF;
    TIMER2_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC1P;
  }
}
//funkcja do obslugi receivera (channel 2)
void handler_channel_2(void) {
  //jezeli stan na A1 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR >> 1) {
    channel_2_start = TIMER2_BASE->CCR2;
    TIMER2_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC2P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_2 = TIMER2_BASE->CCR2 - channel_2_start;
    if (channel_2 < 0)
      channel_2 += 0xFFFF;
    TIMER2_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC2P;
  }
}
//funkcja do obslugi receivera (channel 3)
void handler_channel_3(void) {
  //jezeli stan na A2 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR >> 2) {
    channel_3_start = TIMER2_BASE->CCR3;
    TIMER2_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC3P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_3 = TIMER2_BASE->CCR3 - channel_3_start;
    if (channel_3 < 0)
      channel_3 += 0xFFFF;
    TIMER2_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC3P;
  }
}
//funkcja do obslugi receivera (channel 4)
void handler_channel_4(void) {
  //jezeli stan na A3 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR >> 3) {
    channel_4_start = TIMER2_BASE->CCR4;
    TIMER2_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC4P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_4 = TIMER2_BASE->CCR4 - channel_4_start;
    if (channel_4 < 0)
      channel_4 += 0xFFFF;
    TIMER2_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC4P;
```

```
  }
}
//funkcja do obslugi receivera (channel 5)
void handler_channel_5(void) {
  //jezeli stan na A4 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR >> 6) {
    channel_5_start = TIMER3_BASE->CCR1;
    TIMER3_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC1P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_5 = TIMER3_BASE->CCR1 - channel_5_start;
    if (channel_5 < 0)
      channel_5 += 0xFFFF;
    TIMER3_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC1P;
  }
}
//funkcja do obslugi receivera (channel 6)
void handler_channel_6(void) {
  //jezeli stan na A5 jest HIGH -> zczytujemy czas RISE_EDGE
  if (0b1 & GPIOA_BASE->IDR >> 7) {
    channel_6_start = TIMER3_BASE->CCR2;
    TIMER3_BASE->CCER |= TIMER_CCER_CC2P;
  }
  //obliczamy calkowita dlugosc trwania pulsu RISE_EDGE-FALL_EDGE
  else {
    channel_6 = TIMER3_BASE->CCR2 - channel_6_start;
    if (channel_6 < 0)
      channel_6 += 0xFFFF;
    TIMER3_BASE->CCER &= ~TIMER_CCER_CC2P;
  }
}



// odczyt gyro i acc z mpu6050 (gy521)
void gyro_signals(void) {
  //ropoczynamy komunikacje a pozniej zaczynamy czytac...
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  Wire2.write(0x3B);
  Wire2.endTransmission();
  Wire2.requestFrom(gyro_address, 14);
  //shiftujemy w lewo bity zeby starczylo na kolejne dane
  acc_y = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  acc_x = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  acc_z = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  temperature = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_roll = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_pitch = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_yaw = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_pitch *= -1;
  gyro_yaw *= -1;
  //odejmujemy od wartosci odczytaj wartosc manualnej (gdy mamy wlaczona) lub automatyczna (przypisana do manulanej ;))
  acc_y -= manual_acc_pitch_cal_value;
  acc_x -= manual_acc_roll_cal_value;
  gyro_roll -= manual_gyro_roll_cal_value;
```

```
  gyro_pitch -= manual_gyro_pitch_cal_value;
  gyro_yaw -= manual_gyro_yaw_cal_value;
}



// timer do obslugi przerwan
void timer_setup(void) {
  // przerwania do handlera 1, 2, 3, 4
  Timer2.attachCompare1Interrupt(handler_channel_1);
  Timer2.attachCompare2Interrupt(handler_channel_2);
  Timer2.attachCompare3Interrupt(handler_channel_3);
  Timer2.attachCompare4Interrupt(handler_channel_4);
  TIMER2_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN;
  TIMER2_BASE->CR2 = 0;
  TIMER2_BASE->SMCR = 0;
  TIMER2_BASE->DIER = TIMER_DIER_CC1IE | TIMER_DIER_CC2IE | TIMER_DIER_CC3IE | TIMER_DIER_CC4IE;
  TIMER2_BASE->EGR = 0;
  TIMER2_BASE->CCMR1 = 0b100000001;
  TIMER2_BASE->CCMR2 = 0b100000001;
  TIMER2_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E | TIMER_CCER_CC3E | TIMER_CCER_CC4E;
  TIMER2_BASE->PSC = 71;
  TIMER2_BASE->ARR = 0xFFFF;
  TIMER2_BASE->DCR = 0;
  // przerwania do handlera 5, 6
  Timer3.attachCompare1Interrupt(handler_channel_5);
  Timer3.attachCompare2Interrupt(handler_channel_6);
  TIMER3_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN;
  TIMER3_BASE->CR2 = 0;
  TIMER3_BASE->SMCR = 0;
  TIMER3_BASE->DIER = TIMER_DIER_CC1IE | TIMER_DIER_CC2IE;
  TIMER3_BASE->EGR = 0;
  TIMER3_BASE->CCMR1 = 0b100000001;
  TIMER3_BASE->CCMR2 = 0;
  TIMER3_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E;
  TIMER3_BASE->PSC = 71;
  TIMER3_BASE->ARR = 0xFFFF;
  TIMER3_BASE->DCR = 0;
  //wlaczenie timera 4 i dla niego przerwan
  TIMER4_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN | TIMER_CR1_ARPE;
  TIMER4_BASE->CR2 = 0;
  TIMER4_BASE->SMCR = 0;
  TIMER4_BASE->DIER = 0;
  TIMER4_BASE->EGR = 0;
  TIMER4_BASE->CCMR1 = (0b110 << 4) | TIMER_CCMR1_OC1PE |(0b110 << 12) | TIMER_CCMR1_OC2PE;
  TIMER4_BASE->CCMR2 = (0b110 << 4) | TIMER_CCMR2_OC3PE |(0b110 << 12) | TIMER_CCMR2_OC4PE;
  TIMER4_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E | TIMER_CCER_CC3E | TIMER_CCER_CC4E;
  TIMER4_BASE->PSC = 71;
  TIMER4_BASE->ARR = 5000;
  TIMER4_BASE->DCR = 0;
  TIMER4_BASE->CCR1 = 1000;
  TIMER4_BASE->CCR1 = 1000;
  TIMER4_BASE->CCR2 = 1000;
  TIMER4_BASE->CCR3 = 1000;
  TIMER4_BASE->CCR4 = 1000;
  pinMode(PB6, PWM);
```

```
  pinMode(PB7, PWM);
  pinMode(PB8, PWM);
  pinMode(PB9, PWM);
}



// bateria, gyro, kalibracja gyro
void setup() {
  //batt
  pinMode(4, INPUT_ANALOG);

  // umozliwia uzycie pb3 i pb4 jako i/o pin
  afio_cfg_debug_ports(AFIO_DEBUG_SW_ONLY);
  pinMode(PB3, OUTPUT);
  pinMode(PB4, OUTPUT);
  //na pb3
  green_led(LOW);
  // na pb4
  red_led(HIGH);

  // do debugu
  //Serial.begin(115200);
  //delay(250);

  // setup timerow do przerwan
  timer_setup();
  delay(50);

  // sprawdzenie poprawnosci komunikacji z mpu6050
  Wire2.begin();
  Wire2.beginTransmission(gyro_address);
  error = Wire2.endTransmission();
  while (error != 0) {
    //kod bledu komunikacji z gy521 jest 2
    error = 2;
    error_signal();
    delay(4);
  }

  // setup do zyroskopu (kalibracja zyroskopu)
  gyro_setup();
  //jezeli kalibracja automatyczna -> wywolanie sekwencji sygnalizacyjnej
  if (!use_manual_calibration) {
    for (count_var = 0; count_var < 1250; count_var++) {
      if (count_var % 125 == 0) {
        digitalWrite(PB4, !digitalRead(PB4));
      }
      delay(4);
    }
    count_var = 0;
  }
  //kalibracja zyroskpu
  calibrate_gyro();

  //nieprawidlowe sygnaly transmittera sygnaly bledu
```

```
  while (channel_1 < 990 || channel_2 < 990 || channel_3 < 990 || channel_4 < 990)  {
    //kod bledu 3
    error = 3;
    error_signal();
    delay(4);
  }
  error = 0;

  //koniecznosc ustawienia throttle w pozycji poczatkowej
  while (channel_3 < 990 || channel_3 > 1050) {
    //gdy nie mamy ustawienia poczatkowego -> blad
    error = 4;
    error_signal();
    delay(4);
  }
  error = 0;

  //wylaczamy diode kiedy wszystkie procedury wykonane
  red_led(LOW);

  // 0 - 0V ; 4095 - 36.3V (11*3.3, poniewaz divider 1/11)
  battery_voltage = (float)analogRead(4) / 112.81;

  //wlaczamy timer do kontroli czasu kazdej iteracji
  loop_timer = micros();

  //sygnalizacja gotowosci do startu
  green_led(HIGH);
}



void loop() {
  // pokazujmey sygnaly ew bledow
  error_signal();

  // do zczytania acc, gyro, temp ustandaryzowanych za pomoca calib values
  gyro_signals();

  // konwersja na deg/s (65.5 = 1 deg/sec) wartosci do pid
  gyro_roll_input = (gyro_roll_input * 0.7) + (((float)gyro_roll / 65.5) * 0.3);
  gyro_pitch_input = (gyro_pitch_input * 0.7) + (((float)gyro_pitch / 65.5) * 0.3);
  gyro_yaw_input = (gyro_yaw_input * 0.7) + (((float)gyro_yaw / 65.5) * 0.3);
  // kat obliczany z gyro (kat dryfu) 0.0000611 = 1 / (250Hz / 65.5)
  angle_pitch += (float)gyro_pitch * 0.0000611;
  angle_roll += (float)gyro_roll * 0.0000611;
  // poprawka kata o wychylenie yaw
  angle_pitch -= angle_roll * sin((float)gyro_yaw * 0.000001066);
  angle_roll += angle_pitch * sin((float)gyro_yaw * 0.000001066);

  // obliczenie katow z przyspieszenia
  acc_total_vector = sqrt((acc_x * acc_x) + (acc_y * acc_y) + (acc_z * acc_z));
  // katy obliczane z przyspieszen dla kolejno pitch i roll
  if (abs(acc_y) < acc_total_vector) {
    angle_pitch_acc = asin((float)acc_y / acc_total_vector) * 57.296;
  }
```

```
  if (abs(acc_x) < acc_total_vector) {
    angle_roll_acc = asin((float)acc_x / acc_total_vector) * 57.296;
  }

  //filterek komplementarny
  angle_pitch = angle_pitch * 0.9996 + angle_pitch_acc * 0.0004;
  angle_roll = angle_roll * 0.9996 + angle_roll_acc * 0.0004;

  // doswiadczalna poprawka katow
  pitch_level_adjust = angle_pitch * 15;
  roll_level_adjust = angle_roll * 15;
  // jezeli nie chcemy by poprawka byla stosowana do autolevel'owania
  if (!auto_level) {
    pitch_level_adjust = 0;
    roll_level_adjust = 0;
  }



  // start silnikow: throttle LOW ; yaw LEFT
  if (channel_3 < 1050 && channel_4 < 1050)
    start = 1;
  // kiedy yaw > centrum (czyli kiedy joystick puścisz) startujemy silniki
  if (start == 1 && channel_3 < 1050 && channel_4 > 1450) {
    start = 2;

    // sygnal - wystartowalismy
    green_led(LOW);

    // na starcie kat z acc = katowi z gyro (niwelujemy rozbieznosci)
    angle_pitch = angle_pitch_acc;
    angle_roll = angle_roll_acc;
    // resetujemy tez wartosci do integral i d z pid zeby nie zaburzac startu
    pid_i_mem_roll = 0;
    pid_last_roll_d_error = 0;
    pid_i_mem_pitch = 0;
    pid_last_pitch_d_error = 0;
    pid_i_mem_yaw = 0;
    pid_last_yaw_d_error = 0;
  }
  // zatrzymanie silnikow: throttle LOW ; yaw RIGHT
  if (start == 2 && channel_3 < 1050 && channel_4 > 1950) {
    start = 0;
    // sygnal gotowosci do startu
    green_led(HIGH);
  }

  // setpoint dla roll
  pid_roll_setpoint = 0;
  // setpoint do pida dla pitch, roll, yaw zalezy od wartosci poszczegolnych wartosci z receivera (pasmo 1508 - 1492 jest martwym pasmem dodajemy
je do poprawy setpointa)
  if (channel_1 > 1508)
    pid_roll_setpoint = channel_1 - 1508;
  else if (channel_1 < 1492)
    pid_roll_setpoint = channel_1 - 1492;
  //obliczamy setpoint odejmujac wartosc korekcji kata
  pid_roll_setpoint -= roll_level_adjust;
```

```
  //zeby otrzymac wartosc ustandaryzowana setpoint'a w deg/s
  pid_roll_setpoint /= 3.0;

  // setpoint dla pitch
  pid_pitch_setpoint = 0;
  // setpoint do pida dla pitch, roll, yaw zalezy od wartosci poszczegolnych wartosci z receivera (pasmo 1508 - 1492 jest martwym pasmem dodajemy
je do poprawy setpointa)
  if (channel_2 > 1508)
    //odwrocenie pitch NOWE
    pid_pitch_setpoint = -channel_2 + 1508;
  else if (channel_2 < 1492)
    pid_pitch_setpoint = -channel_2 + 1492;
  //obliczamy setpoint odejmujac wartosc korekcji kata
  pid_pitch_setpoint -= pitch_level_adjust;
  //zeby otrzymac wartosc ustandaryzowana setpoint'a w deg/s
  pid_pitch_setpoint /= 3.0;

  // setpoint dla yaw
  pid_yaw_setpoint = 0;
  // setpoint do pida dla pitch, roll, yaw zalezy od wartosci poszczegolnych wartosci z receivera (pasmo 1508 - 1492 jest martwym pasmem dodajemy
je do poprawy setpointa)
  if (channel_3 > 1050) {
    if (channel_4 > 1508)
      //od razu ze standaryzacja /3
      pid_yaw_setpoint = (channel_4 - 1508) / 3.0;
    else if (channel_4 < 1492)
      pid_yaw_setpoint = (channel_4 - 1492) / 3.0;
  }

  //obliczenie wartosci outputu z pid
  calculate_pid();

  // obliczenie U na batt z pomoca filtra komplementarnego (doswiadczalne wyznaczenie)
  battery_voltage = battery_voltage * 0.92 + ((float)analogRead(4) / 1410.1);

  //jezeli U < 10V daj kod bledu
  if (battery_voltage < 10.0 && error == 0)
    error = 1;

  //throttle na kanale 3 odczytywane bezposrednio
  throttle = channel_3;

  // gdy gotowy do startu
  if (start == 2) {
    // 200 miejsca na pid i usera
    if (throttle > 1800) throttle = 1800;
    // obliczenie pwm na esc 1, 2, 3, 4
    esc_1 = throttle - pid_output_pitch + pid_output_roll - pid_output_yaw;
    esc_2 = throttle + pid_output_pitch + pid_output_roll + pid_output_yaw;
    esc_3 = throttle + pid_output_pitch - pid_output_roll - pid_output_yaw;
    esc_4 = throttle - pid_output_pitch - pid_output_roll + pid_output_yaw;
    // nie przekraczamy wartosci granicznych
    if (esc_1 < 1100)
      esc_1 = 1100;
    if (esc_2 < 1100)
      esc_2 = 1100;
```

```
    if (esc_3 < 1100)
      esc_3 = 1100;
    if (esc_4 < 1100)
      esc_4 = 1100;
    // nie przekraczamy wartosci granicznych
    if (esc_1 > 2000)
      esc_1 = 2000;
    if (esc_2 > 2000)
      esc_2 = 2000;
    if (esc_3 > 2000)
      esc_3 = 2000;
    if (esc_4 > 2000)
      esc_4 = 2000;
  }
  // jezeli nie start utrzymuj staly pwm 1000 na silnikach
  else {
    esc_1 = 1000;
    esc_2 = 1000;
    esc_3 = 1000;
    esc_4 = 1000;
  }

  // podanie wartosci throttle z receivera na esc 1, 2, 3, 4
  TIMER4_BASE->CCR1 = esc_1;
  TIMER4_BASE->CCR2 = esc_2;
  TIMER4_BASE->CCR3 = esc_3;
  TIMER4_BASE->CCR4 = esc_4;
  //resetujemy timer 4
  TIMER4_BASE->CNT = 5000;

  // obieg petli musi wynosic dokladnie 4000us jak nie to wystawiamy sygnal bledu
  if (micros() - loop_timer > 4050)
    error = 5;
  while (micros() - loop_timer < 4000);
  loop_timer = micros();
}
```

INICJALIZACJA I2C

```
#include <Wire.h>
TwoWire Wire2(2, I2C_FAST_MODE); // inicjalizacja I2C2 (piny B10 - SCL, B11 - SDA (domyślnie wire obsługuje I2C1)
```

Kod inicjalizuje magistralę I2C2, która będzie używana do komunikacji z czujnikami drona.

USTAWIENIA PID

```
// ustawienia pid dla roll
float pid_p_gain_roll = 1.3;
float pid_i_gain_roll = 0.04;
float pid_d_gain_roll = 18.0;
int pid_max_roll = 400;

// ustawienia pid dla pitch
float pid_p_gain_pitch = pid_p_gain_roll;
float pid_i_gain_pitch = pid_i_gain_roll;
float pid_d_gain_pitch = pid_d_gain_roll;
int pid_max_pitch = pid_max_roll;
```

```
// ustawienia pid dla yaw
float pid_p_gain_yaw = 4.0;
float pid_i_gain_yaw = 0.02;
float pid_d_gain_yaw = 0.0;
int pid_max_yaw = 400;
```

Te ustawienia określają wzmocnienia (proporcjonalne, całkowe i różniczkowe) dla regulatorów PID używanych do kontrolowania osi roll, pitch i yaw drona.

ZMIENNE GLOBALNE

```
boolean auto_level = true;
float pid_error_temp;
float pid_i_mem_roll, pid_roll_setpoint, gyro_roll_input, pid_output_roll, pid_last_roll_d_error;
float pid_i_mem_pitch, pid_pitch_setpoint, gyro_pitch_input, pid_output_pitch, pid_last_pitch_d_error;
float pid_i_mem_yaw, pid_yaw_setpoint, gyro_yaw_input, pid_output_yaw, pid_last_yaw_d_error;
float roll_level_adjust, pitch_level_adjust;
```

Zmienne te są używane w funkcji regulatora PID oraz do przechowywania danych z czujników.

KALIBRACJA RĘCZNA

```
uint8_t use_manual_calibration = true;
int16_t manual_acc_pitch_cal_value = -218;
int16_t manual_acc_roll_cal_value = -41;
int16_t manual_gyro_pitch_cal_value = -197;
int16_t manual_gyro_roll_cal_value = -403;
int16_t manual_gyro_yaw_cal_value = -89;
```

Jeżeli `use_manual_calibration` jest ustawione na `true`, to wartości manual będą używane do kalibracji czujników.

ADRES I ZMIENNE DLA ŻYROSKOPU I AKCELEROMETRU

```
uint8_t gyro_address = 0x68;
int16_t temperature, count_var;
int16_t acc_x, acc_y, acc_z;
int16_t gyro_pitch, gyro_roll, gyro_yaw;
int32_t acc_total_vector;
int32_t gyro_roll_cal, gyro_pitch_cal, gyro_yaw_cal;
float angle_roll_acc, angle_pitch_acc, angle_pitch, angle_roll;
```

Te zmienne przechowują adres urządzenia I2C oraz dane odczytane z żyroskopu i akcelerometru.

ZMIENNE POMOCNICZE DO SYGNALIZACJI STANÓW DRONA

```
uint8_t last_channel_1, last_channel_2, last_channel_3, last_channel_4;
uint8_t highByte, lowByte, flip32, start;
uint8_t error, error_counter, error_led;
float battery_voltage;
```

Zmienne te są używane do przechowywania stanów sygnalizacji błędów oraz napięcia baterii.

PWM DO ESC I ZMIENNE DO MOTORS

```
int16_t esc_1, esc_2, esc_3, esc_4;
int16_t throttle, cal_int;
```

Zmienne te są używane do kontrolowania silników drona.

ZMIENNE DO ODBIORNIKA

```
int32_t channel_1_start, channel_1;
int32_t channel_2_start, channel_2;
```

```
int32_t channel_3_start, channel_3;
int32_t channel_4_start, channel_4;
int32_t channel_5_start, channel_5;
int32_t channel_6_start, channel_6;
```

Zmienne te są używane do przechowywania danych z kanałów odbiornika.

KONTROLA CZASU OBIEGU KAŻDEJ ITERACJI

```
uint32_t loop_timer, error_timer;
```

Zmienne te przechowują czas iteracji głównej pętli programu.

FUNKCJE SYGNALIZACJI STANU DIODAMI LED

```
void red_led(int8_t level) {
  digitalWrite(PB4, level);
}

void green_led(int8_t level) {
  digitalWrite(PB3, level);
}
```

Funkcje te kontrolują diody LED sygnalizujące stan drona.

FUNKCJA DO OBSŁUGI TIMERÓW (W TYM PRZERWAŃ)

```
void timer_setup(void) {
  // przerwania do handlera 1, 2, 3, 4
  Timer2.attachCompare1Interrupt(handler_channel_1);
  Timer2.attachCompare2Interrupt(handler_channel_2);
  Timer2.attachCompare3Interrupt(handler_channel_3);
  Timer2.attachCompare4Interrupt(handler_channel_4);
  TIMER2_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN;
  TIMER2_BASE->CR2 = 0;
  TIMER2_BASE->SMCR = 0;
  TIMER2_BASE->DIER = TIMER_DIER_CC1IE | TIMER_DIER_CC2IE | TIMER_DIER_CC3IE | TIMER_DIER_CC4IE;
  TIMER2_BASE->EGR = 0;
  TIMER2_BASE->CCMR1 = 0b100000001;
  TIMER2_BASE->CCMR2 = 0b100000001;
  TIMER2_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E | TIMER_CCER_CC3E | TIMER_CCER_CC4E;
  TIMER2_BASE->PSC = 71;
  TIMER2_BASE->ARR = 0xFFFF;
  TIMER2_BASE->DCR = 0;
  // przerwania do handlera 5, 6
  Timer3.attachCompare1Interrupt(handler_channel_5);
  Timer3.attachCompare2Interrupt(handler_channel_6);
  TIMER3_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN;
  TIMER3_BASE->CR2 = 0;
  TIMER3_BASE->SMCR = 0;
  TIMER3_BASE->DIER = TIMER_DIER_CC1IE | TIMER_DIER_CC2IE;
  TIMER3_BASE->EGR = 0;
  TIMER3_BASE->CCMR1 = 0b100000001;
  TIMER3_BASE->CCMR2 = 0;
```

```
 TIMER3_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E;
 TIMER3_BASE->PSC = 71;
 TIMER3_BASE->ARR = 0xFFFF;
 TIMER3_BASE->DCR = 0;
 //wlaczenie timera 4 i dla niego przerwan
 TIMER4_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN | TIMER_CR1_ARPE;
 TIMER4_BASE->CR2 = 0;
 TIMER4_BASE->SMCR = 0;
 TIMER4_BASE->DIER = 0;
 TIMER4_BASE->EGR = 0;
 TIMER4_BASE->CCMR1 = (0b110 << 4) | TIMER_CCMR1_OC1PE |(0b110 << 12) | TIMER_CCMR1_OC2PE;
 TIMER4_BASE->CCMR2 = (0b110 << 4) | TIMER_CCMR2_OC3PE |(0b110 << 12) | TIMER_CCMR2_OC4PE;
 TIMER4_BASE->CCER = TIMER_CCER_CC1E | TIMER_CCER_CC2E | TIMER_CCER_CC3E | TIMER_CCER_CC4E;
 TIMER4_BASE->PSC = 71;
 TIMER4_BASE->ARR = 5000;
 TIMER4_BASE->DCR = 0;
 TIMER4_BASE->CCR1 = 1000;
 TIMER4_BASE->CCR1 = 1000;
 TIMER4_BASE->CCR2 = 1000;
 TIMER4_BASE->CCR3 = 1000;
 TIMER4_BASE->CCR4 = 1000;
 pinMode(PB6, PWM);
 pinMode(PB7, PWM);
 pinMode(PB8, PWM);
 pinMode(PB9, PWM);

}
```

- Timer2.attachCompare1Interrupt(handler_channel_1);
- Timer2.attachCompare2Interrupt(handler_channel_2);
- Timer2.attachCompare3Interrupt(handler_channel_3);
- Timer2.attachCompare4Interrupt(handler_channel_4);

Te linie kodu ustawiają przerwania porównawcze dla Timer 2, przypisując im odpowiednie funkcje obsługi dla kanałów 1-4. (timer wywołuje przerwania dla poszczególnych kanałów)

- TIMER2_BASE->CR1 = TIMER_CR1_CEN; - Włącza Timer 2.
- TIMER2_BASE->DIER … = … - Umożliwia przerwania dla kanałów 1-4.
- TIMER2_BASE->CCMR1 i TIMER2_BASE->CCMR2 - Ustawia tryb porównawczy dla kanałów 1-4.
- TIMER2_BASE->CCER … - Włącza wyjścia dla kanałów 1-4.
- TIMER2_BASE->PSC = 71; - Ustawia preskaler na 71.
- TIMER2_BASE->ARR = 0xFFFF; - Ustawia wartość auto-reload na maksymalną.

Te linie kodu ustawiają przerwania porównawcze dla Timer 3, przypisując im odpowiednie funkcje obsługi dla kanałów 5-6.

- Timer3.attachCompare1Interrupt(handler_channel_5);
- Timer3.attachCompare2Interrupt(handler_channel_6);

Timer 4 jest konfigurowany do generowania sygnałów PWM na wyjściach odpowiednich do kontrolowania silników drona.

- TIMER4_BASE->CCR1, TIMER4_BASE->CCR2, TIMER4_BASE->CCR3, TIMER4_BASE->CCR4

FUNKCJA REGULATORA PID

```
void calculate_pid(void) {
  // obliczenia dla osi roll
  pid_error_temp = gyro_roll_input - pid_roll_setpoint;
  pid_i_mem_roll += pid_i_gain_roll * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_roll > pid_max_roll)
    pid_i_mem_roll = pid_max_roll;
  else if(pid_i_mem_roll < pid_max_roll * -1)
    pid_i_mem_roll = pid_max_roll * -1;

  pid_output_roll = pid_p_gain_roll * pid_error_temp + pid_i_mem_roll + pid_d_gain_roll * (pid_error_temp - pid_last_roll_d_error);
  if(pid_output_roll > pid_max_roll)
    pid_output_roll = pid_max_roll;
  else if(pid_output_roll < pid_max_roll * -1)
    pid_output_roll = pid_max_roll * -1;
  pid_last_roll_d_error = pid_error_temp;

  // obliczenia dla osi pitch
  pid_error_temp = gyro_pitch_input - pid_pitch_setpoint;
  pid_i_mem_pitch += pid_i_gain_pitch * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_pitch > pid_max_pitch)
    pid_i_mem_pitch = pid_max_pitch;
  else if(pid_i_mem_pitch < pid_max_pitch * -1)
    pid_i_mem_pitch = pid_max_pitch * -1;

  pid_output_pitch = pid_p_gain_pitch * pid_error_temp + pid_i_mem_pitch + pid_d_gain_pitch * (pid_error_temp -
pid_last_pitch_d_error);
  if(pid_output_pitch > pid_max_pitch)
    pid_output_pitch = pid_max_pitch;
  else if(pid_output_pitch < pid_max_pitch * -1)
    pid_output_pitch = pid_max_pitch * -1;
  pid_last_pitch_d_error = pid_error_temp;

  // obliczenia dla osi yaw
  pid_error_temp = gyro_yaw_input - pid_yaw_setpoint;
  pid_i_mem_yaw += pid_i_gain_yaw * pid_error_temp;
  if(pid_i_mem_yaw > pid_max_yaw)
    pid_i_mem_yaw = pid_max_yaw;
  else if(pid_i_mem_yaw < pid_max_yaw * -1)
    pid_i_mem_yaw = pid_max_yaw * -1;

  pid_output_yaw = pid_p_gain_yaw * pid_error_temp + pid_i_mem_yaw + pid_d_gain_yaw * (pid_error_temp - pid_last_yaw_d_error);
  if(pid_output_yaw > pid_max_yaw)
    pid_output_yaw = pid_max_yaw;
  else if(pid_output_yaw < pid_max_yaw * -1)
    pid_output_yaw = pid_max_yaw * -1;
  pid_last_yaw_d_error = pid_error_temp;
}
```

Funkcja calculate_pid jest odpowiedzialna za obliczanie wyjść regulatorów PID dla osi roll, pitch i yaw.

FUNKCJA KALIBRACJI ŻYROSKOPU

```
void calibrate_gyro(void) {
  if (use_manual_calibration)
    cal_int = 2000;
  else {
    cal_int = 0;
    manual_gyro_pitch_cal_value = 0;
    manual_gyro_roll_cal_value = 0;
```

```
   manual_gyro_yaw_cal_value = 0;
  }

  if (cal_int != 2000) {
   for (cal_int = 0; cal_int < 2000 ; cal_int ++) {
    if (cal_int % 25 == 0)
     digitalWrite(PB4, !digitalRead(PB4));
    gyro_signals();
    gyro_roll_cal += gyro_roll;
    gyro_pitch_cal += gyro_pitch;
    gyro_yaw_cal += gyro_yaw;
    delay(4);
   }
   red_led(HIGH);
   gyro_roll_cal /= 2000;
   gyro_pitch_cal /= 2000;
   gyro_yaw_cal /= 2000;
  }
  else {
   gyro_pitch_cal = manual_gyro_pitch_cal_value;
   gyro_roll_cal = manual_gyro_roll_cal_value;
   gyro_yaw_cal = manual_gyro_yaw_cal_value;
  }
}
```

Funkcja calibrate_gyro kalibruje żyroskop, używając wartości manualnych lub automatycznych obliczeń.

FUNKCJA PĘTLI GŁÓWNEJ

```
void loop() {
  loop_timer = micros();

  // odczytywanie sygnałów z żyroskopu i akcelerometru
  gyro_signals();

  // obliczanie PID
  calculate_pid();

  // kontrola silników na podstawie wyjść PID
  motor_control();

  while (micros() - loop_timer < 4000);
}
```

Pętla loop() jest główną pętlą programu, odpowiedzialną za odczytywanie danych z czujników, odpowiednie ich przekształcanie, obliczanie wartości PID na podstawie zadanych setpointów i aktualnych danych z czujników oraz kontrolę silników. Przy czym cały program pracuje z częstotliwością >= 250 Hz.

OMÓWIENIE OTRZYMANYCH WYNIKÓW I PORÓWNANIE

Osiągnięcie stabilnego lotu drona, sterowanego za pomocą odbiornika i nadajnika, jest istotnym krokiem w rozwoju autonomicznych systemów lotniczych. Po wielu próbach udało się stworzyć system, który skutecznie stabilizuje się w powietrzu. Wdrożenie kontrolera PID oraz filtru komplementarnego w kodzie zapewniło precyzyjne i płynne sterowanie dronem, co jest kluczowe dla jego stabilności i bezpieczeństwa lotu. Takie rozwiązania mają szerokie zastosowanie, od dronów rekreacyjnych po profesjonalne systemy do zadań specjalistycznych, takich jak inspekcje infrastruktury, dostawy, czy misje ratunkowe.

W literaturze istnieje wiele metod sterowania dronami, od prostych systemów stabilizacji po zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego. W porównaniu z bardziej skomplikowanymi podejściami, zastosowanie kontrolera PID i filtru komplementarnego jest stosunkowo proste, ale bardzo efektywne. Daje to ponadto wiele możliwości rozwoju tego systemu w przyszłości.

Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) jest szeroko stosowany w systemach sterowania ze względu na swoją prostotę i skuteczność. W moim projekcie kontroler PID został zaimplementowany w celu utrzymania stabilności lotu poprzez korektę błędów w położeniu drona. Filtr komplementarny natomiast łączy dane z akcelerometru i żyroskopu, co pozwala na uzyskanie bardziej stabilnych i dokładnych pomiarów kątów nachylenia.

W porównaniu z bardziej zaawansowanymi metodami, takimi jak filtry Kalmana czy algorytmy oparte na sieciach neuronowych, moje podejście oferuje dobrą równowagę między złożonością implementacji a efektywnością działania. Choć bardziej zaawansowane metody mogą zapewnić lepszą precyzję i stabilność, są one również bardziej złożone i wymagają większych zasobów obliczeniowych, co może być niepraktyczne dla prostszych systemów.

Pomimo sukcesu w stabilizacji drona, istnieją pewne ograniczenia w moim rozwiązaniu: ograniczona precyzja PID - kontroler PID, choć skuteczny, może nie być wystarczający w bardziej dynamicznych i wymagających środowiskach. Reakcja na szybkie zmiany warunków lotu może być ograniczona przez prostą naturę algorytmu PID.

Wrażliwość na zakłócenia: Zastosowany filtr komplementarny, chociaż skuteczny w warunkach normalnych, może być wrażliwy na zakłócenia i szumy w danych z czujników.

Brak zaawansowanych funkcji autonomicznych: System sterowania w moim projekcie opiera się na manualnym sterowaniu za pomocą nadajnika i odbiornika, co ogranicza autonomiczne możliwości drona. Częściowa autonomiczność sprowadza się natomiast do samodzielnej regulacji poziomu równowagi przez drona.

Aby poprawić wyniki i rozszerzyć funkcjonalność drona, można podjąć kilka działań:

Implementacja filtru Kalmana: Zastąpienie filtru komplementarnego bardziej zaawansowanym filtrem Kalmana może poprawić dokładność i stabilność pomiarów, szczególnie w obecności zakłóceń. Zaawansowane algorytmy sterowania: Wprowadzenie algorytmów adaptacyjnych lub sterowania predykcyjnego może poprawić reakcję drona na dynamiczne zmiany warunków lotu. Autonomiczne funkcje: Dodanie funkcji autonomicznych, takich jak automatyczne unikanie przeszkód, planowanie trasy czy autonomiczne lądowanie, może znacząco zwiększyć użyteczność drona. W planach jest dodanie ów funkcji autonomicznego odlotu i przylotu za pomocą czujnika barometrycznego. Można także dodatkowo dołożyć integrację z systemami wizyjnymi, tu mam na myśli, że wykorzystanie kamer i algorytmów przetwarzania obrazu może pozwolić na bardziej zaawansowane funkcje nawigacyjne i autonomiczne. Dodatkowo można także zastanowić się nad lepszymi sposobami optymalizacji energetycznej można np. wprowadzić tkz. tryb uśpienia, celem ograniczenia zużycia energii po zadanym czasie nieaktywności.

Opracowany system sterowania dronem, oparty na kontrolerze PID i filtrze komplementarnym, osiągnął zamierzony cel stabilizacji lotu. Porównanie z innymi rozwiązaniami wykazało, że choć istnieją bardziej zaawansowane metody, moje podejście jest efektywne i stosunkowo proste do implementacji. Ograniczenia projektu wskazują na możliwość dalszego rozwoju, szczególnie w zakresie precyzji, odporności na zakłócenia oraz autonomicznych funkcji. Przyszłe badania mogą skupić się na implementacji bardziej zaawansowanych algorytmów i funkcji, co pozwoli na dalszą poprawę wydajności i użyteczności drona.

PODSUMOWANIE

Jeżeli masz jakiekolwiek zastrzeżenia co do projektu, to jest myślisz, że coś można poprawić, proszę daj nam znać (skontaktuj się z: Krzysztofem (Krzychu)). Jak na razie dron działa według zamierzeń (na AVR nie działał według zamierzeń, w komputerze na wartościach wszystko było idealnie, jednak, gdy odpalamy drona w realu wszystko się chrzani i PID nie działa poprawnie, dron wówczas wznosił się, ale nie potrafił w prawidłowy sposób regulować się, mimo że podczas symulacji wszystko jest ok, było to spowodowane dużymi ograniczeniami sprzętowymi avr. Łącznie na przestrzeni roku czasu, przeprowadzono ogromną ilość prób (w większości zakończonych porażkami), co ostatecznie doprowadziło po 11 rewizji kodu FC pod AVR do zastąpienia AVR na rzecz STM32F103C8T6. Tutaj już po 3 rewizji kodu udało się ostatecznie osiągnąć sukces, gdzie dron potrafił w poprawny sposób się autolevelować oraz poprawnie reagował na zadane wartości sygnałów z transmitera. Obecnie projekt jest w fazie zakończenia.

BIBLIOGRAFIA

2. Beard, Randal W., McLain, Timothy W. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. Wiley, 2012.
3. Ogata, Katsuhiko. Modern PID Control. Prentice Hall, 2010.
4. Vilanova, Ramon, Visioli, Antonio. PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches. Springer, 2011.
5. Szczepański, Janusz. Systemy sterowania dronami. PWN, 2018.
6. Kowalski, Piotr. Podstawy sterowania dronami: teoria i praktyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
7. Lewis, Frank L. Remote Control Systems: Principles and Applications. Springer, 2009.
8. Grainger, John D. Radio Control for Dummies: A Comprehensive Guide. Wiley, 2016.
9. Wiśniewski, Marek. Technologie zdalnego sterowania dronami. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
10. Nowak, Adam. Zdalne sterowanie w robotyce i dronach. PWN, 2020.
11. A Survey of Quadrotor Drones Control Methods and Related Challenges. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017.
12. Enhanced PID Control for Quadrotor UAV. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019.
13. Stabilizacja lotu dronów za pomocą algorytmu PID. Pomiary Automatyka Kontrola, 2018.
14. Systemy sterowania dronami: badania i rozwój. Przegląd Elektrotechniczny, 2020.