



ŠOLSKI  
CENTER  
CELJE

Šolski center Celje,

srednja šola za kemijo, elektrotehniko in računalništvo

raziskovalna naloga

## **IZDELAVA DALJINSKO VODENEGA ŠTIRIKOPTERJA**

Mentor:

**Gregor Kramer, univ. dipl. inž. el.**

Avtorja:

**Benjamin Lipnik, Gregor Mansutti**

Celje, marec 2020

# Kazalo

Zahvala .....	4
1. Povzetek .....	5
2. Uvod .....	6
2.1 Predstavitev raziskovalnega problema.....	6
2.2 Hipoteze .....	6
2.3 Opis raziskovalnih metod .....	6
3. Opis delovanja naprave .....	7
3.1 Sestavni deli štirikopterja .....	7
3.1.1 Regulacijsko krmilje – Flight controller .....	8
3.1.2 Baterija .....	8
3.1.3 Ploščica za distribucijo energije – Power distribution board .....	9
3.1.4 Brezkrtačni (BLDC) elektromotorji.....	9
3.1.5 Propelerji .....	10
3.1.6 Elektronski krmilnik hitrost – Electronic speed controller .....	10
3.1.7 Ogrodje .....	11
3.1.8 Sprejemnik in daljinec .....	11
3.2 Izbira in izdelava komponent .....	12
3.2.1 Regulacijsko krmilje – Flight controller .....	12
3.2.2 Baterija .....	13
3.2.3 Ploščica za distribucijo energije.....	14
3.2.4 Motorji.....	14
3.2.5 Propelerji .....	15
3.2.6 Elektronski krmilniki hitrost.....	16
3.2.7 Ogrodje.....	17
3.2.8 Daljinski upravljalnik.....	18
3.3 Programska koda.....	19
3.3.1 Programska koda regulacijskega krmilja .....	19
3.3.2 Programska koda daljinskega upravljalnika .....	23
4. Najin izdelek .....	24
5. Razprava .....	25
6. Zaključek.....	26
7. Viri .....	27
7.1 Viri slik .....	28

## Kazalo slik

SLIKA 1: BLOK SHEMA ŠTIRIKOPTERJA .....	7
SLIKA 2: PLOŠČICA ZA DISTRIBUCIJO ENERGIJE .....	9
SLIKA 3: BREZKRTAČNI MOTOR .....	9
SLIKA 4: POGOSTO OGRODJE ZA ŠTIRIKOPTER.....	11
SLIKA 5: DALJINEC IN SPREJEMNIK NA VOLJO V TRGOVINI.....	11
SLIKA 6: SHEMA VEZJA REGULACIJSKEGA KRMILJA .....	13
SLIKA 7: IZDELANO REGULACIJSKO KRMILJE .....	13
SLIKA 8: IZDELANA PLOŠČICA ZA DISTRIBUCIJO ENERGIJE .....	14
SLIKA 9: BREZKRTAČNI ELEKTROMOTOR Z NOSILCEM ZA MONTAŽO IN NOSILCEM ZA PROPELER.....	14
SLIKA 10: IZBIRA PROPELERJEV.....	15
SLIKA 11: KUPLJENA ELEKTRONSKA KRMILNIKA HITROSTI.....	16
SLIKA 12: IZDELAN PROTOTIP ELEKTRONSKEGA KRMILJA HITROSTI .....	16
SLIKA 13: IZDELANO OGRODJE ŠTIRIKOPTERJA S PRITRJENIMI ELEKTROMOTORJI .....	17
SLIKA 14: SHEMA VEZJA DALJINSKEGA UPRAVLJALNIKA .....	18
SLIKA 15: IZDELAN DALJINSKI UPRAVLJALNIK .....	18
SLIKA 16: PROGRAMSKA KODA ZA INICIALIZACIJO SENZORJA VZTRAJNOSTI .....	19
SLIKA 17: PROGRAMSKA KODA ZA BRANJE IN KALIBRACIJO PODATKOV S SENZORJEV .....	19
SLIKA 18: PRIKAZ SPI PROTOKOLA.....	20
SLIKA 19: PRIKAZ OSI IN POIMENOVANJA VRTENJA OKOLI VSAKE IZMED NJIH .....	21
SLIKA 20: PROGRAMSKA KODA ZA PRERAČUNAVANJE PODATKOV.....	21
SLIKA 21: IMPLEMENTACIJA PID REGULACIJE PO ENI OSI .....	22
SLIKA 22: NASTAVITEV ČASOVNIKA.....	22
SLIKA 23, 23: VSTAVLJANJE IZHODA REGULACIJE V ČASOVNIK .....	22
SLIKA 24: DEL PROGRAMSKE KODE ZA BRANJE POZICIJE KRMILNIH PALIC IN GUMBOV .....	23
SLIKA 25: NAJIN UNIKATNI ŠTIRIKOPTER .....	24

## Zahvala

Zahvaljujema se mentorju profesorju Gregorju Kramerju, ki nama je omogočil dobre pogoje za raziskovanje v šoli. Profesorju Andreju Grilcu, ki naju je usmerjal pri pisanju naloge. Hvala lektorici za lektoriranje. Zahvaljujema se tudi najinima družinama, ki sta naju spodbujali pri projektu.

## 1. Povzetek

Kot dijaka srednje elektrotehniške šole naju je zelo zanimala izdelava osnovnega štirikopterja. Raziskovala sva, kako je sestavljen in kako ga izdelati. Da sva dosegla zastavljen cilj, sva brala literaturo, laboratorijsko in terensko raziskovala ter analizirala pridobljene podatke. Ugotovila sva, da je štirikopter na daljinsko vodenje mogoče narediti doma. Če upoštevamo le materialne stroške, je tako izdelan štirikopter cenejši od kupljenega. Za tovrstno raziskavo ni potrebno le šolsko znanje smeri elektrotehnika, ampak tudi poglobljanje v številne na spletu dostopne podatke. Takšen način raziskovanja, s katerim dobimo končen izdelek (štirikopter) pozitivno vpliva na motivacijo za učenje. Raziskava je na koncu prinesla tudi ideje za nadaljnje raziskovanje.

## 2. Uvod

### 2.1 Predstavitev raziskovalnega problema

Štirikopterji in podobna manjša plovila na daljinsko vodenje so brezpilotna zračna plovila. Letijo s pomočjo zračnega vzgona, navpične vlečne sile, ki dviguje štirikopter. Ustvarjajo ga vrteči se propelerji.

Štirikopterje vedno pogosteje uporabljajo tako obrtniki, kot tudi ostali ljudje za splošno rabo. Obrtniško so štirikopterji največkrat uporabljeni za izdelavo fotografij in videoposnetkov z višine, splošno pa so največkrat uporabljeni za zabavo ter raziskovanje nepreglednih, človeku težko dostopnih območij. Štirikopter velja za večino ljudi – tako kot številni drugi kompleksni tehnični izdelki – kot »črna škatla«. Z izrazom črna škatla v tehniškem žargonskem izrazu poimenujemo sistem oz. predmet, katerega notranje zgradbe in delovanja ne poznamo ali nas ne zanima; o škatli vemo predvsem to, kakšen vhod zahteva in kakšen izhod dobimo.

Za raziskavo sva se odločila, ker naju kot dijaka elektrotehniške šole zanima, kaj je v tej »črni škatli« ter kako jo izdelati. Odločila sva se narediti svoj štirikopter iz čim osnovnejših delov. Takšna raziskava je lahko zelo učinkovita najprej za najino učenje o štirikopterjih nasploh. Konkretna izdelava svojega štirikopterja nama omogoča, da hipoteze, ki sva si jih zastavila, v praksi ovrževa ali potrdiva.

### 2.2 Hipoteze

Ob začetku raziskovanja sva si postavila različne hipoteze:

- Štirikopter na daljinsko vodenje je mogoče narediti doma.
- Doma izdelan štirikopter je lahko cenejši od kupljenega (industrijsko izdelanega).
- Dijak srednje elektrotehniške šole ob podatkih, ki so dostopni na spletu, lahko pridobi dovolj znanja za samostojno domačo izdelavo štirikopterja.
- Lesena vezana plošča debeline 8 mm je za ogrodje štirikopterja dovolj trpežna.
- Baterija s kapaciteto 27,72 Wh zadostuje za 20 minut neprestanega letenja.

### 2.3 Opis raziskovalnih metod

- Branje literature
- Laboratorijsko in terensko eksperimentiranje
- Analiza dobljenih podatkov

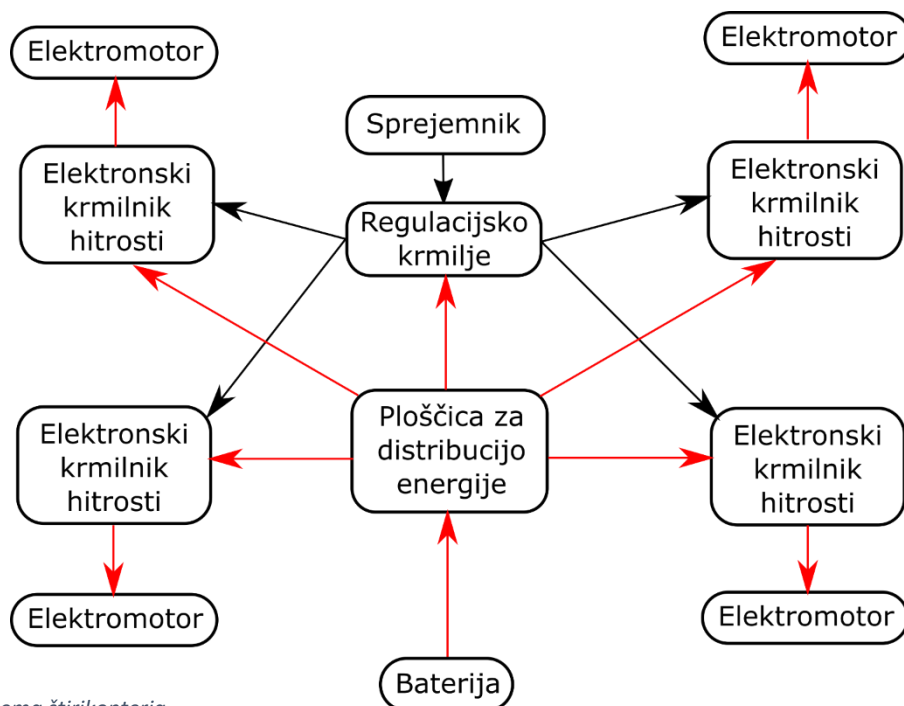
### 3. Opis delovanja naprave

Ob pogledu v »črno škatlo« štirikopterja, naletimo najprej na osnovne sestavne dele naprave. Te v nadaljevanju naštejemo in opisujemo s kratkim opisom. Dodajava tudi angleške kratice. Poleg sestavnih delov so pomembne njihove medsebojne povezave in programska koda.

Za najin štirikopter sva najprej izdelala oz. izbrala osnovne dele, jih med seboj povezala, in napravo sprogramirala.

#### 3.1 Sestavni deli štirikopterja

- Regulacijsko krmilje (ang. flight controller, kratica FC)
  - Senzor za merjenje vztrajnosti (ang. Inertial measurement unit, kratica IMU)
- Baterija
- Ploščica za distribucijo energije (ang. Power distribution board, kratica PDB)
- Brezkrtačni (BLDC) elektromotorji
- Propelerji
- Elektronski krmilnik hitrosti (ang. Electronic speed controller, kratica ESC)
- Ogrodje
- Sprejemnik in daljinec (ang. Receiver and Transmitter, kratici RX & TX)



Slika 1: Blok shema štirikopterja

### 3.1.1 Regulacijsko krmilje – Flight controller

Regulacijsko krmilje so »možgani« štirikopterja. Njegovo delo je branje podatkov iz senzorjev in sprejemnika, preračunavanje teh podatkov in pošiljanje preračunanih podatkov elektronskim krmilnikom hitrosti, ki glede na podatke nastavijo moč motorjev. Običajno je sestavljeno iz tiskanega vezja, mikrokrmilnika, senzorjev in priključkov. Podatke iz senzorjev preračunava tako, da ves čas nadzoruje ravnovesje štirikopterja in se ta ne prevrne, ampak leti stabilno in daljinsko vodljivo. Pomembno je, da je mikrokrmilnik zmožen dovolj hitrega preračunavanja podatkov ter je zmožen komunicirati s senzorji.

#### 3.1.1.1 Senzor za merjenje vztrajnosti – Inertial measurement unit

Senzor za merjenje vztrajnosti zaznava linearne pospeške s pospeškometrom in kotno hitrost z žiroskopom (lahko je dodan tudi kompas), za vsako os (x, y in z). Običajno se za majhna plovila uporabljajo mikroelektromehanski senzorji. Te odlikujejo nizka cena, učinkovitost in majhnost.

Za letenje štirikopterja je obvezen le žiroskop. Če pa želimo, da se štirikopter stabilizira tudi brez pomoči voznika, je potreben tudi pospeškometer. Kombinacija pospeškometra in žiroskopa omogoča, da izračunamo naklon štirikopterja v vsakem trenutku. Podatek o naklonu preračunava mikrokrmilnik s pomočjo PID algoritma v takšne vrednosti, ki jih razume, in lahko uporabi elektronski krmilnik hitrosti. Senzor z regulacijskim krmilnikom običajno komunicira preko I<sup>2</sup>C ali SPI protokola. Pri protokolu gre za set pravil o delovanju neke komunikacije.

### 3.1.2 Baterija

Baterija je elektronska komponenta, ki v sebi hrani električno energijo. Štirikopter za letenje porablja energijo iz baterije.

Za štirikopter ne velja vsak tip baterije. Pomembne karakteristike, ki jih mora baterija imeti, so:

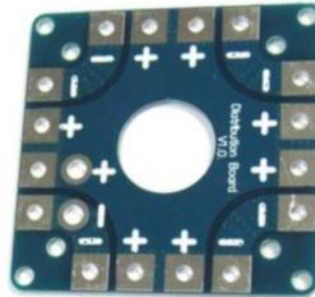
- veliko shranjene energije v majhnem volumnu,
- veliko shranjene energije na majhno maso,
- velik izhodni električni tok >90A,
- napetost 11V - 15V,
- biti mora polnilna.

Tip baterije, ki ustreza zgoraj zapisanim karakteristikam in je splošno dostopna, je litij-polimerska (LiPo) baterija. Napetost teh baterij je odvisna od števila zaporedno vezanih celic v njej. To število označimo s črko S. Štiri celice bi imele oznako 4S. Napetost posamezne celice je 4,2V, torej ima 3S baterija nazivno napetost  $3 * 4,2V = 12,6V$ . Na bateriji je vedno tudi označena energija (Wh) ali naboj shranjen v celici baterije (mAh). Maksimalni izhodni električni toka je označen s številko in črko C. Številka nam pove mnogokratnik naboja shranjenega v celici (v amperih), ki je maksimalen izhodni tok baterije. Baterija z oznako 2000 mAh 80 C ima maksimalen izhodni tok  $2000 \text{ mAh} * 80 \text{ C} = 160000 \text{ mA} = 160 \text{ A}$ .



### 3.1.3 Ploščica za distribucijo energije – Power distribution board

Ploščica za distribucijo energije je vmesnik med baterijo in vsemi ostalimi sestavnimi deli štirikopterja. Običajno je sestavljena iz tiskanega vezja, na katerega so povezani priključki za baterijo in ostale komponente, predvsem elektronski krmilniki hitrost in regulacijsko krmilje. Pogosto so na teh ploščicah tudi regulatorji napetosti.



Slika 2: Ploščica za distribucijo energije

### 3.1.4 Brezkrtačni (BLDC) elektromotorji

Elektromotor na štirikopterju ima nalogo, da vrtil propelerje, in z njihovim vrtenjem ustvarja vzgon za letenje. Elektromotor za štirikopter mora ustrezati določenim standardom, kot so:

- dovolj velika moč,
- učinkovitost,
- čim manjša prostornina,
- neprekinjeno delovanje dalj časa,
- dovolj velika hitrost in navor.

Tip motorja, ki najbolje ustreza tem standardom, je brezkrtačni motor. Ti motorji nimajo krtačk, zato se vrtenje rotorja opravlja elektronsko, kar poveča njihovo ceno. Imajo velike moči za njihove majhne prostornine (300 W / 1dcl), dosegajo visoke obrate (30000 RPM) in so precej učinkoviti (>90 %). Njihove slabosti pa so cena in obvezna elektronika oz. elektronski krmilnik hitrosti.

Vsak motor ima specifično hitrost. Pri motorjih namenjenih štirikopterjem se specifična hitrost meri v KV. To je enota, ki nam pove koliko obratov ima neobremenjen motor pri enem voltu napetosti. Večja kot je specifična hitrost obračanja motorja, manjši navor ima. Navor je pomemben pri izbiri propelerja. Običajno izberemo za manjše štirikopterje motorje z večjimi obrati, saj so uparjeni z manjšimi propelerji in obratno.

Da ne pride do neželenega vrtenja štirikopterja med letenjem, se morajo sosednji motorji vrteti v nasprotni smeri.



Slika 3: Brezkrtačni motor

### 3.1.5 Propelerji

Propelerji so naprave, ki silo vrtenja spreminjajo v silo vzgona. Ko se pogovarjamo o propelerjih, običajno govorimo o njihovih petih lastnostih. Te so:

- število njihovih kril,
- dolžina kril,
- naklon kril,
- dizajn,
- material.

Število kril in njihova dolžina sta lastnosti, ki določata razmerje med odzivnostjo štirikopterja in ustvarjenim vzgonom. Dodajanje kril ima enak efekt kot večanje propelerja.

Naklon krila moramo izbrati skupaj z motorjem, saj je od naklona kril odvisna hitrost vrtenja motorja. Večji kot je naklon, večji navor je potreben za obračanje. Temu sledi izbira motorja z nižjimi specifičnimi obrati.

Od dizajna propelerja je odvisna njegova učinkovitost, od materiala pa njegova trpežnost.

### 3.1.6 Elektronski krmilnik hitrost – Electronic speed controller

Elektronski krmilnik hitrosti je vmesnik med regulacijskim krmiljem in elektromotorji. Enosmeren, enofazen tok iz baterije pretvori v izmeničnega trifaznega. Hitrost motorja nastavlja tako, da s pulzno širinsko modulacijo spreminja povprečno napetost na motorju.

Sestavljeni so iz treh polmostičev. Polmostič je sestavljen iz dveh N-kanalnih MOS-FET tranzistorjev. V sredino vsakega polmostiča je priklopljena ena faza motorja. Tranzistorje krmili vgrajen mikrokrmilnik. Elektronski krmilnik hitrosti vrti brezkrtačni motor v šestih korakih. Hkrati mora elektronski krmilnik meriti povratno električno napetost na tuljavah motorja, da ve, kdaj mora začeti z novim korakom.

Elektronski krmilnik hitrosti in regulacijsko krmilje komunicirata med sabo s standardnim PWM protokolom, kjer dolžina signalnega pulza pomeni moč motorja (1 us = 0 %, 2 us = 100 %). Za njuno medsebojno komunikacijo obstajajo tudi novejši protokoli, kot so Dshot, Multishot in Oneshot.

### 3.1.7 Ogrodje

Ogrodje je del štirikopterja, na katerega so pritrjeni vsi ostali sestavni deli. Dobro ogrodje je lahko, trdno in trpežno. Najpopularnejši material za ogrodje so ogljikova vlakna, prav zaradi trpežnosti in teže. Pomembno je tudi, da je ogrodje aerodinamično, saj tako nanj deluje manjši zračni upor.



Slika 4: Pogosto ogrodje za štirikopter

### 3.1.8 Sprejemnik in daljinec

Sprejemnik je komponenta, ki preko radijske povezave sprejema podatke iz daljinca in jih pošilja regulacijskemu krmilju. Sprejemnik je običajno sestavljen iz mikrokrmilnika, sprejemniškega čipa ter visokofrekvenčnega ojačevalnika.

Kupljen sprejemnik običajno z regulacijskim krmiljem komunicira z PWM protokolom, kjer dolžina pulza pomeni pozicijo stikala ali krmilne palice. Sprejemnik običajno sprejema 2,4 GHz radijske valove, ki jih pošilja daljinec. Dober daljinec in sprejemnik lahko brezžično komunicirata na razdalji vsaj nekaj kilometrov. Pri kakovosti sprejemnika je pomembnem tudi zamik signala, to je čas med pritiskom na gumb daljinca in sprejemom signala. Želen zamik je čim manjši.



Slika 5: Daljinec in sprejemnik na voljo v trgovini

## 3.2 Izbira in izdelava komponent

Dele za štirikopter sva – v kolikor je bilo to le mogoče – izdelala sama. Kupila sva le tiste, ki jih je zaradi neekonomičnosti ali kompleksnosti nujno kupiti.

### 3.2.1 Regulacijsko krmilje – Flight controller

Regulacijsko krmilje je najkompleksnejši del štirikopterja. Odločila sva se, da ga izdelava sama.

Tiskano vezje, na katerem so elektronske komponente pritrjene in povezane med sabo, sva najprej izrisala s pomočjo odprtokodnega programa KiCad. Da sva zmanjšala ceno izdelave in velikost vezja, sva regulacijsko krmilje združila s sprejemnikom. To pomeni, da si s sprejemnikom delita določene komponente, kot so regulatorja napetosti, kondenzatorji za odpravljanje šuma in mikrokrmilnik. Mikrokrmilnik tako skrbi za sprejem podatkov daljinca in hkrati preračunava podatke iz senzorjev ter jih prilagodi za elektronsko krmilje hitrosti.

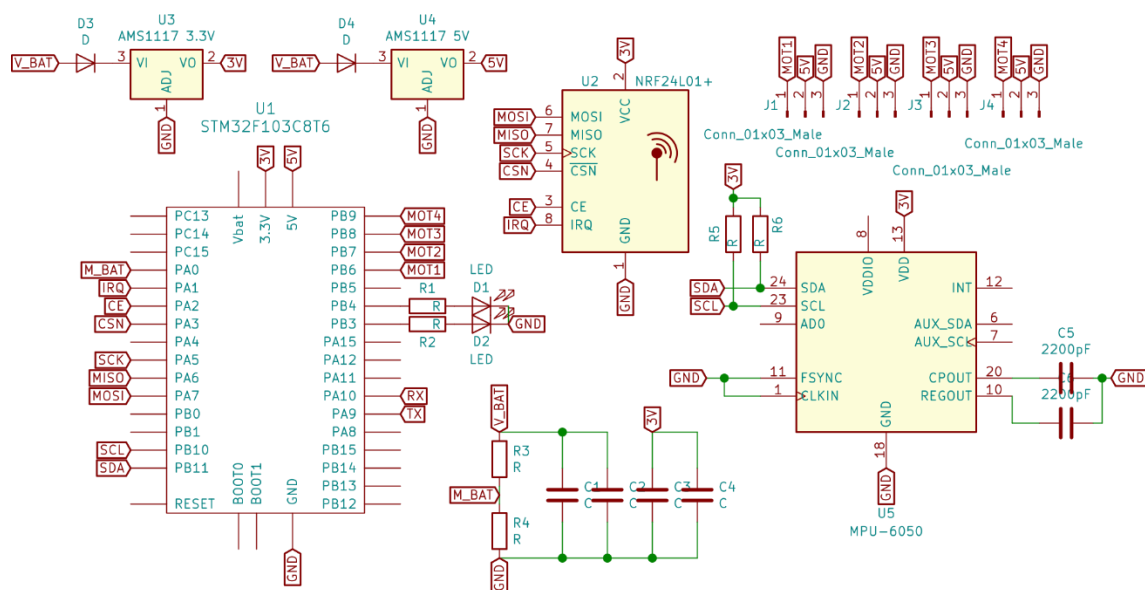
Mikrokrmilnik, ki sva se ga odločila uporabiti, je znamke ST in sicer model STM32F103C8T6. To je mikrokrmilnik, katerega že dobro pozna in ima dovolj veliko procesno moč za preračunavanje in upravljanje sprejema naenkrat.

Osnovne lastnosti tega krmilnika so:

- 32 bitna ARM arhitektura,
- izvajanje ukazov z frekvenco 72 MHz,
- 128 KB flash spomina,
- 20 KB delovnega SRAM spomina,
- 9 strojno implementiranih komunikacijskih protokolov (I<sup>2</sup>C, SPI, UART...),
- 7 časovnikov,
- 2 x 12 bitni analogno digitalni pretvornik razdeljen na 16 kanalov.

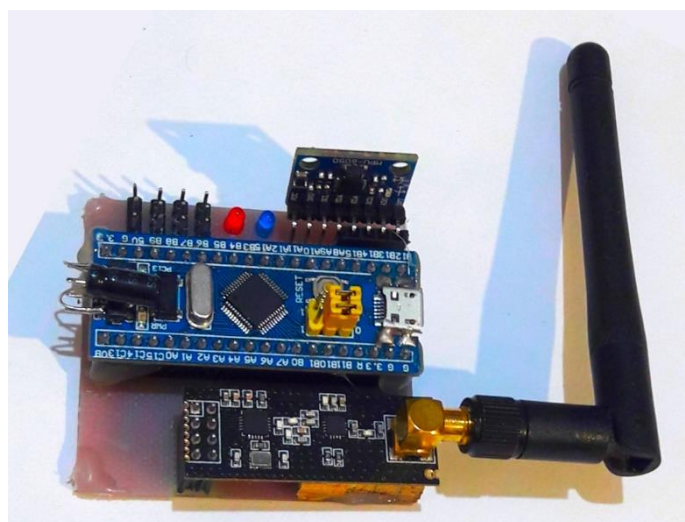
Za sprejemnik sva se odločila uporabiti sprejemno-oddajniški čip nRF24L01+. Kupila sva ga v kompletu z VF ojačevalnikom in priključkom za anteno. Sprejemno-oddajniški čip z mikrokrmilnikom komunicira preko SPI protokola.

Senzor vztrajnosti, ki sva ga uporabila, je čip MPU 6050. Senzor meri kotno hitrost in pospeške v vseh treh oseh, nima pa vgrajenega kompasa. Izbrala sva ga zaradi dostopnosti in nizke cene. Senzor z mikrokrmilnikom komunicira preko I<sup>2</sup>C protokola.



Slika 6: Shema vezja regulacijskega krmilja

Izrisano vezje sva izdelala s pomočjo CNC rezkalnika. Nanj sva prispajkala vse elektronske komponente, potrebne za pravilno delujoče vezje.



Slika 7: Izdelano regulacijsko krmilje

### 3.2.2 Baterija

Narediti doma litij-polimerno baterijo je zahtevno in zaradi kemikalij tudi nevarno. Tudi sicer se domača izdelava baterije ne izplača, ker je cena doma narejene baterije vedno večja od kupljene. Baterijo sva zato kupila.

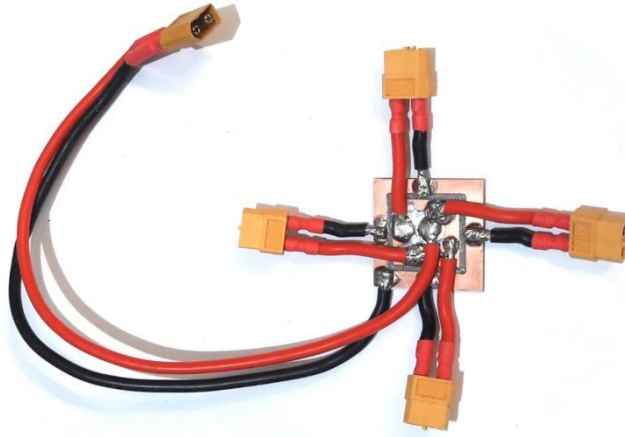
Baterijo, ki se nama je zdela primerna, sva kupila preko spleta. Oznake na bateriji so 3 S, 2200 mAh, 50 C. To pomeni kapaciteto baterije 27,72 Wh pri napetost 12,6 V ter maksimalen izhodni tok 110 A.

Na baterijo sva prispajkala XT60 priključek, preko katerega bo priključena na ploščo za distribucijo energije.

Za polnjenje baterije sva kupila še polnilec.

### 3.2.3 Ploščica za distribucijo energije

Ploščico za distribucijo električne energije sva izdelala iz pobakrene ploščice, na katero sva prispajkala priključke za baterijo in vse ostale komponente štirikopterja, ki za delovanje potrebujejo električno energijo. Odločila sva se za uporabo XT60 priključkov, ker so, ko govorimo o štirikopterjih, poznani kot standard.



Slika 8: Izdelana ploščica za distribucijo energije

### 3.2.4 Motorji

Motorje sva kupila preko spleta skupaj z elektronskimi krmilniki hitrosti. Izbrala sva 280 W 2200 KV motorje velikosti 30 mm (v višino)  $\times$  27,5 mm premera. Masa posameznega motorja je 48 g. Učinkovitost motorjev je približno 80 %. To pomeni, da je teoretična hitrost obračanja motorja brez propelerjev  $2200 \text{ KV} * 12,6 \text{ V} = 27720$  obratov/min. Izбира teh motorjev je neposredno vplivala na izbiro propelerjev.

Omenjene motorje sva izbrala, ker so bili cenovno ugodni ter pravšnje velikosti.



Slika 9: Brezkrtačni elektromotor z nosilcem za montažo in nosilcem za propeler

### 3.2.5 Propelerji

Propelerji so komponenta, ki je glede na specifikacije močno povezana z motorjem. Za štirikopter sva kupila motorje z relativno visokimi obrati, kar pomeni s posledično nižjim navorom. Zato sva kupila propelerje velikosti 5 col, s tremi krili. In sicer po dva kompleta propelerjev in še nekaj drugačnih za rezervo. To je bilo potrebno, ker so za pravilno izdelavo štirikopterja potrebni propelerji, ki imajo smeri vrtenja eni v smeri urinega kazalca, drugi pa v obratni smeri. Narejeni so iz polikarbonata. Propelerji iz tega materiala se ob udarcih odkrušijo, kar sva opazila tudi v praksi. Zato je bila nabava rezervnih propelerjev dobra izbira.

Kombinacija najinih štirih motorjev in propelerjev proizvede okoli 32 N vzgona. To pomeni, da je nosilnost štirikopterja skupaj z lastno maso 3,2 kg. Masa štirikopterja znaša 980 g, torej lahko štirikopter dvigne utež mase približno 2,3 kg.



Slika 10: Izbira propelerjev

### 3.2.6 Elektronski krmilniki hitrost

Odločila sva se, da bova tudi elektronski krmilnik hitrosti izdelala sama. Po prebiranju večjega števila člankov in tehnične dokumentacije, sva razumela princip njegovega delovanja. Komponente, potrebne za izdelavo elektronskega krmilnika hitrosti, sva že imela doma, kar nama je prihranilo veliko časa.

Osrednji del elektronskega krmilnika hitrosti je trojni polmostič, sestavljen iz N kanalnih MOS-FET tranzistorjev. Tranzistorji, ki sva jih imela doma, so bili znamke ST tipa P75NF75. Kot prototip sva krmilje najprej izdelala na prototipnih ploščicah. Ob priključitvi motorja se je ta začel uspešno vrteti.

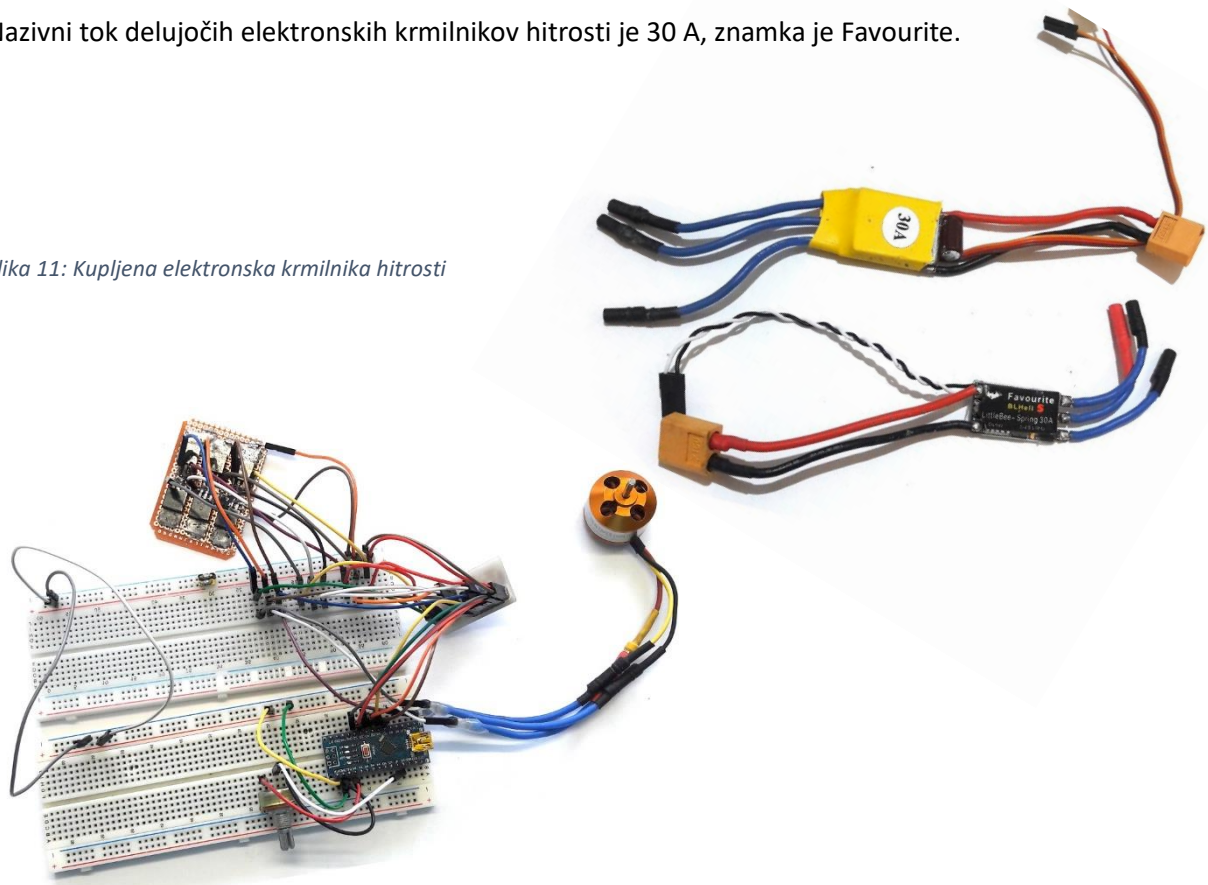
Opazila pa sva, da se tranzistorji prekomerno segrevajo in da motor nima dovolj velikega navora za uspešen dvig mase štirikopterja. Ob analiziranju vezja sva ugotovila, da v njem ni napak. Težava je bila v izbiri tranzistorjev. Ti so imeli preveliko upornost, v primerjavi s tuljavami motorja. Posledica tega je bila izguba energije v obliki toplote v tranzistorjih in manjša delovna moč motorja.

Med analiziranjem sva se odločila, da bova elektronske krmilnike hitrosti raje kupila ter prihranjen čas vložila v programiranje regulacijskega krmilja.

Kupila sva dva različna tipa elektronskih krmilnikov hitrosti. Oba sta imela zelo podobne nazivne karakteristike, razlikovala pa sta se v ceni (2 € - 5 €). Ko sva izdelovala štirikopter, sva nameravala najprej preizkusiti cenejše krmilnike hitrosti. Vendar ti testiranja niso zdržali. Razlog temu so bile najverjetneje lažno navedene maksimalne vrednosti za električni tok in moč. Ob večjih obremenitvah so cenejši krmilniki hitrosti pregoreli eden za drugim. Zatem sva cenejše krmilnike zamenjala z malo dražjimi, ti so delovali brezhibno.

Nazivni tok delujočih elektronskih krmilnikov hitrosti je 30 A, znamka je Favourite.

Slika 11: Kupljena elektronska krmilnika hitrosti



Slika 12: Izdelan prototip elektronskega krmilja hitrosti



### 3.2.7 Ogrodje

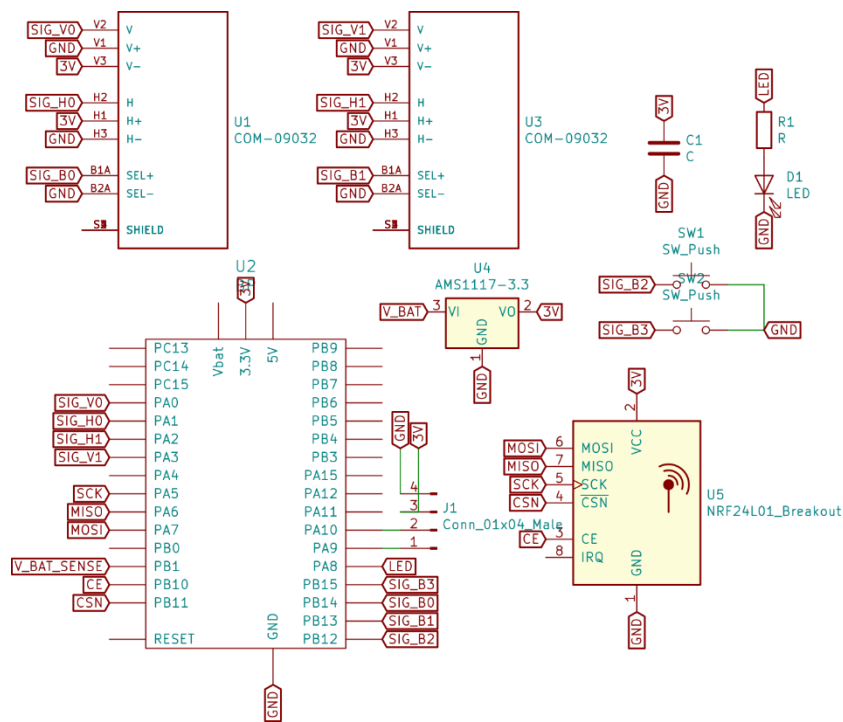
Ogrodje sva naredila iz lesa – vezane plošče. Za les sva se odločila predvsem zaradi cene in dostopnosti ter enostavnosti obdelave. Dizajn ogrodja sva zmodelirala v programu Blender in ga izrezala iz 8 mm debele smrekove vezane plošče s pomočjo CNC rezkalnika. Noge štirikopterja sva izdelala s 3D tiskalnikom ter jih privijala na vezano ploščo. Za pritrnitev ostalih komponent sva uporabila vezice in vroče lepilo. Smrekov les se je izkazal za premalo trpežnega, zato sva morala ogrodje narediti še enkrat. Tokrat sva uporabila bukov les.



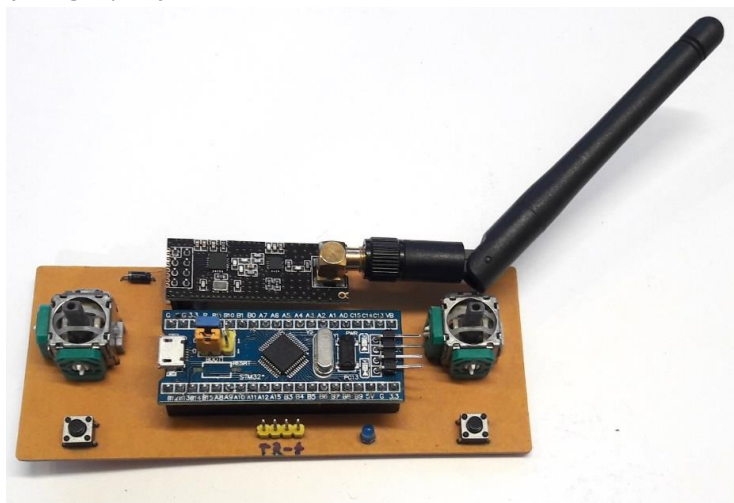
*Slika 13: Izdelano ogrodje štirikopterja s pritrjenimi elektromotorji*

### 3.2.8 Daljinski upravljalnik

Daljinski upravljalnik sva izdelala sama. Zanj sva uporabila enak sprejemno-oddajniški čip kot na regulacijskem krmilju štirikopterja. Mikrokrmilnik, ki je osnovni del daljinskega upravljalnika, je enak tistemu, ki je osnova regulacijskega krmilja. Vhodne enote daljinskega upravljalnika so štiri tipke in dve krmilni palici. Mikrokrmilnik upravlja pritiske tip ter premike krmilnih palic. Gibanje krmilnih palic je merjeno na osi x, y in z. Eno krmilno palico sva namenila nastavljanju hitrosti motorjev (posledično višine štirikopterja) in obračanju štirikopterja po z osi. Drugo krmilno palico sva namenila premikanju štirikopterja naprej, nazaj, levo in desno. Te premike dosežemo tako, da regulacijskemu krmilju sporočimo, v katero smer naj se štirikopter nagne. To naredi tako, da poveča oz. zmanjša moč določenih motorjev. Tipke sva uporabila za vklop motorjev in kot varnostno stikalo. Ob pritisku na varnostno stikalo se štirikopter – ne glede na vse druge ukaze – izklopi. Vse komponente sva prispajkala na tiskano vezje, ki sva ga izrisala v programu KiCad ter izdelala s CNC rezkalnikom.



Slika 14: Shema vezja daljinskega upravljalnika



Slika 15: Izdelan daljinski upravljalnik

## 3.3 Programska koda

### 3.3.1 Programska koda regulacijskega krmilja

Programsko kodo regulacijskega krmilja sva razdelila na več delov. Tako sva kodo organizirala in jo naredila lažje berljivo. Kodo sva pisala v razvojnem orodju Arduino, s pomočjo katerega sva potem program prenesla na mikrokrmilnik regulacijskega krmilja. Programski jezik je C++.

#### 3.3.1.1 Branje podatkov iz senzorja vztrajnosti

V dokumentaciji senzorja vztrajnosti (MPU 6050) so napisani vsi potrebni podatki za komunikacijo s čipom. Ta uporablja protokol I<sup>2</sup>C. Opisan je tudi postopek inicializacije in branja podatkov s čipa. Mikrokrmilnik mora najprej preko I<sup>2</sup>C protokola poslati čipu željeno vrednost, ki jo potrebuje ali želi nastaviti. Čip preko istega protokola odgovori z želeno informacijo po 1 bajt naenkrat. Za branje vseh informacij (14 bajtov) mora mikrokrmilnik zadnji korak ponoviti 14-krat. Koda prebrane podatke sprotno kalibrira.

Objekt Wire2 je uporabljen za I<sup>2</sup>C komunikacijo.

```
void writeGyroRegister (char reg, char data)
{
  Wire2.beginTransmission(GYRO_ADDRESS);
  Wire2.write(reg);
  Wire2.write(data);
  Wire2.endTransmission();
}

void gyroInit ()
{
  writeGyroRegister(REG_PWR_MGMT_1, 0x00);
  writeGyroRegister(REG_GYRO_CONFIG, 0x08); //FS_SEL
  writeGyroRegister(REG_ACCEL_CONFIG, 0x10); //AFS_SEL
  writeGyroRegister(REG_CONFIG, 0x03); //LOW PASS FILTER (DLPF_CFG)
}
```

Slika 16: Programska koda za inicializacijo senzorja vztrajnosti

```
void readGyroData ()
{
  Wire2.beginTransmission(GYRO_ADDRESS);
  Wire2.write(0x3B);
  Wire2.endTransmission();

  Wire2.requestFrom(GYRO_ADDRESS, 14);

  gyro_acc[0] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_acc[1] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_acc[2] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();

  gyro_temp = (((short)(Wire2.read() << 8 | Wire2.read())) / 340.0) + 36.53;

  gyro_omega[0] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_omega[1] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();
  gyro_omega[2] = Wire2.read() << 8 | Wire2.read();

  gyro_acc[Z_INDEX] *= Z_ACC_INVERT;
  gyro_acc[X_INDEX] *= X_ACC_INVERT;
  gyro_acc[Y_INDEX] *= Y_ACC_INVERT;

  gyro_omega[X_INDEX] *= X_OMEGA_INVERT;
  gyro_omega[Y_INDEX] *= Y_OMEGA_INVERT;
  gyro_omega[Z_INDEX] *= Z_OMEGA_INVERT;

  gyro_omega[0] -= gyro_omega_calibration[0];
  gyro_omega[1] -= gyro_omega_calibration[1];
  gyro_omega[2] -= gyro_omega_calibration[2];

  gyro_acc[0] -= gyro_acc_calibration[0];
  gyro_acc[1] -= gyro_acc_calibration[1];
  gyro_acc[2] -= gyro_acc_calibration[2];
}
```

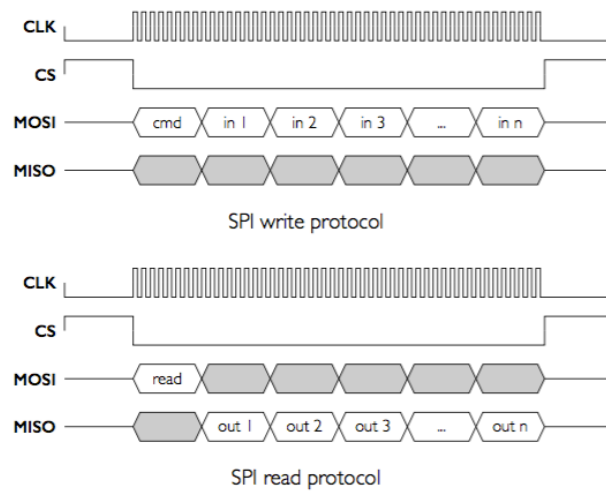
Slika 17: Programska koda za branje in kalibracijo podatkov s senzorjev

### 3.3.1.2 Komunikacija s sprejemno-oddajniškim čipom

Ker je komunikacija s sprejemno-oddajniškim čipom (nrf24l01+) precej kompleksna, sva se odločila za izdelavo svoje knjižnice.

Ta del nama je pri izdelavi štirikopterja predstavljal največji izziv. Naletela sva na težavo. V dokumentaciji čipa je opisana komunikacija s čipom, ter tudi postopek njegove inicializacije, ampak kljub upoštevanju navodil, se čip ni zeleno odzival. Po več kot štirih različicah programa in več kot 15 urah programiranja, je najina knjižnica naposled začela delovati. Knjižnica vsebuje preko 350 vrstic programske kode, ki je potrebna za uspešno radijsko komunikacijo z daljinskim upravljalnikom.

Komunikacija mikrokrmilnika s čipom poteka preko SPI protokola.

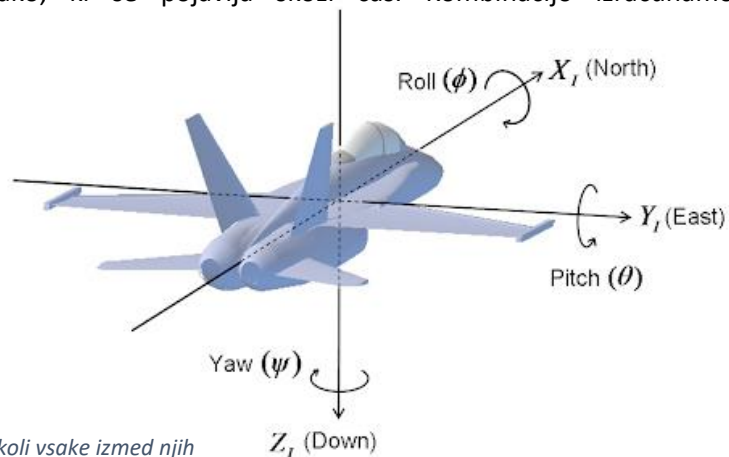


Slika 18: Prikaz SPI protokola

### 3.3.1.3 Preračunavanje podatkov

Zaradi specifičnih lastnosti delovanja žiroskopa in pospeškometra je za dobro stabilizacijo potrebna kombinacija obeh.

Po branju podatkov s senzorja vztrajnosti, je potrebno vrednosti žiroskopa pretvoriti v stopinje. Ker imava žiroskop nastavljen na občutljivost  $500^\circ/\text{s}$  ( $\text{FS\_SEL}=1$ ), je potrebno prebrano vrednost deliti s 65,5. Da sva odpravila šum žiroskopa, ki se pojavlja zaradi tresljajev, sva uporabila komplementarni filter. Dobljena vrednost je zadostna za enostavno stabilizacijo štirikopterja. Za bolj učinkovito stabilizacijo, ki deluje tudi brez pomoči voznika (ang. Auto level), pa je potrebno v vsakem trenutku izračunati naklon žiroskopa. To dosežemo tako, da integriramo kotno hitrost skozi čas. Dobljena vrednost je kot v stopinjah. Ker pa ta način uporablja relativne vrednosti, se sčasoma pojavi napaka, ki se vedno večja. Da bi stabilizacija delovala tudi po daljšem času, je potrebno uporabiti način, s katerim lahko izračunamo absolutni naklon štirikopterja. To lahko naredimo z uporabo pospeškometra. Ker gravitacijski pospešek vedno kaže naravnost proti tlam, lahko naklon štirikopterja izračunamo s pospeškometrom s pomočjo kotnih funkcij. Ampak, ker je pospeškometer zelo občutljiv na tresljaje, sva uporabila kombinacijo pospeškometra in žiroskopa. Žiroskop ima vlogo zaznavanja večjih kotov, pospeškometer pa odpravlja napako, ki se pojavlja skozi čas. Kombinacijo izračunamo s komplementarnim filtrom.



Slika 19: Prikaz osi in poimenovanja vrtenja okoli vsake izmed njih

```
readGyroData();

gyro_roll_input = (gyro_roll_input * 0.7) + (((float)gyro_omega[ROLL_INDEX] / 65.5) * 0.3);
gyro_pitch_input = (gyro_pitch_input * 0.7) + (((float)gyro_omega[PITCH_INDEX] / 65.5) * 0.3);
gyro_yaw_input = (gyro_yaw_input * 0.7) + (((float)gyro_omega[YAW_INDEX] / 65.5) * 0.3);

//0.0000611 = 1 / (250Hz / 65.5)
angle_pitch += (float)gyro_omega[PITCH_INDEX] * 0.0000611;
angle_roll += (float)gyro_omega[ROLL_INDEX] * 0.0000611;

//0.00001066 = 0.0000611 * (3.142(PI) / 180degr) rad -> deg
angle_pitch -= angle_roll * sin((float)gyro_omega[YAW_INDEX] * 0.00001066);
angle_roll += angle_pitch * sin((float)gyro_omega[YAW_INDEX] * 0.00001066);

float angle_pitch_acc = -atan2(gyro_acc[X_INDEX], gyro_acc[Z_INDEX]) * (180/3.14); //in deg
float angle_roll_acc = atan2(gyro_acc[Y_INDEX], gyro_acc[Z_INDEX]) * (180/3.14);

angle_pitch = angle_pitch * 0.9993 + angle_pitch_acc * 0.0007;
angle_roll = angle_roll * 0.9993 + angle_roll_acc * 0.0007;

pitch_level_adjust = angle_pitch * 5; //Autolevel correction
roll_level_adjust = angle_roll * 5;
```

Branje podatkov z žiroskopa

Komplementarni filter kotne hitrosti

Integracija kotne hitrosti

Popravek kota ob rotaciji okoli z osi

Izračun kota s pospeškometrom

Kombinacija s komplementarnim filtrom

Nastavitev vrednosti za Auto level stabilizacijo

Slika 20: Programska koda za preračunavanje podatkov

### 3.3.1.4 Algoritem za PID regulacijo

Za stabilizacijo štirikopterja je potrebna neke vrste regulacija. To je zaprta zanka, ki glede na vhod s senzorjev izračuna izhod za motorje. Odločila sva se za implementacijo regulacije PID. To je ena izmed najpogostejših vrst, ki deluje učinkovito za nelinearne procese. Vrednosti kP, kI in kD sva nastavila ročno z eksperimentiranjem. Omejila sva vrednost I, da ne prihaja do nasičenja I regulatorja. Prav tako sva omejila izhodno vrednost tako, da ne pride do nenormalnih popravkov, ki bi lahko privedli do strmoglavljenja štirikopterja.

```
float error = gyro_roll_input - pid_rol_setpoint;
pid_roll_i = pid_roll_ki * error;
pid_roll_i = clamp(pid_roll_i, -pid_i_roll_max, pid_i_roll_max);

pid_roll_output = (pid_roll_kp * error) + (pid_roll_ki * pid_roll_i) + (pid_roll_kd * (error - last_roll_error));
pid_roll_output = clamp(pid_roll_output, -max_roll_output, max_roll_output);

last_roll_error = error;
```

Slika 21: Implementacija PID regulacije po eni osi

### 3.3.1.5 Nastavitev izhodov za motorje

Regulacijsko krmilje pošlje signal, ki vsebuje želeno moč motorja, preko PWM (pulzno širinske modulacije). Ta signal mikrokrmilnik generira s pomočjo časovnika. Časovnik sva nastavila tako, da šteje do 5000. Ko prešteje do 5000, sproži prekinitev in nastavi števec nazaj na 0. Prekinitev preklopi stanje na pinu na 3,3 V (HIGH). Ko med štetjem števec pride do vrednosti, ki je nastavljena v CCR registru (določimo jo s pomočjo PID regulacije), sproži drugo prekinitev. Ta prekinitev preklopi stanje na pinu na 0V (LOW).

```
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;
```

Slika 22: Nastavitev časovnika

```
motor_signals[0] = rc_power + pid_roll_output - pid_pitch_output - pid_yaw_output;
motor_signals[1] = rc_power - pid_roll_output - pid_pitch_output + pid_yaw_output;
motor_signals[2] = rc_power - pid_roll_output + pid_pitch_output - pid_yaw_output;
motor_signals[3] = rc_power + pid_roll_output + pid_pitch_output + pid_yaw_output;
```

Slika 23, 23: Vstavljanje izhoda regulacije v časovnik

```
void setMotors ()
{
    TIMER4_BASE->CCR1 = motor_signals[0];
    TIMER4_BASE->CCR2 = motor_signals[1];
    TIMER4_BASE->CCR3 = motor_signals[2];
    TIMER4_BASE->CCR4 = motor_signals[3];
    TIMER4_BASE->CNT = 5000;
}
```

### 3.3.2 Programska koda daljinskega upravljalnika

Programska koda, potrebna za daljinski upravljalnik, je zelo podobna delu programske kode regulacijskega krmilja, ki je namenjena upravljanju sprejemno-oddajniškega čipa nrf24l01+. Uporabila sva najino knjižnico, ki sva jo napisala prav za ta namen. Predstavljena je v podpoglavju 3.3.1.2 Komunikacija s sprejemno-oddajniškim čipom. K tej kodi je dodan le del, ki bere podatke o poziciji krmilnih palic in gumbov ter te spravi v paket, pripravljen za pošiljanje sprejemniku.

```
char state3 = !digitalRead(button_pins[3]);

if(state3 != last_state[3])
{
    last_state[3] = state3;
    if(state3)
    {
        packet_data.armed = ~packet_data.armed;
        digitalWrite(PC13, !packet_data.armed);
        Serial.print("ARM state: ");
        Serial.println(packet_data.armed, BIN);
    }
}

char state2 = !digitalRead(button_pins[2]);
digitalWrite(PA8, state2);

if(state2)
{
    unsigned char power = map(4095-analogRead(joystick_pins[0]), 0, 4095, 0, 254);
    unsigned char roll = map(4095-analogRead(joystick_pins[3]), 0, 4095, 0, 254);
    unsigned char pitch = map(4095-analogRead(joystick_pins[2]), 0, 4095, 0, 254);
    unsigned char yaw = map(4095-analogRead(joystick_pins[1]), 0, 4095, 0, 254);

    packet_data.power = power;
    packet_data.roll = roll;
    packet_data.pitch = pitch;
    packet_data.yaw = yaw;
}
else
{
    packet_data.power = 0; //off
    packet_data.roll = 127; //neutral pos
    packet_data.pitch = 127;
    packet_data.yaw = 127;
}
}
```

Slika 24: Del programske kode za branje pozicije krmilnih palic in gumbov

## 4. Najin izdelek

Najin končni izdelek je delujoč štirikopter. V zraku se samodejno stabilizira, se odziva na ukaze daljinskega upravljalnika na razdalji tudi več kot 1 km. Zmore nositi tudi breme, kot je recimo kamera za snemanje iz zraka. Z njim sva opravila že veliko uspešnih poletov, na začetku pa tudi kakšnega manj uspešnega. Daljši poleti so bili prekinjeni le za čas polnjenja baterije.

Raziskovanje je bilo razdeljeno na več delov. Ti so bili: izobraževanje in izpopolnjevanje znanja za vsak sestavni del posebej, izbira in izdelava sestavnih delov, programiranje ter preizkušanje v praksi.

Imela sva finančne stroške z nabavo kupljenih sestavnih delov ter komponent za dele, ki sva jih naredila sama. Okvirni skupni strošek teh delov znaša okoli 60 €. Poleg tega pa so stroški nastali zaradi nedelujočih kupljenih delov in nakupa delov ter elementov za rezervo. Okvirna ocena teh stroškov znaša še 60 €. Od tega nama je ostalo dovolj delov za izdelavo še enega štirikopterja.

Pri raziskovanju nama je zagotovo pomagalo znanje, pridobljeno v srednji elektrotehniški šoli. Vendar to predstavlja le osnovo znanja, potrebnega za izdelavo štirikopterja. Potrebno je bilo mnogo ur študija različnih tehniških dokumentacij, člankov, poglobljanja v »logiko« letečih plovil ...

Čas, porabljen za raziskavo in izdelavo, sva ocenila na 270 ur.



Slika 25: Najin unikatni štirikopter



## 5. Razprava

Pred začetkom raziskovanja sva si zadala naslednje hipoteze:

- Štirikopter na daljinsko vodenje je mogoče narediti doma.

To hipotezo lahko potrdiva, saj štirikopter, ki sva ga izdelala doma, dobro deluje.

- Doma izdelan štirikopter je lahko cenejši od kupljenega (industrijsko izdelanega).

To hipotezo lahko delno potrdiva. Če v ceno vključiva le stroške uporabljenega materiala, hipoteza drži, saj najin štirikopter s ceno 60 € po zmogljivosti preseže vse štirikopterje na trgu z isto ceno. Ko pa v ceno vključimo tudi delo (okoli 270 ur), ta krepko preseže ceno kupljenega.

- Dijak srednje elektrotehniške šole ob podatkih, ki so dostopni na spletu, lahko pridobi dovolj znanja za samostojno domačo izdelavo štirikopterja.

Ta hipoteza je potrjena, saj sva vse podatke in napotke v zvezi s štirikopterjem pridobila s spleta. Večina podatkov je bila v obliki člankov in tehničnih dokumentacij, nekaj podatkov pa sva dobila tudi iz videoposnetkov.

- Lesena vezana plošča debeline 8 mm je za ogrodje štirikopterja dovolj trpežna.

To hipotezo lahko delno potrdiva. Da je lesena vezana plošča debeline 8 mm dovolj trpežna, mora biti narejena iz pravega lesa. Bukov les se je, za razliko od smrekovega, izkazal za dovolj trpežnega.

- Baterija s kapaciteto 27,72 Wh je dovolj za 20 minut letenja.

To hipotezo sva ovrgla. Ne glede na izbiro propelerjev in način letenja je bila energija 27,72 Wh premalo za 20 minut letenja. Dosegla sva lahko največ do 15 minut mirnega letenja, pri letenju s hitrimi pospeški in premiki pa se je čas letenja zmanjšal na 5 minut.

## 6. Zaključek

Z rezultati raziskave sva zadovoljna. Izdelala sva svoj unikatni štirikopter. Od petih hipotez sva dve potrdila, dve delno potrdila in eno ovrgla. Raziskava nama je poleg pridobljenega znanja in izkušenj prinesla tudi konkretno korist – izdelek. To nama je dalo dodatno motivacijo. Raziskava, ki sva jo opravila, daje podrobne informacije vsakomur, ki želi izdelati svoj unikatni štirikopter. »Črno škatlo« sva odprla in postopoma razkrila njeno vsebino.

Sedaj, ko je izdelek narejen in preizkušen v praksi, so se nama pokazale možnosti za nadaljnjo raziskavo oz. nadgradnjo. Možno bi bilo dodati senzor nadmorske višine, za samodejno stabilizacijo štirikopterja na določeni višini. Lahko bi dodala GPS funkcijo, ki bi ga zavarovala pred nenadzorovanimi premiki zaradi vetra na visoki višini.

Kljub velikemu številu ur vloženega dela je bila raziskava za naju vredna truda.

## 7. Viri

- <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (uporabljeno 23. 12. 2019)
- <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> (uporabljeno 2. 11. 2019)
- [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf) (uporabljeno 8. 2. 2020)
- [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf) (uporabljeno 23. 12. 2019)
- [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/2c/d9/a7/f8/43/48/48/64/DM00119036.pdf/files/DM00119036.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119036.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/2c/d9/a7/f8/43/48/48/64/DM00119036.pdf/files/DM00119036.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119036.pdf) (uporabljeno 29. 1. 2020)
- <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm8s003f3.pdf> (uporabljeno 24. 1. 2020)
- [https://www.horizonhobby.com/pdf/BLHA1006-Setup\\_Sheet-MULTI.pdf](https://www.horizonhobby.com/pdf/BLHA1006-Setup_Sheet-MULTI.pdf) (uporabljeno 24. 2. 2020)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_speed\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control) (uporabljeno 11. 1. 2020)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Quadcopter> (uporabljeno 28. 1. 2020)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Multicopter> (uporabljeno 18. 12. 2019)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless\\_DC\\_electric\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor) (uporabljeno 12. 12. 2019)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller> (uporabljeno 12. 12. 2019)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit) (uporabljeno 5. 11. 2019)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface) (uporabljeno 12. 11. 2019)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/I2C> (uporabljeno 12. 11. 2019)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation) (uporabljeno 7. 12. 2019)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems) (uporabljeno 2. 1. 2020)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial\\_measurement\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit) (uporabljeno 7. 2. 2020)
- <https://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture9.pdf> (uporabljeno 21. 1. 2020)
- <https://stanford.edu/class/ee267/lectures/lecture10.pdf> (uporabljeno 13. 12. 2019)
- <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multicopter-fpv-drone-propellers/> (uporabljeno 20. 1. 2020)
- <https://oscarliang.com/quadcopter-hardware-overview/> (uporabljeno 14. 2. 2020)
- <https://www.youtube.com/watch?v=CHSYgLfhwUo&t=2815s> (uporabljeno 7. 1. 2020)

## 7.1 Viri slik

- [https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1xQVfXBsmBKNjSZFsq6yXSVXaa/Blue-Glass-Fiber-RC-Multi-Tri-Copter-Power-Battery-ESC-Connection-Board-Distribution.jpg\\_q50.jpg](https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1xQVfXBsmBKNjSZFsq6yXSVXaa/Blue-Glass-Fiber-RC-Multi-Tri-Copter-Power-Battery-ESC-Connection-Board-Distribution.jpg_q50.jpg) (uporabljeno 15. 1. 2020)
- <https://nfpshop.com/wp-content/uploads/2018/11/DJI-DRONE-MOTOR-BRUSHLESS-DC-MOTOR-NFP-BL-2212-2.jpg> (uporabljeno 15. 12. 2019)
- [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61ykUUb1guL.\\_SL1200\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61ykUUb1guL._SL1200_.jpg) (uporabljeno 25. 12. 2019)
- [https://store.roboticsbd.com/1901-large\\_default/flysky-fs-ct6b-24ghz-6ch-transmitter-with-receiver-fs-r6b-robotics-bangladesh.jpg](https://store.roboticsbd.com/1901-large_default/flysky-fs-ct6b-24ghz-6ch-transmitter-with-receiver-fs-r6b-robotics-bangladesh.jpg) (uporabljeno 21. 11. 2019)
- <https://www.okdam.com/public/images/upload/product/thumb/brushless-quadcopter.gif> (uporabljeno 23. 11. 2019)
- <https://wiki.opsoro.be/images/opsoro-hat/spi-protocol.png> (uporabljeno 2. 11. 2019)
- <http://www.chrobotics.com/wp-content/uploads/2012/11/Inertial-Frame-1024x655.png> (uporabljeno 29. 1. 2020)
- osebni arhiv

## IZJAVA\*

Mentor **Gregor Kramer** v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljam, da je v raziskovalni nalogi z naslovom **Izdelava daljinsko vodenega štirikopterja**, katere avtorji so **Benjamin Lipnik, Gregor Mansutti**:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, 5. 6. 2020

žig šole

Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe



\*

### POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.