



UNIVERZITET “DŽEMAL BIJEDIĆ”  
FAKULTET INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

ZAVRŠNI RAD

# Samobalansirajući robot

elektronički bazirani projekat za održavanje robota na dva točka uspravnim

**Profesor:**  
Doc.dr. Elmir Babović

**Student:**  
Adi Šoš, IB160034

Akadska godina: 2018/2019

Mostar, 2019. godina

# IZJAVA O AUTORSTVU

Ja, **ADI (AMIR) ŠOŠE**, student Fakulteta informacijskih tehnologija, Univerziteta "Džemal Bijedić" u Mostaru, pod punom moralnom, materijalnom i krivičnom odgovornošću,

**Izjavljujem**

da je rad pod naslovom

**SAMOBALANSIRAJUĆI ROBOT**

u potpunosti rezultat sopstvenog istraživanja, gdje su korišteni sadržaji (tekst, ilustracije, tabele itd.) drugih autora jasno označeni pozivanjem na izvor i ne narušavaju bilo čija vlasnička ili autorska prava.

U Mostaru, 17.09.2019.

---

ADI ŠOŠE, IB160034

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Sazetak</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Arduino</b>	<b>3</b>
3.1	Proces kompajliranja	3
3.2	Pisanje koda	4
3.3	Razvojno okruženje	4
3.3.1	Arduino IDE	4
3.3.2	PlatformIO	6
3.4	Tipovi varijabli	7
3.5	Konstante	8
3.6	Funkcije	8
3.7	Pinovi	9
3.8	MEGA	10
<b>4</b>	<b>HC05</b>	<b>12</b>
4.1	Tehnologije	12
4.1.1	Piconet	12
4.1.2	Scatternet	13
4.1.3	Adaptive Frequency Hopping	13
4.1.4	Phase Shift Keying	13
4.1.5	Enhanced Data Rate	14
4.1.6	BlueCore4-Ext	14
4.2	Specifikacije	14
4.3	Pinovi	15
4.4	AT komande	16
<b>5</b>	<b>Koračni motori</b>	<b>18</b>
5.1	Elektromagneti	18
5.2	Proces rotacije ose	18
5.3	Tipovi	19
5.4	Načini upravljanja	20
<b>6</b>	<b>A4988</b>	<b>22</b>
6.1	Digitalno-analogni konverter	22
6.2	H-most	23
6.3	Miješano propadanje	24
6.4	Pinovi	24
6.5	Specifikacije	25
<b>7</b>	<b>MPU6050</b>	<b>26</b>
7.1	Žiroskop	26
7.2	Akcelerometar	26
7.3	Digital Motion Processing	27
7.3.1	Eulerovi uglovi	27

7.3.2	Kvaternioni . . . . .	28
7.4	I <sup>2</sup> C . . . . .	29
7.4.1	Paketi . . . . .	30
7.5	Specifikacije . . . . .	31
7.5.1	Pinovi . . . . .	31
7.6	I2Cdevlib . . . . .	32
<b>8</b>	<b>PID kontroler . . . . .</b>	<b>33</b>
8.1	Proporcionalni dio . . . . .	33
8.2	Integralni dio . . . . .	34
8.3	Derivativni dio . . . . .	34
8.4	PID . . . . .	35
8.5	Podešavanje parametara . . . . .	36
8.6	Modifikacije . . . . .	37
8.6.1	Integralni zamah . . . . .	37
8.7	Deadband . . . . .	37
<b>9</b>	<b>Android aplikacija . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>Robot . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>11</b>	<b>Zaključak . . . . .</b>	<b>40</b>

# 1 Sazetak

## 2 Uvod

## 3 Arduino

Arduino je elektronički bazirana platforma otvorenog koda<sup>1</sup>. Radi se o ploči koja na sebi najčešće ima Atmel-ov 8-bitni AVR mikrokontroler. Iako postoji više vrsta Arduino ploča (Uno, Nano, Mega, Leonardo itd.), koncept programiranja njihovog ponašanja je isti. Ono što međutim čini razlike među ovim verzijama, je količina radne memorije, kao i broj ulazno/izlaznih pinova. Ono što čini ovu platformu veoma popularnom jeste njena pristupačnost, kako cijenom, tako i stepenom potrebnog predznanja iz polja elektronike i integralnih kola.

Arduino, kao platforma, nije namijenjen za rješenja u produkciji i masovnu proizvodnju, već za izradu prototipa uređaja ili projekte koji spadaju u kategoriju hobija. Osobina, koja za to ima najveći značaj, je opća namjenjenost Arduina što ga u proizvodnji čini skupljim od ploča koje su napravljene da služe samo jednoj svrsi.

Pošto sam kroz razvoj ovog projekta koristio Arduino Mega, sve buduće reference će se odnositi na Mega model.

### 3.1 Proces kompajliranja

Programski jezik u kojem se pišu Arduino datoteke koje sadrže izvorni kod je C++. Međutim većina standardnih biblioteka su preuzete iz C programskog jezika, zbog male količine radne memorije kontrolera. Arduino datoteke je lako moguće prepoznati po njihovoj “.ino” ekstenziji. Ove datoteke se još nazivaju i skicama.

Nakon što se pokrene proces kompajliranja projekta, Arduino okruženje pravi male promjene u kodu, kako bi se nakon toga mogao proslijediti gcc i g++ kompajleru. U ovoj fazi se sve datoteke u direktoriju kombinuju u jedan i na njen početak se dodaje `#Include<Arduino.h>` zaglavlje. Zatim slijedi povezivanje koda sa standardnim Arduino bibliotekama, a nakon toga i sa ostalim bibliotekama uključenim u direktoriji skice. Kako bi bila uključena u proces prevođenja, biblioteka (njen .cpp i .h dokument) se mora nalaziti na `libraries\{NazivBiblioteke}` putanji.

Kada je skica povezana i prevedena, vrijeme je da takva bude prebačena u Arduino memoriju gdje će se izvršavati.

---

<sup>1</sup><https://github.com/arduino>

## 3.2 Pisanje koda

Kao što je spomenuto u sekciji 3.1, Programski jezik koji koristimo pri programiranju Arduino kontrolera je C++. Najjednostavnija “.ino” datoteka se sastoji iz dvije funkcije:

1. Setup
2. Loop

Funkcija “Setup” se izvršava samo jednom pri pokretanju kontrolera i služi za inicijalizaciju komponenti i objekata. Druga funkcija, pod nazivom “Loop” je sama srž načina rada ovih ploča. Kod koji se nalazi unutar ove funkcije će se ciklično izvršavati sve dok je Arduino upaljen. Taj kod je sekvenca koja predstavlja i ponašanje isprogramirane ploče u upotrebi.

## 3.3 Razvojno okruženje

### 3.3.1 Arduino IDE

Arduino posjeduje svoje oficijelno okruženje pod nazivom “Arduino IDE”. Ono dolazi u dvije verzije, online<sup>2</sup>, i verzija koju instaliramo na lokalni računar. U ovom tekstu ću se fokusirati na offline okruženje, jer se uz njegovu instalaciju automatski instaliraju i Windows driveri potrebni za prebacivanje koda na Arduino..

Pri kreiranju prve skice ispred korisnika se nalazi “prazna” datoteka.

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
}  
  
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
}
```

## Alati

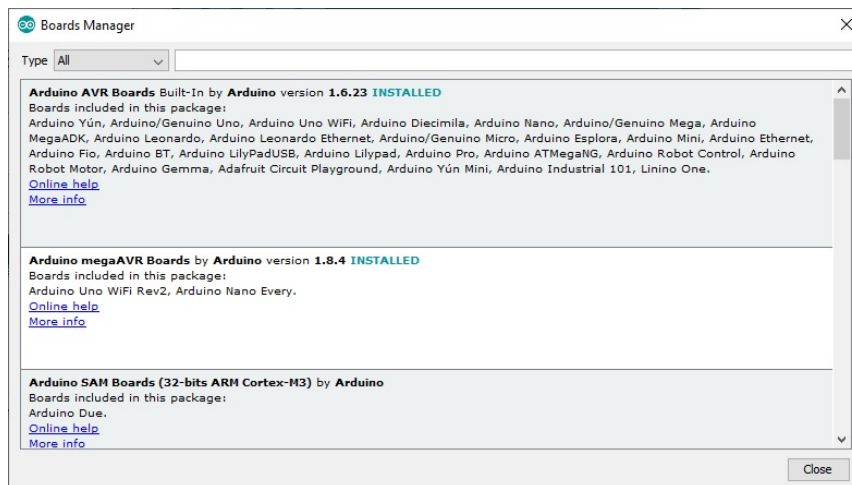
**Boards manager** je opcija koja se nalazi u alatnoj traci pod stavkom “Tools”. Koristeći ovaj alat, biramo trenutnu arhitekturu ili model ploče na koju ćemo postaviti kod. S obzirom da je program otvorenog koda, kroz ovaj proces se mogu instalirati i

---

<sup>2</sup><https://create.arduino.cc/editor>

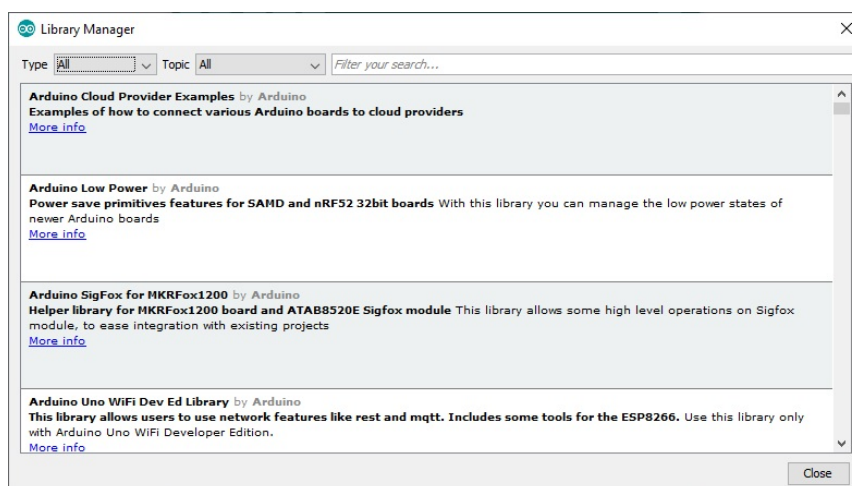


datoteke koje nisu ugrađene u IDE, s tim da je u tim slučajevima potrebno obratiti pažnju na sigurnost. Na ovaj način moguće je koristiti ovo razvojno okruženje u svrhu pisanja koda i za druge platforme, ili klonove Arduino ploča. Iz prozora je moguće preuzeti i instalirati nove ploče, kao i nadograditi već postojeće



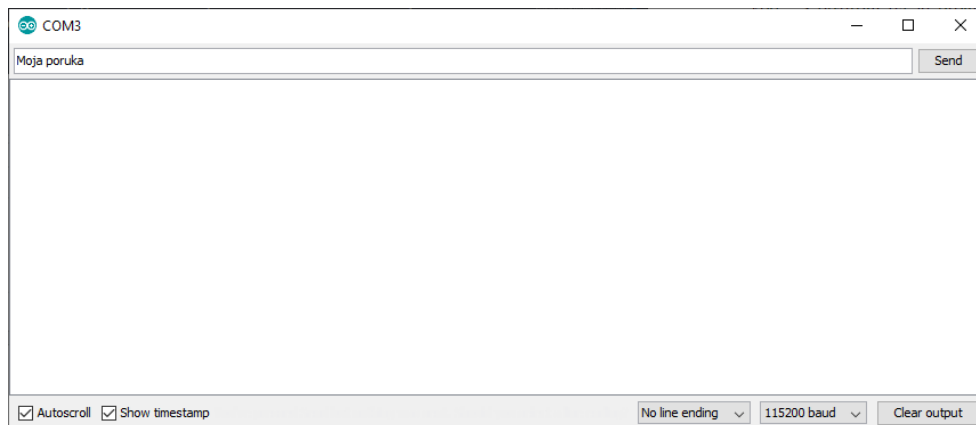
Slika 1: Boards manager prozor

**Library manager** , ovaj alat se također nalazi pod stavkom “Tools”. Arduino IDE već dolazi sa predefinisanim repozitorijem biblioteka koje se nude za preuzimanje i instaliranje. Ukoliko korisnik želi preuzeti biblioteke iz drugih izvora to je moguće uraditi na dva načina: Instalacijom direktno iz “.zip” datoteke ili dodavanjem putanje repozitorija u postavkama okruženja. Brisanje se mora raditi ručno na putanji %HOMEPATH%\Documents\Arduino\lib



Slika 2: Library manager prozor

**Serial monitor** je jedan od načina da se uspostavi komunikacija sa Arduino uređajem dok je isti pokrenut. Kada se ovaj alat pokrene, korisnik može pomoću serijske komunikacije razmjenjivati tekstualne poruke sa Arduinoom. Pored na dnu prozora se nalazi padajući izbornik, čija trenutno odabrana stavka definiše brzinu komunikacije u bitovima po sekundi.



Slika 3: Serial monitor prozor

### 3.3.2 PlatformIO

Pored Arduino IDE, programerima na izboru stoji još razvojnih okruženja u kojima mogu razvijati svoje Arduino kodove. Jedno od tih okruženja je PlatformIO.

PlatformIO se instalira u vidu nadogradnje za Visual Studio Code, koji i sam spada u kategoriju programa otvorenog koda. Kao i Arduino IDE, nudi izbor ploče koja će se programirati, među kojima je oko 700 ponuđenih<sup>3</sup>, pored samog Arduina. S obzirom da je sada razvojno okruženje Visual Studio Code, to dolazi sa svim njegovim prednostima (Markiranje sintakse, Intellisense, Personalnim postavkama okruženja itd.).

Razlog, pored već navedenih, zbog kojeg sam ja izabrao PlatformIO je njegova arhitektura projekta. Naime, u ovoj platformi se koristi standardna arhitektura cpp-a, što je nekome ko dolazi iz tog svijeta, daleko lakše za održavati. Još jedna minorna razlika između ova dva okruženja je to da glavna datoteka sa izvornim kodom u PlatformIO nije .ino, već “main.cpp” u kojoj je obavezno uključiti `Arduino.h` biblioteku.

---

<sup>3</sup><https://platformio.org/>

### 3.4 Tipovi varijabli

Pošto ploča ima ograničenu radnu memoriju. Izbor tipova podataka je veoma bitan, zbog njihovog predefinisano memorijskog prostora koji zauzimaju. Neki od najčešće korištenih tipova su:

- `bool` (8 bita) - može sadržati jednu od dvije vrijednosti (da ili ne)
- `byte` (8 bita) - cijeli broj od 0 do 255, bez predznaka
- `char` (8 bita) - cijeli broj između -127 i 127 kojeg će kompajler pokušati prevesti u karakter
- `word` (16 bita) - cijeli broj bez predznaka između 0 i 65 535
- `int` (16 bita) - cijeli broj između -32 768 i 32 767
- `long` (32 bita) - cijeli broj između 2 147 483 648 i 2 147 483 647
- `unsigned long` (32 bita) - cijeli broj između 0 4 294 967 295, bez predznaka.
- `float` (32 bita) - broj sa plutajućom tačkom između -3.4028235E38 i 3.4028235E38

**Niz** je indeksirana kolekcija varijabli bilo kojeg tipa.

**String** se Pored već navedenih tipova, u praksi se veoma često koristi, kao tip podatka. Ovaj tip podatka nema fiksnu veličinu koju zauzima u memoriji i sastoji se od niza karaktera. Ono što ga čini korisnim su funkcije koje su ponuđene za rad sa stringovima kao što su:

- `CharAt(n)` - vraća karakter na poziciji `n`
- `IndexOf(c)` - vraća prvu poziciju karaktera `c` u stringu
- `Concat(val)` - dodaje vrijednost iz varijable `val` na kraj stringa
- `Replace(sub1, sub2)` - vrši zamjenu svih instanci `sub1`, instancom `sub2` u stringu
- `Substring(n, k)` - vraća komad stringa između `n` i `k` pozicija
- `Lenght()` - vraća dužinu stringa

**Pokazivači** su tipovi podataka koji upućuju na adresu. Diferenciraju se pomoću znaka `*`, ako je varijabla `x`, onda je `&x` adresa te varijable.

### 3.5 Konstante

`Arduino.h` biblioteka dolazi sa korisnim konstantama.

- `INPUT | OUTPUT` - ova konstanta upravlja električno ponašanje pina, i priprema pin da prihvata ulazne, ili šalje izlazne signale.
- `HIGH | LOW` - odnosi se na pinove i ima može imati različito ponašanje
  1. Kada je pin postavljen kao `INPUT`, onda je ovo povratna vrijednost koju vraća očitavanje tog pina, ukoliko je struja u njemu veća od 3.0V ili 2.0V u zavisnosti od ploče koja se koristi, vratit će se `HIGH`, a ukoliko je manje, `LOW`.
  2. Kada je pin postavljen kao `OUTPUT`, sa `HIGH` će se njen izlaz postavljati na 3.3V ili 5V u zavisnosti od ploče koja se koristi, a sa `LOW` na 1.5V ili 1.0V.
- `e | E` - koriste se zbog lakše čitljivosti koda, predstavljaju eksponencijalni dio izraza  $10^n$  koji se množi sa brojem koji mu prethodi.

### 3.6 Funkcije

Ono što omogućava kontrolisanje ulaza i izlaza Arduino ploče jesu funkcije `Arduino.h` biblioteke.

**`delayMicroseconds(value)`** pravi zastoje vremenske dužine `value` u mikrosekundama.

**`micros()`** vraća `unsigned long` koji predstavlja broj mikrosekundi koje su prošle od paljenja Arduino ploče.

**`pinMode(pin, INPUT | OUTPUT)`** upravlja ponašanjem pina i na osnovu konstante `INPUT` ili `OUTPUT` određuje da li će pin očitavati ili slati struju na svom kraju.

**`digitalRead(pin)`** očitava trenutno stanje pina čije je ponašanje postavljeno na očitavanje i vraća `LOW` ili `HIGH` konstantu u zavisnosti od voltaže koju očitava.

**`digitalWrite(pin, HIGH | LOW)`** postavlja jačinu protoka struje na izlazu pina na visoko ili nisko.

**`analogRead(pin)`** vraća integer vrijednost između 0 i 1023, koji je direktno proporcionalan jačini struje na pinu.

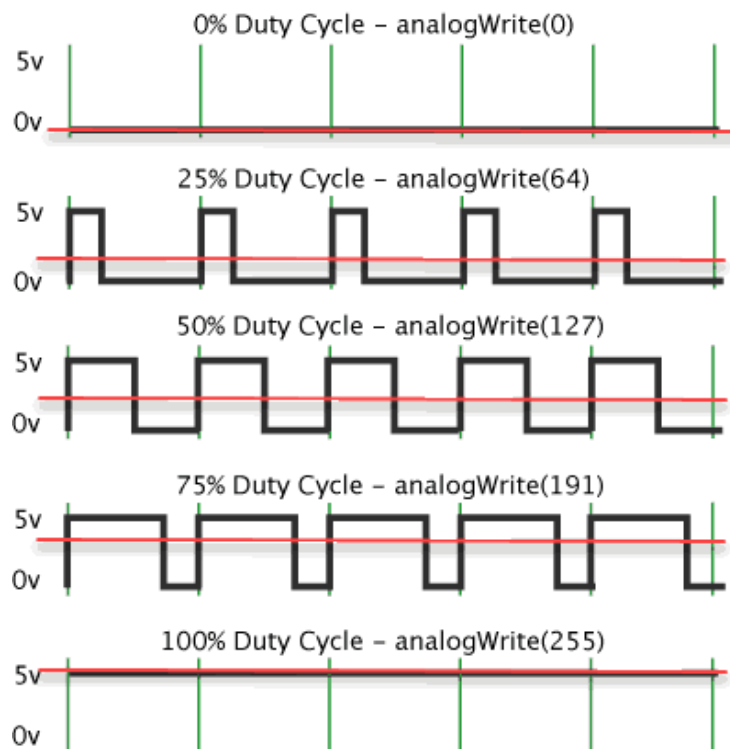
**analogWrite(pin, value)** radi modulaciju širine pulsa u što simulira jačinu struje na izlazu pina, pošto analogni izlaz na Arduinou ne postoji. Value ima raspon između 0 i 255 što je proporcionalno prividnoj jačini struje koju će pin proizvesti.

**Serial.Begin(rate)** inicijalizira serijski protok podataka, gdje je rate brzina prenosa podataka u bitima po sekundi.

**Serial.Read()** vraća prvi bajt serijske komunikacije na ulazu.

**Serial.Write(String)** šalje podatke u binarnom obliku na serijski izlaz.

**attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin), ISR, mode )** Povezuje stanje pina mode (CHANGE, LOW, RISING, FALLING) sa prekidom u izvršenju loop funkcije i poziva ISR (rutina interapcije) koji je funkcija koja ne prima niti vraća parametre.



Slika 4: Primjer modulacije širine pulsa

### 3.7 Pinovi

Svaka verzija na sebi ima različit broj i mogućnosti pinova, ali svaka posjeduje barem po jedan pin svake vrste, sa izuzecima, kako bi se omogućile jednake funkcionalnosti svih ploča.

Dakle tipovi pinova koji postoje su:

- Digitalni - mogu biti ulazni i izlazni, postavljaju se i očitavaju samo 2 stanja, pomoću funkcije `pinMode()` (poglavlje 3.6) se odabire režim u kojem će raditi, a nakon toga se može ili slati struja jačine 1.0V/1.5V ili 3.3V/5V postavljajući `digitalWrite()` (poglavlje 3.6) HIGH ili LOW retrospektivno, ili očitavati jačina struje koristeći `digitalRead()` (poglavlje 3.6)
- PWM - digitalni pinovi koji podržavaju Pulse Width Modulation, tj. modulaciju širine pulsa (Slika 4)
- TX - digitalni pin, koristi se za serijsku transmisiju podataka, `Serial.Write()` (poglavlje 3.6) vrši ispis na ovaj pin.
- RX - digitalni pin, koristi se za serijsko čitanje podataka, `Serial.read()` (poglavlje 3.6) vrši učitavanje sa ovog pina.
- SCL - linija sata koja se koristi u I<sup>2</sup>C komunikaciji !DODATI REF!
- SCL - linija podataka koja se koristi u I<sup>2</sup>C komunikaciji
- INT - digitalni pinovi koji podržavaju prekide, aktiviraju se `attachInterrupt()` (poglavlje 3.6) funkcijom
- Analogni - pinovi koji imaju mogućnost analognog čitanja jačine struje pomoću `analogRead()` (poglavlje 3.6) funkcije
- Power - pinovi vezani za ulaz i izlaz struje u ploči
  - 5V - izlaz sa strujom jačine 5V
  - 3.3V - izlaz sa strujom jačine 3.3V
  - GND - uzemljenje
  - VIN - pin kroz koji se Arduino može napajati strujom od 9V
  - RESET - spajanjem na ground restartuje Arduino

### 3.8 MEGA

Arduino MEGA je jedna od verzija Arduino ploča. Na sebi ima ATMEGA2560 mikrokontroler.

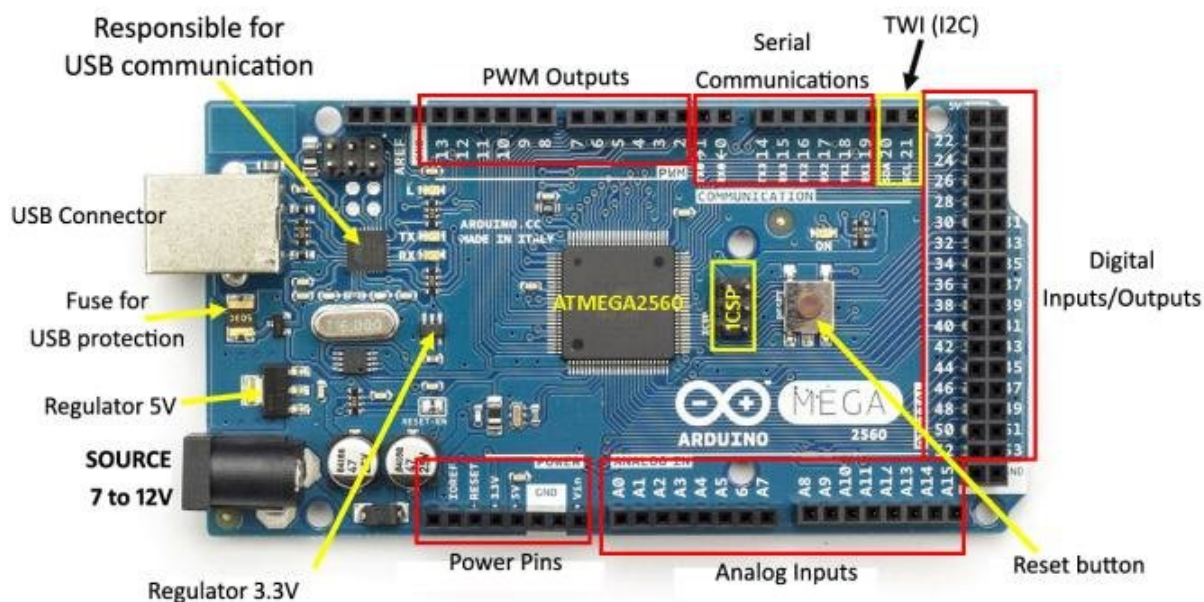
Ploča zahtjeva ulaznu struju od 6V do 20V, s tim da je preporučeno između 7V i 12V. Načini na koje se struja može dovesti u kontroler su kroz USB A interfejs, koji se ujedno

i koristi za povezivanje sa računarom, kroz 2.1mm priključak za napajanje sa pozitivnim centrom, ili direktno kroz VIN pin.

Flash memorija	128 KB
Veličina bootladera	8 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Brzina sata	16 MHz
Jačina struje I/O pinova	40mA
Jačina struje na 3.3V pinu	60mA

Tabela 1: Arduino MEGA specifikacije

Na slici 5 je prikazana Arduino MEGA ploča, te su pinovi označeni njihovim ulogama.



Slika 5: Šema pinova na ATMEGA2560

Dužina	101.6 mm
VŠirina	53.3 mm

Tabela 2: Arduino MEGA dimenzije

## 4 HC05

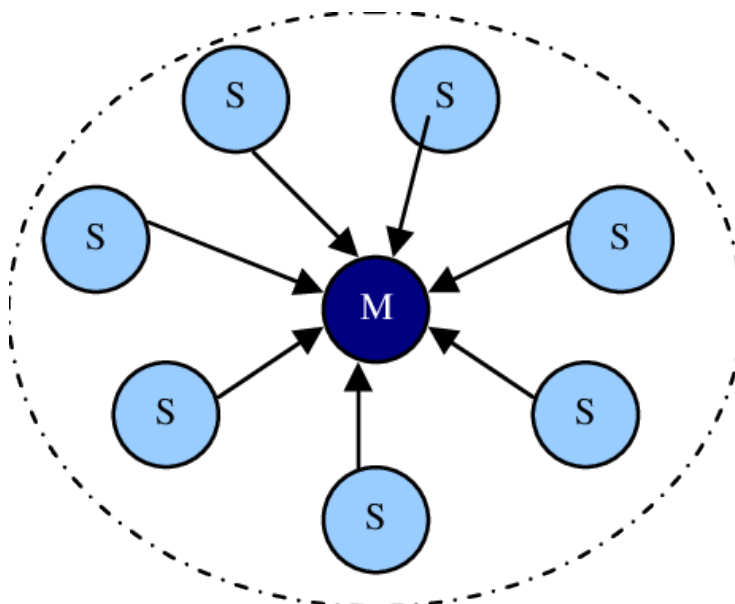
Pošto će se robotom moći upravljati pomoću Android aplikacije koja šalje bluetooth pakete, mora biti osiguran način da ti paketi budu prihvaćeni od strane mikrokontrolera. To je u projektu postignuto koristeći bluetooth modul pod nazivom “HC-05”. Obzirom da je malih dimenzija i zanemarljive težine, HC-05 neće imati značajan utjecaj na sposobnost robota da se balansira.

### 4.1 Tehnologije

Prije nego što pređem na temu samih specifikacija uređaja, posvetit ću nekoliko paragrafa tehnologijama na kojima se rad modula zasniva.

#### 4.1.1 Piconet

Piconet je ad hoc mreža koja povezuje 2 ili više uređaja povezanih pomoću bluetooth protokola, koji imaju usklađen sat kao i sekvencu skoka. To omogućava *master* uređaju da bude povezan na 7 aktivnih, i do 255 neaktivnih *slave* uređaja. Zbog toga što bluetooth sistemi rade na 79 kanala, šansa da dođe do interferencije dva piconeta je oko 1.5%.

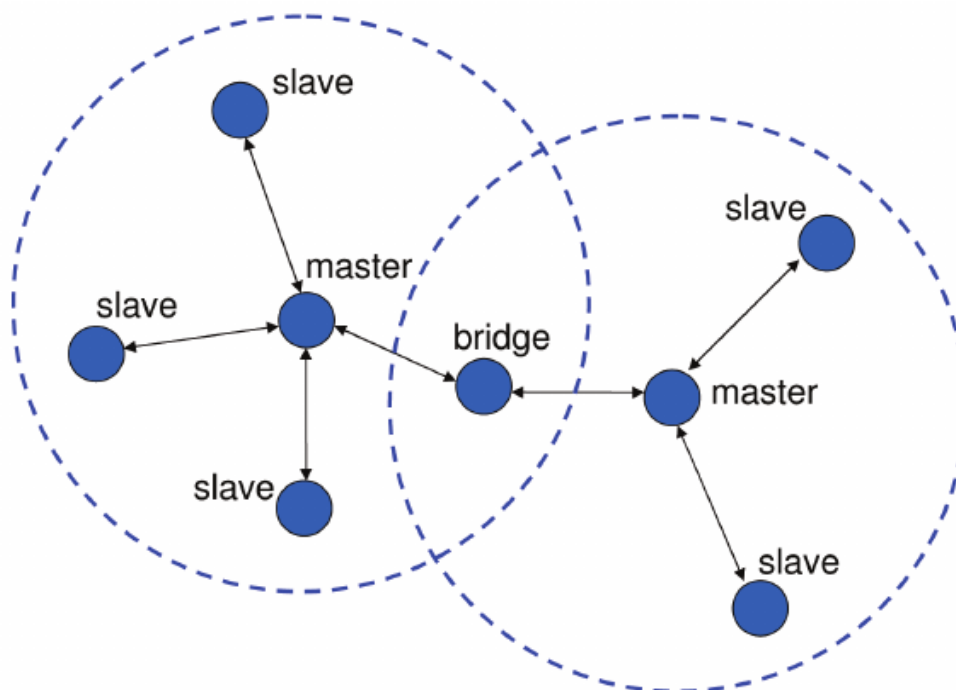


Slika 6: Piconet



### 4.1.2 Scatternet

Scatternet je mreža koja se sastoji od 2 ili više piconeta. Kako bi ovo bilo moguće, jedan slave uređaj mora biti povezan na 2 master uređaja, ili se master uređaj iz jedne mreže ponaša kao slave uređaj druge.



Slika 7: Piconet

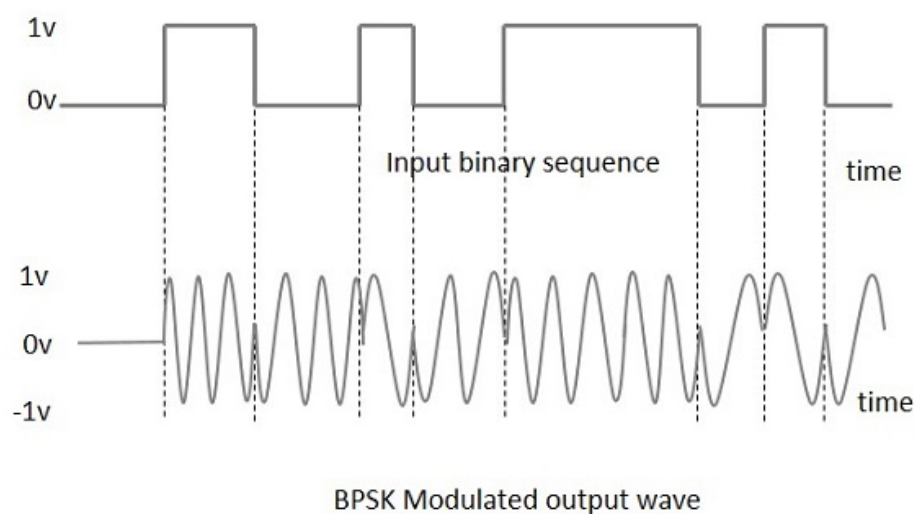
### 4.1.3 Adaptive Frequency Hopping

Skokovi u frekvenciji su neizbježna karakteristika bluetooth uređaja. Zbog toga što su bluetooth uređaji stalno u pokretu (mobiteli, satovi, slušalice, zvučnici itd.), mora postojati način da se izbjegne interferencija između ovih uređaja. Adaptive Frequency Hopping nastoji riješiti ovaj problem, mijenjajući frekvenciju na kojoj bluetooth uređaj radi. Što se tiče adaptivnosti, taj dio naziva proizlazi iz činjenice da uređaj prvo skenira kanale, tražeći kanal sa najmanje prometa.

### 4.1.4 Phase Shift Keying

Phase-shift keying (PSK) je metoda digitalne komunikacije u kojoj se faza transmitovanog signala mijenja, čime prenosi informaciju. Ovo je moguće postići sa nekoliko metoda, od kojih je najjednostavnija binarni PSK koji koristi dvije suprotne faze od  $0^\circ$  i  $180^\circ$  (slika 8). U ovoj metodi, stanje svakog bita se poredi sa prethodnim i te se tako na osnovu njihove

(ne)jednakosti mijenja trenutni bit ili ostavlja istim. Postoje i kompleksnije metode koje uključuju faze od  $+90^\circ$ ,  $-90^\circ$ , ili čak i polovine svih dosadašnjih uglova.



Slika 8: Binarni PSK

#### 4.1.5 Enhanced Data Rate

Enhanced Data Rate (EDR) je tehnologija u kojoj se pomoću PSK modulacione šeme postiže transmisija koja je 2 do 3 puta brža od one koju su prethodne bluetooth tehnologije mogle proizvesti. Pojavljuje se sa Bluetooth 2.0 verzijom kao opcionalna nadogradnja. Koristeći ovu tehnologiju brzina prenosa podataka doseže 2.1 Mbit/s.

#### 4.1.6 BlueCore4-Ext

Ovaj čip ima implementiran bluetooth 2.0 + EDR. Na sebi ima 8 Mbit flash memorije i ima punu podršku za piconet. Uređaj također može služiti kao most za dvije piconet mreže čime nastaje scatternet.

### 4.2 Specifikacije

HC-05 na sebi ima BlueCore4 eksterni čip, i na njemu se zasniva rad modula. Sa time dolazi i kompletna podrška za sve tehnologije koje čip podržava. Pored BlueCore4 mogućnosti, HC-05 podržava Adaptive Frequency Hopping čime se osigurava stabilnost komunikacije. Na sebi ima radio transiver koji radi na 2.4GHz. U mrežama se može ponašati kao master

i slave uređaj. S obzirom da je domet uređaja i do 10 metara, broj scenarija u kojem može biti koristan za komunikaciju je velik.

Potrebna struja	4V-6V
Jačina struje	30mA
Domet	do 10m
Brzina prenosa	do 3Mbps
Piconet uloge	Master, Slave, Master/Slave

Tabela 3: HC-05 specifikacije

Podržane brzine prenosa u bitovima po sekundi su: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800.

Dužina	27 mm
VŠirina	12.7 mm

Tabela 4: HC-05 dimenzije

HC-05 također ima sposobnost pamćenja zadnjeg uvezanog uređaja, te automatsko povezivanje ukoliko isti bude pronađen pri paljenju.

Standard na kojem se zasniva bežična komunikacija je IEEE 802.15.1<sup>4</sup>

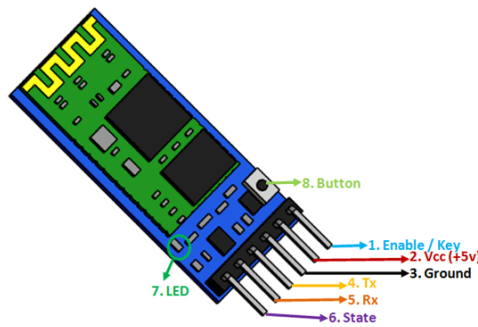
### 4.3 Pinovi

HC-05 ukupno ima 6 pinova.

- **GND** se spaja na uzemljenje.
- **5 VCC** je pin pomoću kojeg se struja (5V) dovodi u modul.
- **RX** prima bitove koji će biti poslani uređaju na koji je modul spojen
- **TX** je putanja kroz koju se vrši transmisija bitova koji su primljeni od strane uređaju.
- **STATE** pin šalje podatke o trenutnom stanju uređaja (Upaljen, ugašen, konektovan, diskonektovan itd.)
- **ENALBE** pin isključuje uređaj kada je na njega upućena struja od 3.3V

---

<sup>4</sup><http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>



Slika 9: HC-05 Šema

## 4.4 AT komande

Kada pri paljenju modula, držimo dugme na njemu pritisnutim, na pin PIO11 spajama struju. Ovo će uređaj pokrenuti u komandnom načinu rada. Kroz RX se sada neće prihvatati podaci koji će se slati kroz antenu, već komande koje će konfigurirati uređaj. Te komande se nazivaju AT komande.

Kako bi mogli poslati ove komande uređaju, moramo se povezati na njega. To možemo učiniti koristeći Arduino "Serial Passthrough" skicu.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600); // Interna softverska serijska komunikacija
    Serial1.begin(38400); // Komunikacija sa HC-05
}

void loop() {
    if (Serial.available())
        Serial1.write(Serial.read());

    if (Serial1.available())
        Serial.write(Serial1.read());
}
```

Nakon što na Arduino pošaljemo ovu skicu, kroz Serial Monitor možemo slati komande direktno na HC-05.

AT	Test komanad
AT+RESET	Reset uređaka
AT+VERSION?	Firmware verzija
AT+ORGL	Vraćanje na fabričke postavke
AT+ADDR?	MAC Adresa uređaja
AT+NAME<Param>	Postavljanje imena uređaja
AT+NAME?	Ime uređaja
AT+RNAME?<Param>	Ime bluetooth uređaja na osnovu adrese
AT+ROLE=<Param>	0-Slave, 1-Master, 2-Slave-Loop
AT+PSWD=<Param>	Postavljanje lozinke
AT+PSWD?	Trenutna lozinka
AT+UART=<Param>,<Param2>,<Param3>	Postavlja baud rate, Stop bit i Parivost
AT+UART?	Baud rate, Stop bit i Parivost
AT+CMODE=<Param>	0-konekcija na fiksnu adresu 1-sve adrese
AT+CMODE?	Trenutni način rada
AT+BIND=<Param>	Postavlja fiksiranu adresu za konekciju
AT+BIND?	Trenutna fiksirana adresa za konekciju
AT+BIND?	Trenutna fiksirana adresa za konekciju
AT+PMSAD=<Param>	Brisanje autentificiranog uređaja
AT+ RMAAD	Brisanje svih autentificiranih uređaja
AT+FSAD=<Param>	Pretraga autentificiranog uređaja
AT+ADCN?	Broj autentificiranih uređaja
AT+MRAD?	Posljednji autentificirani uređaj
AT+LINK=<Param>	Povezivanje s uređajem
AT+DISC	Prekid veze

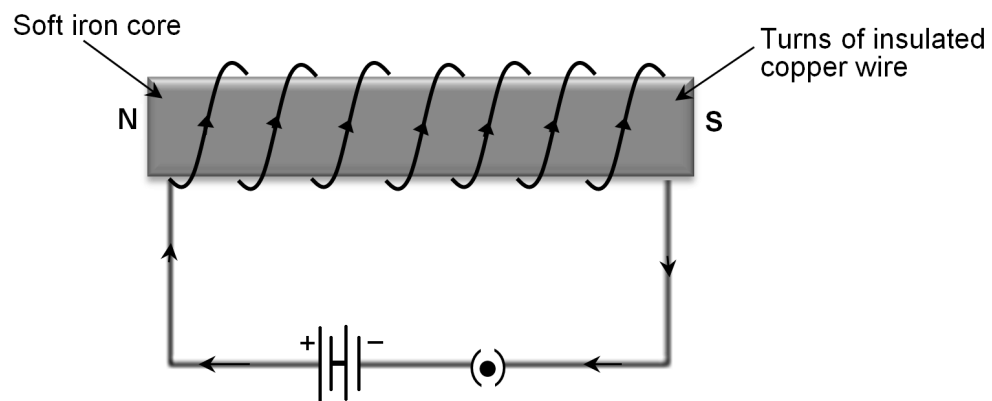
Tabela 5: Tabela AT komandi

## 5 Koračni motori

Koračni motori su tip DC elektronskog motora bez četkica. Revoluciju dijele u jednake korake otkud i dolazi njihov naziv. Ovi motori zbog toga mogu biti precizno pomjereni, i zadržani na željenoj poziciji bez enkodera pozicije.

### 5.1 Elektromagneti

Elektromagneti su tipovi magneta, koji svoja magnetna svojstva pokazuju kada kroz njih teče električna struja. Jedno od svojstava protoka struje kroz provodnik je magnetno polje koje se stvara oko provodnika. Ovo svojstvo se može multiplicirati zavijanjem izoliranog provodnika u spiralu oko provodničkog jezgra. Za razliku od trajnih magneta, magnetna svojstva ovih uređaja mogu biti aktivirana po potrebi.



Slika 10: Elektromagnet

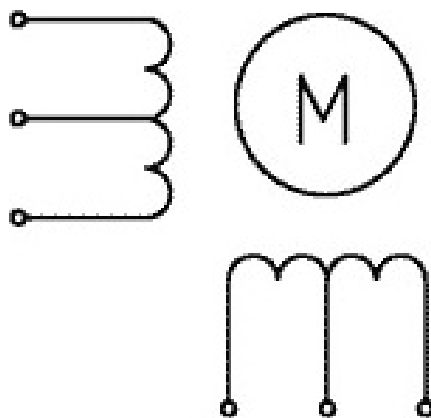
### 5.2 Proces rotacije ose

Koračni motori su građeni iz okvira, koji čine elektromagneti i jezgra, koje čini željezni zupčanik, koji je ujedno i trajni magnet. Ovi magneti su najčešće kontrolisani od strane mikrokontrolera ili upravljač koji nije dio samog motora. Kako bi se osovinu motora rotirala, potrebno je pustiti protok struje kroz jedan elektromagnet. Nakon što se povučen magnetnom silom, zupčanik fiksira na poziciju, paljenjem drugog elektromagneta se postiže rotacija ose motora na željenu poziciju. Ova rotacija predstavlja koncept koraka, gdje prirodni broj N koraka čini jednu revoluciju osovine motora.

## 5.3 Tipovi

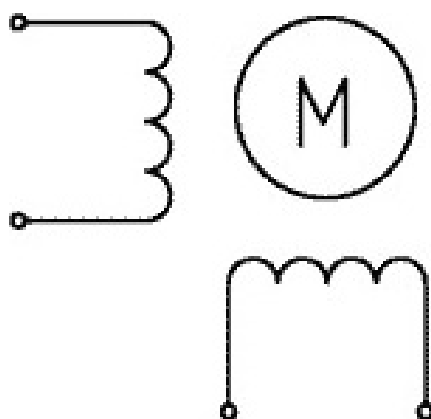
Postoje dva tipa koračnih motora:

**Uniopolarni** koračni motori za jedan elektromagnet sa središnjim izlazom (eng. center tap). To omogućava da promjenom kraja na kojem je uzemljenje elektromotora, samo polovina elektromagneta bude magnetizirana.



Slika 11: Šema unipolarnog motora

**Bipolarni** koračni motori imaju samo po jednu žicu na oba kraja elektromotora od kojih je jedna spojena na uzemljenje, a druga na izvor struje. Ovo omogućava jače magnetno djelovanje, kao i kreiranje magnetnog polja u oba smijera na zajedničkom prostoru.



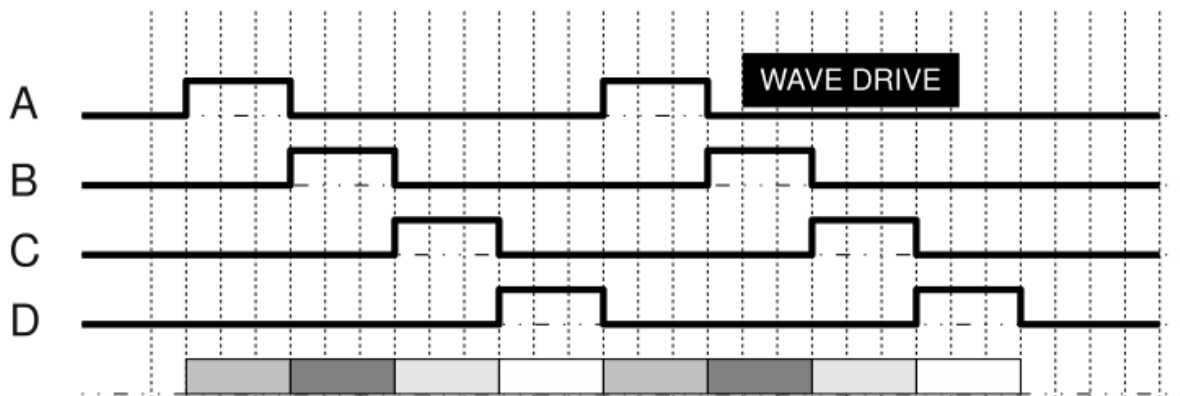
Slika 12: Šema bipolarnog motora

Prednost bipolarnih motora je veća vučna sila i jače magnetno polje, a unipolarnih je manji troškovi, zbog jednostavnije kontrole, kao i manji otpor.

## 5.4 Načini upravljanja

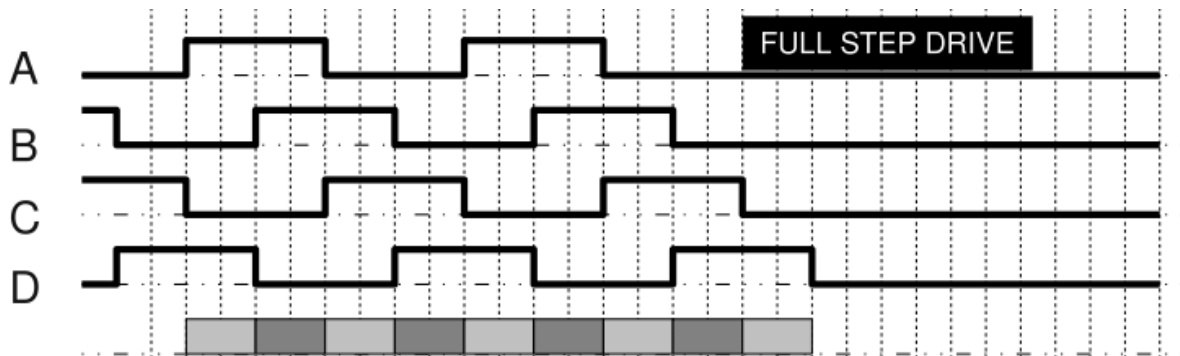
U praksi postoje 4 načina upravljanja koračnim motorima

**Valno upravljanje** je metoda gdje se u jednom trenutku šalje samo jedna faza. Ovo upravljanje se rijetko koristi jer ima jednak broj koraka kao upravljanje punim korakom, ali samo 50% njegove vučne sile. Ukoliko zupčanik ra rotoru ima 25 zuba, onda će se svaki taj zub pomjeriti pomoću 4 faze. To znači da će se sa 100 koraka napraviti jedna revolucija.



Slika 13: Valno upravljanje

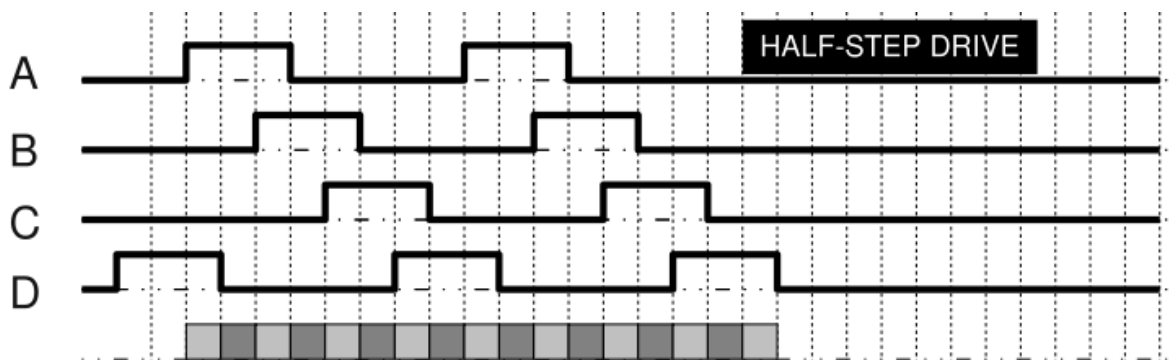
**Metoda punog koraka** je najčešće korištena metoda upravljanja. U svakom trenutku ima tačno dvije faze. Ovom metodom se izvlači maksimalna vučna sila motora, dok također ima 100 koraka po revoluciji.



Slika 14: Metoda punog koraka

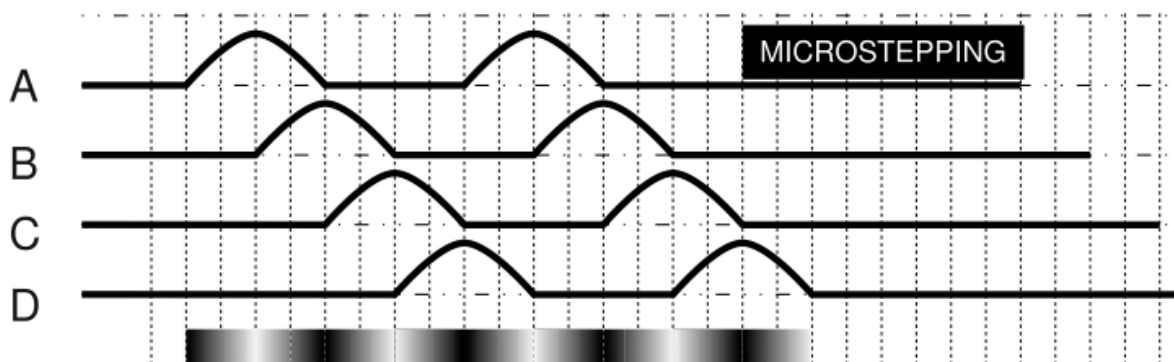


**Polukoračno** upravljanje radi promjenu između dvije faze za vrijeme jedne faze. Ovo motoru smanjuje vučnu silu, ali udvostručava rezoluciju. Kako je sada potrebno 8 faza kako bi se zupčanik pomjerio za jedan zub, jedna revolucija zahtjeva 200 koraka.



Slika 15: Polukoračno upravljanje

**Mikrokoračanje** je metoda u kojoj se sinusnom i kosinusnom funkcijom kreiraju faze. Ovo znatno smanjuje broj koraka u jednoj revoluciji, čime se povećava rezolucija samog motora. U ovim situacijama, ograničenje broja koraka u revoluciji postoji zbog statičkog trenja i zazora.



Slika 16: Mikrokoračanje

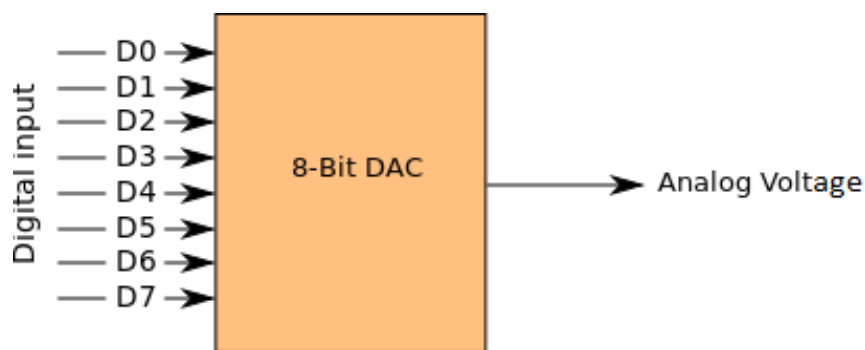
Kako bi se postigle veće brzine kretanja motora, potrebna je akceleracija, koja će motor dovesti do pune brzine. U primjeni sam također zapazio da se deakceleracijom pri promjeni smjera postiže bolji rezultat pri promjeni smjera kretanja.

## 6 A4988

Upravljač motora A4988 je namijenjen za upravljanje bipolarnim koračnim motorima. Pomoću ovog uređaja, motoru možemo dostaviti i do 2A po namotaju. Međutim, za jačinu struje se ne moramo previše brinuti, jer A4988 ima ugrađenu zaštitu od prekomjerne struje (eng. overcurrent protection).

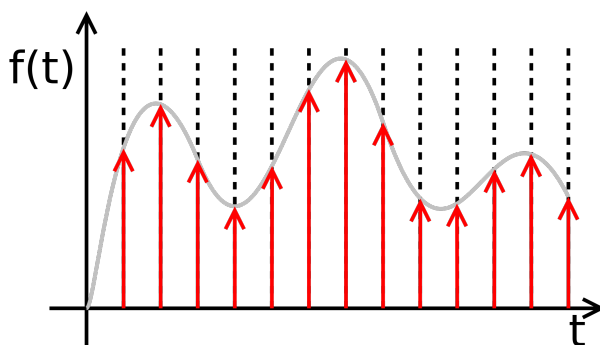
### 6.1 Digitalno-analogni konverter

U elektronici se dizajneri često susreću sa situacijom da je iz digitalnog, potrebno dobiti analogni signal. Ovaj problem se rješava koristeći digitalno-analogne konvertere (eng. Digital-to-analog converter, DAC)



Slika 17: 8-bitni DAC

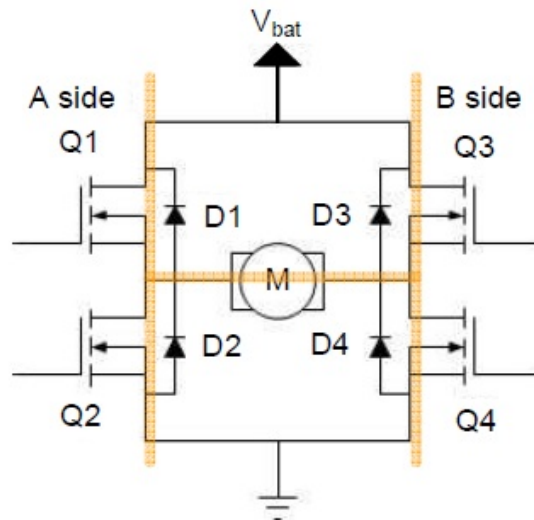
DAC funkcionise tako što konvertuje apstraktni broj, konačne preziznosti u analogni signal čija je voltaža proporcionalna ulaznoj vrijednosti. Idealan DAC konvertuje apstraktni broj u niz impulsa, nakon čega se koristi linearnu interpolaciju, popunjava signal između impulsa.



Slika 18: Primjer idealne konverzije iz digitalnog u analogni signal

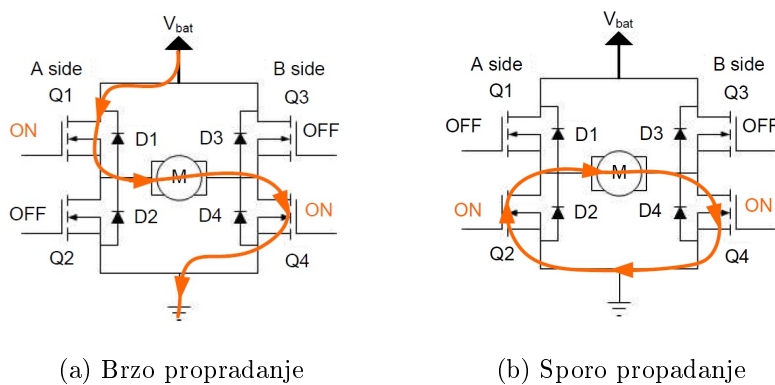
## 6.2 H-most

H-most je električno kolo čiji je zadatak kontrola toka struje. Najčešće se pojavljuju kao već integrisane komponente. H-most je građen iz četiri prekidača čijim se kombiniranjem u motoru mijenja tok struje.



Slika 19: H-most

H-most ima dva moda u kojima prekidači mogu biti postavljeni, a to su brzo i sporo propadanje (eng. decay). U ovom kontekstu, propadanje prestavlja brzinu kojom se jačina struje u navoju može spustiti na 0.



Slika 20: Modovi rada H-mosta

### 6.3 Miješano propadanje

U svakom koraku motora, protok struje se kontrolira koristeći vrijednost eksternih rezistora čija je uloga opažati ulazni protok struje, referentnu voltažu, i izlaznu voltažu digitalno-analognog konvertera, koja se kontroliše od strane translatora. Ukoliko je trenutni izlaz DAC-a, u odnosu na prošli niži, onda se mod aktivnog mosta postavlja na mod miješanog propadanja (jedno od svojstava A4988 čipa). Ukoliko je trenutni izlaz DAC-a viši, postavlja se na sporo propadanje. Ovo dinamično mijenjanje modova poboljšava performanse motora u vidu smanjenja distorzije talasa koji prenosi signal.

### 6.4 Pinovi

A4988 upravljač, na sebi ima 16 pinova:

**ENABLE** se koristi za privremeno isključenje uređaja, kada se na njemu nalazi visoki nivo voltaže, uređaj neće primati naredbe.

**MS1, MS2, MS3** su pinovi koji određuju rezoluciju mikrokoračanja motora. Stavljenjem visokog voltažnog nivoa po zadanom šablonu će upravljač prebaciti na drugi mikrokoračni mod.

MS1	MS2	MS3	Rezolucija u veličini koraka
N	N	N	$\frac{1}{1}$
V	N	N	$\frac{1}{2}$
N	V	N	$\frac{1}{4}$
V	V	N	$\frac{1}{8}$
V	V	V	$\frac{1}{16}$

Tabela 6: Šabloni MS pinova

**RESET** vraća translator na početno stanje, dok je visoki nivo voltaže, svi ulazi se ignorišu.

**SLEEP** se koristi za uštedu energije, i postavljajući na njega visoki nivo voltaže, uređaj se stavlja u “sleep mode”.

**STEP** pin, slanjem impulsa voltaže visokog nivoa, zatim vraćanje na niski nivo voltaže, upravljač pravi jedan korak na motoru u smjeru zavisnom od stanja DIR pina, i veličine zavisne od trenutne rezolucije.

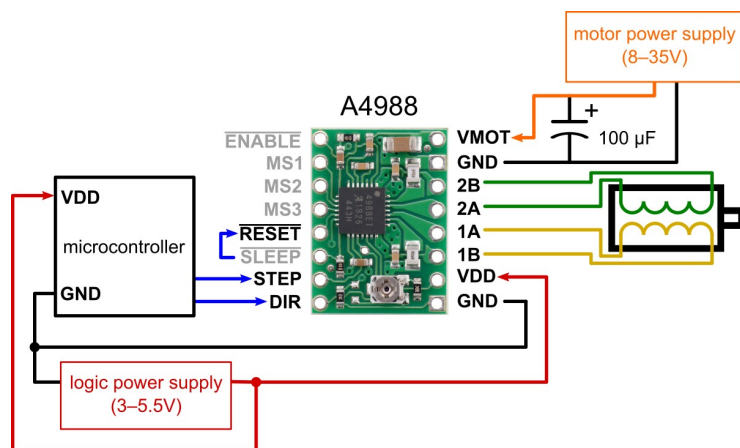
**DIR** služi za određivanje smjera u kojem će se osa motora okretati. Ovaj pin mora konstantno imati na sebe pušten nivo voltaže gdje visoki i niski određuju smjer.

**VMOT** je ulaz za struju kojom će se napajati motor. Voltaža ove struje treba biti između 8V i 35V.

**VDD** predstavlja zvor struje za upravljač.

**GND**, na upravljaču se nalaze 2 pina za uzemljenje, jedan za struju koja napaja sam uređaj, drugi za struju koja napaja motore.

**1A,1B,2A,2B** su pinovi koji se povezuju direktno na motor. Parovi za navoje su 2A i 2B, kao i 1A i 1B.



Slika 21: Najjednostavnija šema spajanja A9488

## 6.5 Specifikacije

Potrebna struja	3V-5V
Maksimalna jačina struje	2A
Termalno gašenje	-20°C, + 80°C
Dužina	do 20.3mm
Širina	do 15.2mm

Tabela 7: A4988 specifikacije

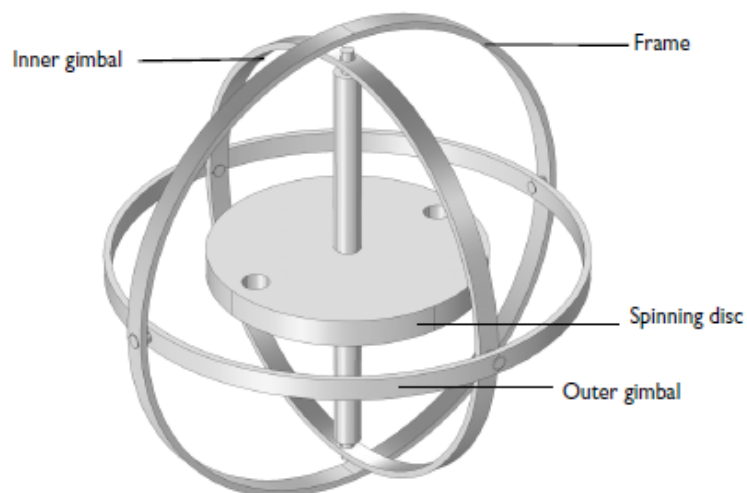
A4988 na sebi ima potencijometar kojim se može kontrolisati jačina struje koja prolazi kroz upravljač.

## 7 MPU6050

MPU6050 je uređaj za praćenje kretanja i orijentacije tijela na kojem se nalazi. Kombinacijom žiroskopa i akcelerometra, sa po tri ose, zajedno sa Digital Motion Processor-om daje vrlo precizne podatke o trenutnom položaju uređaja.

### 7.1 Žiroskop

Žiroskop je uređaj koji koristeći zemljinu gravitaciju određuje svoju orijentaciju. Sastavljen je od diska koji se vrti (rotora), koji se nalazi na osovini, na kojoj se također nalaze tri stacionarna prstena. Kada se orijentacija promijeni, zahvaljujući svojoj rotacionoj sili, rotor ostaje u istom orijentacionom odnosu sa zemljom, što omogućava očitavanje pomjeranja u odnosu na stacionarni dio uređaja oko žiroskopa.



Slika 22: Žiroskop

### 7.2 Akcelerometar

Akcelerometar je mjerni instrument pomoću kojeg se mjeri promjena u brzini kretanja tijela. Mjerenjem inercijske sile, koja djeluje na referentnu masu u akcelerometru, prema drugom Newtonovom zakonu se može izračunati ubrzanje.

$$a = \frac{F}{m}$$

Zbog ovoga će akcelerometar koji je u mirnom stanju očitavati ubrzanje od  $9.81\text{m/s}^2$ , a akcelerometar koji pada  $0\text{m/s}^2$ .

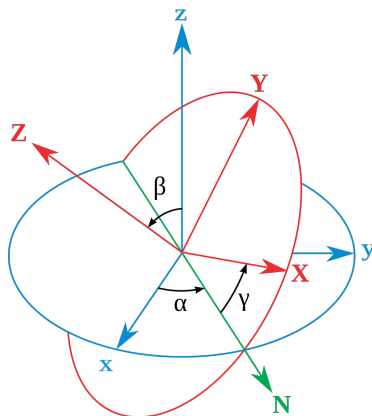
## 7.3 Digital Motion Processing

Digital Motion Processor (DMP) je interni procesor, koji se nalazi na MPU6050. Nažalost, ovaj procesor je zatvorenog koda i nije dokumentovan. Zbog toga se u Arduino projektima koristi biblioteka “I2Cdevlib”<sup>5</sup> koja je nastala kao proces reverznog inženjeringa, biblioteke koja preuzima podatke iz DMP-a

### 7.3.1 Eulerovi uglovi

Eulerovi uglovi se koriste kako bi se predstavila orijentacija tijela u odnosu na fiksirani koordinatni sistem. Ovom metodom se utvrđuje rotacija tijela sa osama  $x, y, z$  u tijelo  $X, Y, Z$ . Prvo je potrebno odrediti N-osu, koja se dobija vektorskim proizvodom  $N = Z \times X$ . Zatim se definišu uglovi:

- $\alpha$  kao ugao između x-ose i N-ose
- $\beta$  kao ugao između z-ose i Z-ose
- $\gamma$  kao ugao između X-ose i N-ose



Slika 23: Primjer Eulerovih uglova na rotaciji  $x, y, z \rightarrow X, Y, Z$

**Problemi** koji se pojavljuju kod ovog pristupa rotaciji tijela su:

- Svaku orijentaciju nije moguće predstaviti koristeći samo jednu jednačinu
- Tzv. “Gimbal lock” je problem koji nastaje kada ugao između bilo koje dvije ose postane  $0^\circ$  čime se gubi jedan stepen slobode koji rotacija ima.

<sup>5</sup><https://www.i2cdevlib.com/>

### 7.3.2 Kvaternioni

Kvaternioni su numerički sistem koji proširuje kompleksne brojeve. Sastavljeni su od imaginarnog i realnog dijela.

$$a + b\mathbf{i} + c\mathbf{j} + d\mathbf{k}$$

U jednačini iznad,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  predstavljaju realne brojeve, dok su  $i$ ,  $j$  i  $k$  imaginarni.

Pravila koja vrijede za množenje imaginarnih dijelova su:

$$ij = k$$

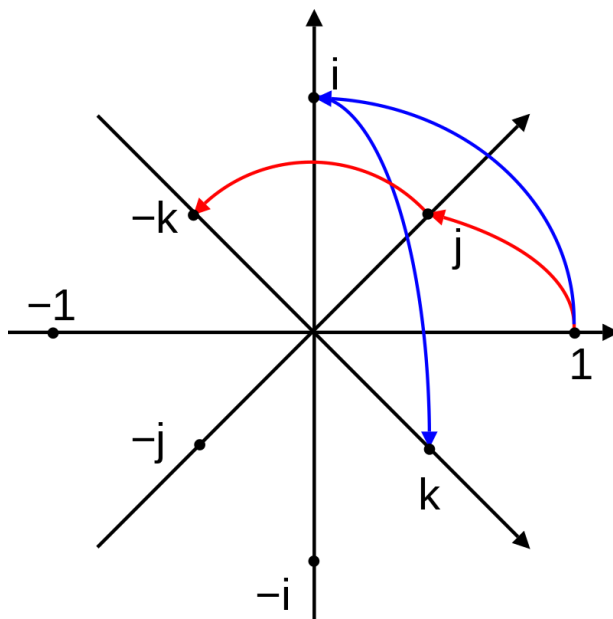
$$ji = -k$$

$$jk = i$$

$$kj = -i$$

$$ki = j$$

$$ji = -k$$



Slika 24: Grafički prikaz proizvoda imaginarnih dijelova  $i$  i  $j$

**Konjugacija** Konjugacija kvaterniona se vrši promjenom predznaka imaginarnom dijelu



$$q = a + bi + cj + dk$$

$$q^* = a - bi - cj - dk$$

**Tenzor** Tenzor kvaterniona se dobija formulom:

$$||q|| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

**Inverzija** Inverzni kvaternion se dobija formulom:

$$q^{-1} = \frac{q^*}{|q|^2}$$

**Rotacija** Najčešća upotreba kvaterniona jeste opisivanje rotacije. Rotacija tačke p, kvaternionom koji opicuje rotaciju q se može riješiti formulom

$$p' = qpq^{-1}$$

Prednost ove rotacije u odnosu na Eulerovu, ili matičnu je ta što imaginarni dio onemogućava gubljenje stepena slobode, kao i to što svaka rotacija može biti opisana jednim kvaternionom rotacije.

## 7.4 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C je serijski komunikacijski protokol zasnovan na master/slave modelu. U ovom modelu, jedan ili više master uređaja, mogu kontrolirati jedan ili više slave uređaja. Podaci se prenose kroz dvije putanje:

- SDA (Serial Data) - kroz ovu putanju se šalju komunikacijski paketi
- SCL (Serial Clock) - putanja koja prenosi signal sata

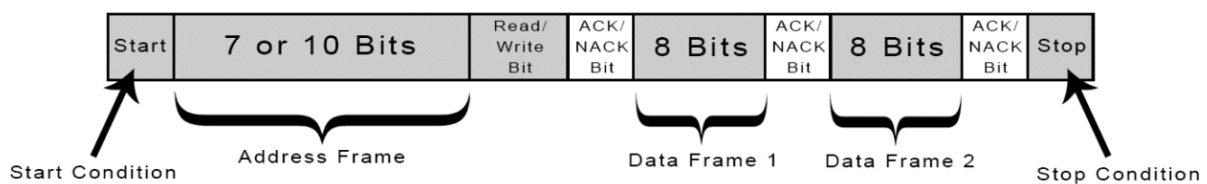
Podaci se kroz SDA prenose bit po bit, koji su sinkronizirani sa SCL signalima, kontrolisanim od strane master uređaja. Maksimalan broj slave uređaja za jedan master uređaj je 1008, dok je u obrnutoj direkciji maksimalan broj teoretski beskonačan.

### 7.4.1 Paketi

Komunikacija ovog protokola se zasniva na slanju paketa. Veličina mu nije fiksna, već se dinamički, pomoću početnog i stop signala, određuju početak i kraj mrežnog paketa. Konstrukciju jednog paketa čini 9 okvirova (6 tipova okvira):

- Početni signal - na SDA putanji se prebacuje sa visoke voltažne vrijednosti, na nisku, prije nego što se na SCL učini isto.
- Adresni okvir - identificira slave uređaj sa kojim master želi komunicirati (7-10 bita)
- Bit primanja ili slanja - Visoka voltažna vrijednost u ovom trenutku označava da master uređaj od ovog trenutka šalje podatke odabranom slave uređaju, dok niska označava da će početi proces primanja podataka. (1 bit)
- ACK/NACK - Nakon svakog okvira se šalje ACK poruka sa informacijom pošiljaocu, da li je njegova poruka uspješno primljena (1 bit)
- Okvir sa podacima (8 bit)
- Stop signal - proces obrnut početnog uslovu gdje se prebacuje na visoku voltažnu vrijednost

**Okvir sa podacima** se šalje nakon što master uređaj dobije pozitivan ACK frame od slave uređaja. Nakon svakog poslanog podatkovnog okvira, trenutno se prema master uređaju šalje ACK/NACK okvir, od strane slave uređaja čija se adresa nalazi u adresnom okviru.



Slika 25: Primjer I<sup>2</sup>C paketa

Brzina ove komunikacije može biti između 100kbps i 5Mbps.

Najveća mana ovog protokola je ograničenje okvirnog podatka na 8 bita.

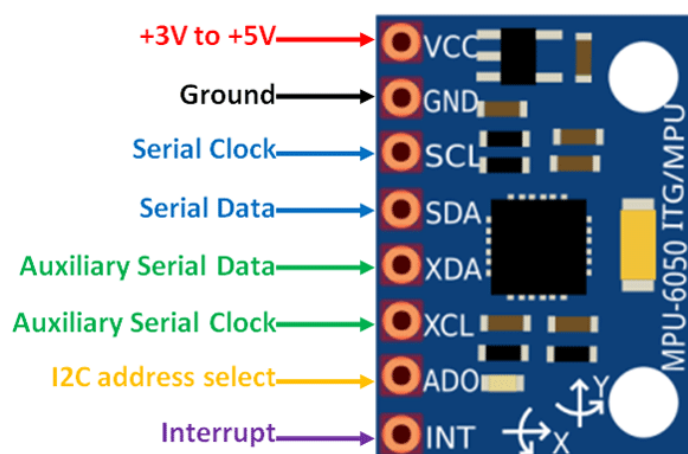
Potrebna struja	3V-5V
Komunikacijski protokol	I <sup>2</sup> C
Dužina	21.2mm
Širina	do 16.4mm

Tabela 8: MPU6050 specifikacije

## 7.5 Specifikacije

### 7.5.1 Pinovi

- VCC - ulaz za struju
- GND - uzemljenje
- SCL - serijski sat
- SDA - serijska putanja podataka
- XCL - pomoćni sat, koristi se za konekciju na serijski sat drugih I2C uređaja
- XDA - pomoćna putanja podataka, koristi se za konekciju na serijsku putanju podataka drugih I2C uređaja
- AD0 - slave adresa uređaja, ovaj pin određuje nulti bit 7 bit-ne adrese i kada je na njemu visoki stepen voltaže, mijenja adresu uređaja postavivši nulti bit na 1
- INT - digitalni pin koji se koristi za prekide.



Slika 26: Raspored pinova na MPU6050

## 7.6 I2Cdevlib

I2Cdevlib je biblioteka napisana u C++ programskom jeziku koja olakšava korištenje MPU6050 u Arduino projektima. Neke od funkcija koje ova biblioteka nudi su:

**Initialize()** postavlja čip u stanje koje je spremno za očitavanje. Ova funkcija postavlja brzinu sata na SCL-u.

**dmpInitialize()** vrši manipulaciju registara kojom se dmp čip stavlja u funkciju kao i inicijalizacija FIFO buffera, koji čuva podatke prije nego što budu poslani kroz SDA.

**Set[X | Y | Z][Gyro | Accel]Offset()** Postavlja pomak orijentacije uređaja nastalih, zbog grešaka u proizvodnji i nesavršene pozicije uređaja na tijelu.

**Calibrate[Gyro | Accel]Offset(n)** Vršiti kalibraciju žiroskopa i akcelerometra tako da trenutna pozicija bude nulta za oboje. Broj n predstavlja koliko puta će se ponoviti kalibracija prije uzimanja srednje vrijednosti.

**getIntStatus()** Vraća informaciju o tome da li trenutno postoji signal za prekid koji je došao od MPU6050 uređaja.

**dmpGetFIFOPacketSize()** Vraća veličinu paketa koja se nalazi u FIFO bufferu.

**getFIFOCount()** Vraća broj bita koji se nalazi u FIFO bufferu.

**getFIFOBytes(packet, size)** Upisuje size veličinu paketa iz FIFO buffera u packet varijablu.

**dmpGetQuaternion(&q, packet)** pretvara podatke iz paketa packet u kvaternion rotacije i pohranjuje ih u objekt tipa quaternion q.

**mpu.dmpGetEuler(euler, &q)** Vršiti konverziju kvaterniona rotacije q u Eulerove uglove koje pohranjuje u niz od 3 float varijable  $euler(\alpha, \beta, \gamma)$ .

## 8 PID kontroler

PID kontroler je kontrolna petlja, čiji zadatak je da primijeni preciznu i vremenski prihvatljivu korekciju kontrolnoj funkciji. To postiže računajući vrijednost greške, kao razliku ulazne i ciljane vrijednosti, uzevši u obzir proporcionalni, integralni i derivativni dio.

Ukoliko iz jednačine izostavimo neki od dijelova PID-a, onda tu jednačinu oslovljavamo nazivom koji u sebi također ne sadrži taj dio.

Ako su  $e$ ,  $r$  i  $y$ , greška, ciljane vrijednost i ulazna vrijednost, respektivno, onda vrijedi da je:

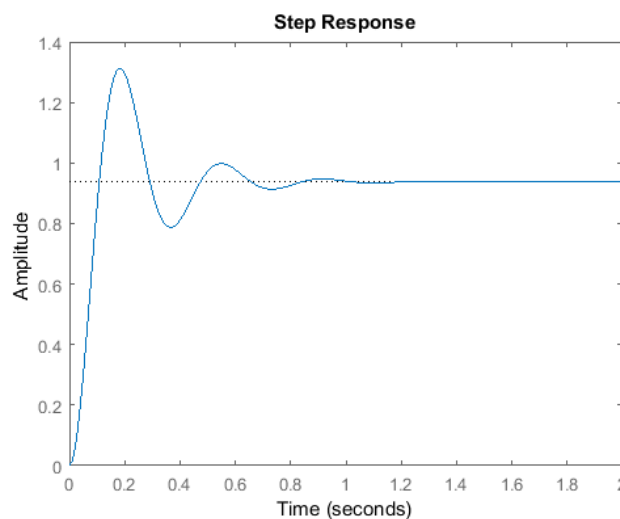
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

### 8.1 Proporcionalni dio

Proporcionalni dio PID kontrolera ima sopstvenu izlaznu vrijednost u uzajamnom odnosu sa greškom. To znači da će se u P kontroleru, primjenjujući izlaznu vrijednost na pokretač, greška proporcionalno smanjivati. Kada se greška smanji na 0, tada će i izlaz biti 0

$$P = K_p * e(t)$$

Ovaj dio, u teoriji zvuči korisnije nego što jeste, zbog toga što u stvarnom svijetu, nije optimalno prestati sa primijenjivanjem ispravljačke sile u trenutku kada je ona 0 (npr. tijelo koje ima inerciju, grijač koji nastavlja grijati i kad se ugasi).



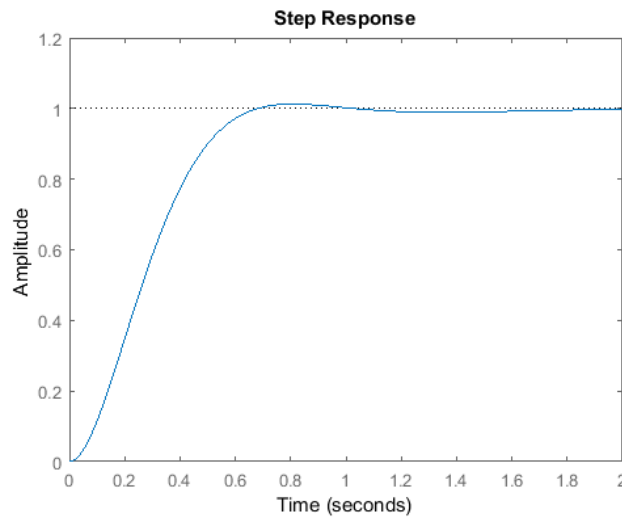
Slika 27: Graf P kontrolera

## 8.2 Integralni dio

Integralni dio akumulira grešku kroz vrijeme i ima sporiju reakciju od proporcionalnog dijela. Zadatak ovog dijela kontrolera je da eliminiše preostalu grešku i smanji prelijetanje (eng. overshooting).

$$I = K_i * \int_0^t e(t') dt'$$

Kada se greška smanjuje, usporava se rast integranlog dijela, ovo rezultuje približavanjem proporcionalnog dijela 0 što se kompenzuje greškom akumuliranom u integralnom dijelu.



Slika 28: Graf PI kontrolera

## 8.3 Derivativni dio

Derivativni dio za zadatak ima da predvidi trend smanjenja greške u idućem koraku, koristeći razliku između trenutne i prošle greške. Mjereći koliko brzo se greška u procesu mijenja, nastoji istu eliminisati.

$$D = K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

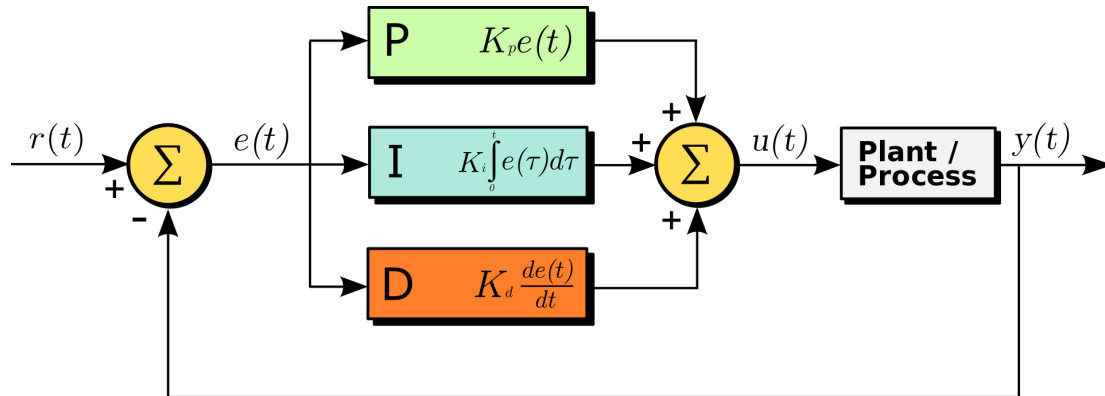
Uređaji koji generišu ulaz za PID često imaju šum, derivativni dio također kao svoj zadatak ima da eliminiše grešku koja nastaje ovim šumom. Pomoću derivativnog dijela, nastaje tzv. prigušenje koje onemogućuje prelijetanje.

## 8.4 PID

Kombinujući sva tri dijela koja su dosad opisana, dobija se PID jednačina:

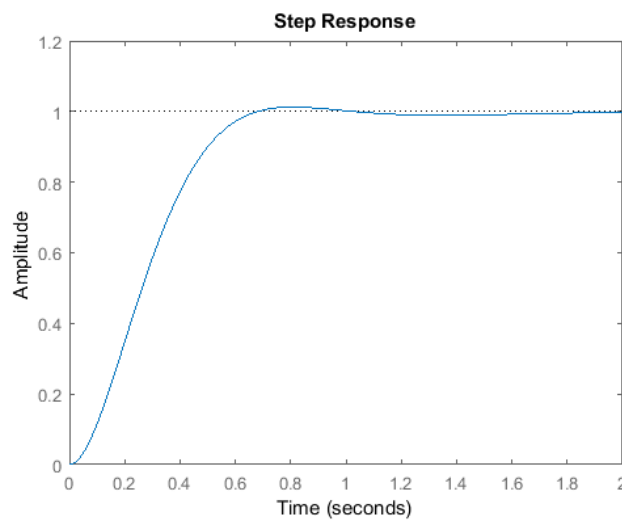
$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t') dt' + K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

$K_p, K_i$  i  $K_d$  se koriste kako bi se pojačao ili smanjio efekt koji proporcionalni, integralni i derivativni dio imaju na izlaz jednačine.



Slika 29: Petlja sa PID kontrolerom

Greška u stanju mirovanja je greška koja nastaje proporcionalnim dijelom jednačine. Ona predstavlja osciliranje oko ciljane vrijednosti koje nastaje kao posljedica konstantnog proporcionalnog dijela koji će premašivati potrebnu vrijednost izlaza. Ovaj problem rješava integralni dio koji preuzima kontrolisanje izlaza sa smanjenjem greške.

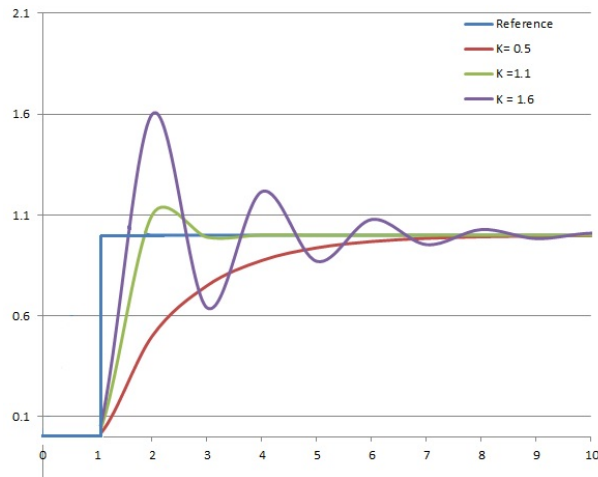


Slika 30: Graf PID kontrolera

## 8.5 Podešavanje parametara

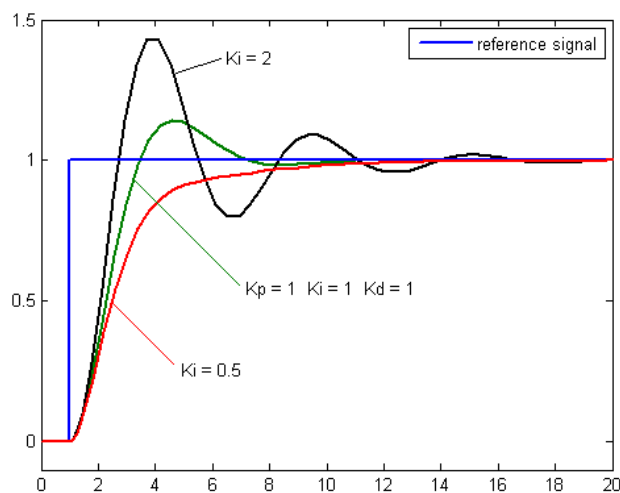
Jedan od najvećih problema sa kojim se dizajneri PID kontrolera susreću jeste podešavanje parametara.

Ručno podešavanje parametara je metoda koja se započinje tako što se  $K_i$  i  $K_d$  inicijalno postave na 0. Nakon toga,  $K_p$  je potrebno povećavati sve dok petlja ne počne oscilirati. Vrijednost  $K_p$  bi trebala biti podešena na jednu polovinu vrijednosti.



Slika 31: efekt  $K_p$  parametra na izlaz

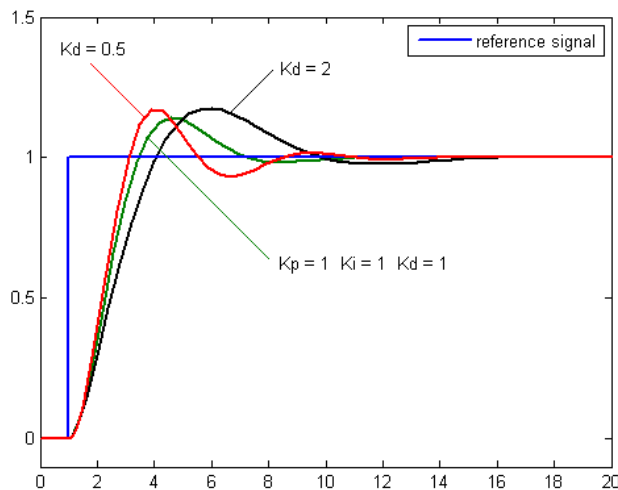
Kada je vrijednost  $K_p$  postavljena, prelazi se na podešavanje  $K_i$  parametra. Potrebno je parametar povećavati sve dok se svaki pomak ne može korektovati u najmanjem vremenu neophodno kako bi sistem nastavio raditi. Previše  $K_i$  vrijednosti dovodi sistem u nestabilno stanje



Slika 32: efekt  $K_i$  parametra na izlaz



Ukoliko je potrebno,  $K_d$  treba povećavati dok se vrijeme osciliranja ne smanji na minimum. Brzi sistemi obično imaju podešen ovaj parametar tako da dolazi do malog prelijeetanja kako bi se sistem prije doveo u stanje balansa. Neki sistemi nemaju toleranciju na prelijetanje pa se ova metoda ne može primijeniti.



Slika 33: efekt  $K_d$  parametra na izlaz

## 8.6 Modifikacije

### 8.6.1 Integralni zamah

Integralni zamah (eng. Integral windup) je problem koji nastaje kada pokretač nije u stanju pružiti silu koja mu je zadana izlaznom vrijednošću. Kod ovih slučajeva, integralni dio akumulira grešku što dovodi do prelijetanja. Postoji nekoliko načina da se riješi ovaj problem:

- Isključivanje integralnog dijela sve dok ulazna vrijednost nije u parametrima koji se mogu kontrolisati
- Limitiranje maksimalne vrijednosti integralnog dijela
- Preračunavanje integralnog dijela kako bi ostao u prethodno određenim granicama

### 8.7 Deadband

Modifikacija PID kontrolera koja se naziva deadband, znači određivanje zone PID izlaza za koji se isti pretvara u nulu. Ovo se koristi kod sistema koji ne trebaju da reaguju na jako male promjene, tj. kada u sistemu dolazi do kvarova nastalih trenjem.

## 9 Android aplikacija

## 10 Robot

## 11 Zaključak