

Mestna občina Celje
Komisija Mladi za Celje



LETALNIK S POGLEDOM PRVE OSEBE (FPV DRON)

Raziskovalna naloga

Področje: elektrotehnika, elektronika

Mentor:

Davor ZUPANC, inž. elektronike

Avtor:

Anton Martin ŽOHAR

Celje, marec 2022

Kazalo

Zahvala	6
Povzetek	7
1 Uvod	8
1.1 Predstavitev raziskovalnega problema.....	8
1.2 Hipoteze	8
1.3 Raziskovalne metode.....	9
2 Opis FPV kompleta	10
2.1 Sestavni deli FPV kompleta	11
2.1.1 Daljinski upravljalnik – Tx	12
2.1.2 FPV Očala.....	14
2.1.3 Baterije	16
2.1.4 Polnilec	18
2.1.5 Akcijska kamera.....	20
2.1.6 Simulator	21
2.2 Sestava dronove strojne opreme	22
2.2.1 Krmilnik letenja – FC.....	23
2.2.2 Elektronski krmilnik hitrosti – ESC.....	27
2.2.3 Motorji.....	28
2.2.4 Propelerji	29
2.2.5 FPV kamera.....	29
2.2.6 Video oddajnik – vTx	31
2.2.7 Daljinski sprejemnik – Rx.....	33
2.2.8 Okvir	34
2.2.9 Dodatna strojna oprema	35
2.3 Programska oprema drona – firmware	37
2.3.1 Betaflight – Programska oprema krmilnika letenja (FC)	37
2.3.2 BlueJay – Programska oprema elektronskega krmilnika hitrosti (ESC)	38
3 Postopek izdelave naprave.....	39
3.1 Izdelava 3D tiskanega okvirja	39
3.2 Postopek sestave.....	40
3.2.1 Konfiguracija programske opreme.....	41
3.3 Testiranje in odpravljanje problemov	42
3.3.1 Prvo testiranje	42
3.3.2 Prvo odpravljanje problemov.....	43

3.3.3	Ponovno testiranje	44
3.3.4	Ponovno odpravljanje problemov	45
3.3.5	Končna izdelava	47
3.4	Testiranje okvirja iz ogljikovih vlaken	53
4	Razprava	54
5	Zaključek	56
6	Viri	57
6.1	Viri slik	58

Kazalo slik

Slika 1: Snemanje s FPV dronom	10
Slika 2: Nekatero komponente FPV kompleta.....	11
Slika 3: Vsebina mojega FPV kompleta.....	11
Slika 4: Shema kontrol daljinskega upravljalnika	12
Slika 5: Daljinski upravljalnik FS-i6 in sprejemnik FS-A8S	13
Slika 6: FPV analogna očala	14
Slika 7: FPV očala EV100	15
Slika 8: LiPo bateriji z 4 in 6 celicami	16
Slika 9: LiPo baterija	17
Slika 10: Polnjenje LiPo baterij	18
Slika 11: Polnilec Imax B6	19
Slika 12: Akcijska kamera na FPV dronu	20
Slika 13: Simulacija letenja v simulatorju	21
Slika 14: Vezalna shema FPV drona.....	22
Slika 15: Krmilnik letenja Holybro kakute F4 V2.3	23
Slika 16: Prikazovanje podatkov na zaslonu – OSD	24
Slika 17: Razlaga prikazanih podatkov na zaslonu – OSD	25
Slika 18: Mamba FC in ESC komplet	26
Slika 19: Elektronski krmilnik hitrosti	27
Slika 20: Brezkrtačni motorji: Racerstar 2300KV	28
Slika 21: FPV kamera na dronu.....	29
Slika 22: FPV kamera: Caddx Turbo EOS2.....	30
Slika 23: Tabela oddajanja video frekvenc	31
Slika 24: Video oddajnik	32
Slika 25: Daljinski sprejemnik	33
Slika 26: Daljinski sprejemnik FS-IA6B	33
Slika 27: 3D tiskan okvir.....	34
Slika 28: LED trakovi na dronu	35
Slika 29: GPS HGLRS M80PRO	36
Slika 30: Antena Foxer pagoda pro.....	36
Slika 31: Betaflight konfigurator.....	37
Slika 32: BlueJay kofigurator	38
Slika 33: 3D natisnjen okvir	39
Slika 34: Začetek izdelave	40
Slika 35: Konfiguracija programske opreme.....	41
Slika 36: Prvo testiranje.....	42
Slika 37: Odpravljanje problemov	43
Slika 38: Polomljen dron.....	44
Slika 39: Popravilo letalnika.....	45
Slika 40: Dron po padcu.....	46
Slika 41: Barvanje okvirja.....	47
Slika 42: Povezane komponente	47
Slika 43: Elektronske komponente na okvirju	48
Slika 44: Prikaz funkcij stikal in potenciometrov	49
Slika 45: Izdelan FPV dron med preizkusom.....	50
Slika 46: Letenje z FPV dronom	51

Slika 47: Frankolovo iz zraka	51
Slika 48: Doma izdelan FPV dron	52
Slika 49: Povezava do posnetka poleta	52
Slika 50: Doma izdelan FPV dron pred poletom	56

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju profesorju Davorju Zupancu za podporo pri raziskovalnem delu, pomoč pri odpravljanju raziskovalnih problemov in za omogočene dobre pogoje za raziskovanje. Hvaležen sem tudi dijakoma četrtega letnika Maticu in Žanu za dragoceno znanje, ki sta mi ga predala. Za stalno podporo in motiviranje pa se zahvaljujem svoji družini. Zahvaljujem se tudi profesorici slovenščine ge. Tanji Jelenko za lektoriranje.

Povzetek

Med raziskovanjem izdelave dronov sem naletel na FPV drone. Zastavil sem si cilj izdelati tovrsten letalnik, s katerim bi lahko zajel posnetke, ki jih je sicer nemogoče pridobiti z ostalo tehnologijo. Da bi to dosegel, je bilo potrebno obširno branje literature, iskanje in vrednotenje komponent, laboratorijsko raziskovanje ter eksperimentiranje in analiza podatkov. Ugotovil sem, da lahko takšen dron izdelam tudi sam. Sestavljanje iz minimalnih delov je občutno cenejše kot nakup delno izdelanega produkta. Takšni letalniki so za enako ceno kot celota manj zmogljivi. Funkcionalnost domačega izdelka je glede na zmožnost snemanja primerljiva z DJI-jevo različico FPV drona, omogoča pa še nadaljnje možnosti nadgrajevanja. Raziskava je bila zelo zanimiva, zahtevala pa je veliko truda in potrpežljivosti. Ob zaključku je funkcionalnost izdelka presegla vsa moja pričakovanja.

Ključne besede: FPV dron, strojna in programska oprema, izdelava, testiranje

1 Uvod

1.1 Predstavitev raziskovalnega problema

Tema raziskovalne naloge je dron s pogledom prve osebe oz. FPV (First Person View) dron. Namenjen je snemanju posnetkov, ki jih je s sodobnimi filmskimi brezpilotnimi letalniki nemogoče posneti.

Dron v nekaj sekundah doseže hitrost 100 km/h, ob izgubi signala se sam vrne na lokacijo vzleta, ob padcu lahko sprožimo piskanje, ki nam sporoča lokacijo letalnika, za nočno letenje oz. prepoznavanje med letalniki na dirki ima tudi led signalizacijo, njeno barvo si lahko prilagodimo po želji. FPV dron uporabljamo za snemanje ekstremnih posnetkov, kot so: avtomobil med dirko, balon na vroč zrak med letom, krošnje dreves, spust vode po slapu ... Vse snemamo pri visokih hitrostih in iz neposredne bližine.

Za raziskovanje sem se odločil, ker me je zanimalo delovanje brezpilotnih letalnikov. Med začetnim raziskovanjem sem naletel na FPV drone. Menil sem, da takšen dron lahko izdelam sam. Letalnik, ki bi ga izdelal med raziskovanjem, bi, če bi bil uspešen, lahko uporabil za snemanje akcijskih posnetkov za razne oglase, za tekmovanja z droni in nenazadnje za nadzor nad živalmi na domači kmetiji.

Med raziskovanjem sem ugotovil tudi, da od začetka leta 2021 FPV drona s celotno potrebno opremo ni bilo na tržišču. Ločene komponente z razumno ceno pa so bile, a niso podpirale naprednih funkcij za nadzor, kot je prikaz stanja baterije na zaslonu očal. Zdaj je tak dron mogoče kupiti, ampak je precej drag. Poleg tega ni namenjen nadaljnjemu nadgrajevanju, njegovi rezervni deli pa so dragi.

1.2 Hipoteze

Ob začetku raziskovanja sem si postavil različne hipoteze:

- Z doma narejenim FPV dronom bom lahko posnel akcijski posnetek.
- Izdelam lahko cenovno ugodnejši dron, kot je DJI FPV combo, ki je z njim primerljiv.
- Doma narejeni dron bo lahko dosegel hitrost 100 km/h.
- Letenje z dronom bo preprosto.
- 3d tiskan okvir bo enako kvaliteten kot okvir iz ogljikovih vlaken.
- Doma narejen dron bo podpiral napredne funkcije (vračanje, izpis stanja baterije, piskanje v primeru izgube drona).

1.3 Raziskovalne metode

- Branje in študij literature
- Iskanje in primerjanje komponent
- Laboratorijsko raziskovanje
- Testiranje in analiza podatkov

2 Opis FPV kompleta

V komplet spada simulator leta, v katerem treniramo letenje v naprednejših načinih, ne da bi si povzročili škodo in popraviljanje. Sledijo baterije: njihovo polnjenje, praznjenje in ustrezno shranjevanje.

Ostali deli kompleta delujejo tako, da uporabnik preko daljinskega upravljalnika sporoča svoje ukaze na dron, ki se nanje odzove. Na njem je FPV kamera, ki preko oddajnika pošilja sliko uporabniku na očala podobna tistim za virtualno resničnost. Nanje uporabnik prav tako dobi statistične podatke leta in trenutno stanje letalnika.

Na vrh okvirja je pritrjena akcijska kamera, ki posname let v višji ločljivosti.



Slika 1: Snemanje s FPV dronom

2.1 Sestavni deli FPV kompleta

Za delovanje in upravljanje FPV drona potrebujemo osnovne komponente, ki jih nato lahko uporabljamo na različnih letalnikih. Imajo jih vsi upravljalci FPV plovil, razlikujejo se v zmogljivosti in posledično tudi v ceni.



Slika 2: Nekatere komponente FPV kompleta

Za FPV komplet sem iskal komponente s čim višjo zmogljivostjo za nizko ceno. Tako sem imel manjše stroške in sem se približeval funkcionalnostim DJI-jevega FPV drona, kar sem si postavil kot drugo hipotezo. Večino komponent sem naročil v spletni trgovini banggood.



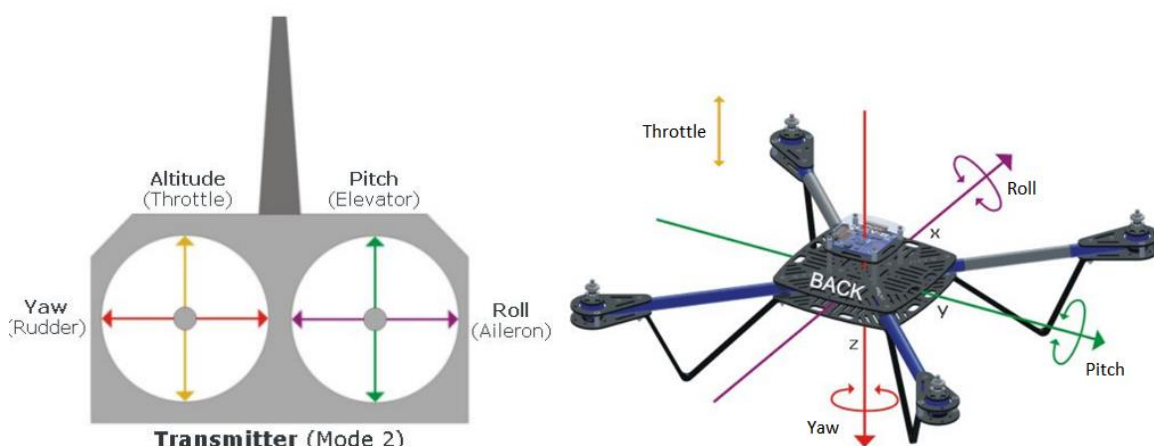
Slika 3: Vsebina mojega FPV kompleta

2.1.1 Daljinski upravljalnik – Tx

Daljinski upravljalnik oz. oddajnik – Tx uporabljamo za letenje letalnika in za treniranje v simulatorju, še preden uporabimo ostalo opremo. Ko imamo letalnik, daljinski upravljalnik pošilja signale komand pilota na sprejemnik – Rx.

Oddajnik izbiramo glede na domet, ki nam ga lahko zagotovi in glede na število komunikacijskih kanalov, pozorni pa moramo biti tudi na način komuniciranja s sprejemnikom. Pri dometu moramo upoštevati, da je odvisen tudi od sprejemne enote, zato je pomembno, katero enoto je proizvajalec uporabljal pri testiranju in katero izberemo sami. Komunikacija lahko poteka preko ene žice s tipi signala IBUS, SBUS in starejšega PPM. Maksimalno število kanalov pri teh komunikacijah je pri IBUS 18, SBUS 16 in PPM 8.

Štiri kanale pri štirikopterjih uporabimo za osnovno vodenje: dodajanje plina (throttle), obračanje letalnika okoli z osi (yaw), obračanje okoli y osi (pitch) in obračanje okoli x osi (roll). Ostale kanale lahko porabimo na stikalih daljinskega upravljalnika za vklopjanje različnih funkcij. Oddajnik uporablja frekvenco 2.4 GHz, ki je standardna za radijsko krmiljenje.



Slika 4: Shema kontrol daljinskega upravljalnika

Daljinski oddajnik in sprejemnik sem se odločil izdelati. Zaradi ne dobavljivosti komponent, majhne razlike v ceni s kupljenim in slabših tehničnih lastnosti, sem spremenil svoje načrte in se odločil za nakup.

Zaradi nizke cene in dometa več kot 0.5 km sem izbral FlySky-ev upravljalnik FS-i6. Njegovo programsko opremo sem nadgradil z verzijo s spleta, tako sem iz 6-ih oddajniških kanalov dobil 10. Nadgradil sem tudi stikalo iz dve na tri pozicijskega, da sem dobil dodaten položaj za vklop funkcij. Med raziskovanjem sem delal tudi z izboljšano verzijo upravljalnika FS-i6 (FS-i6x). Ta ponuja tudi SBUS komunikacijo; domet pa sem pri njem imel manjši.

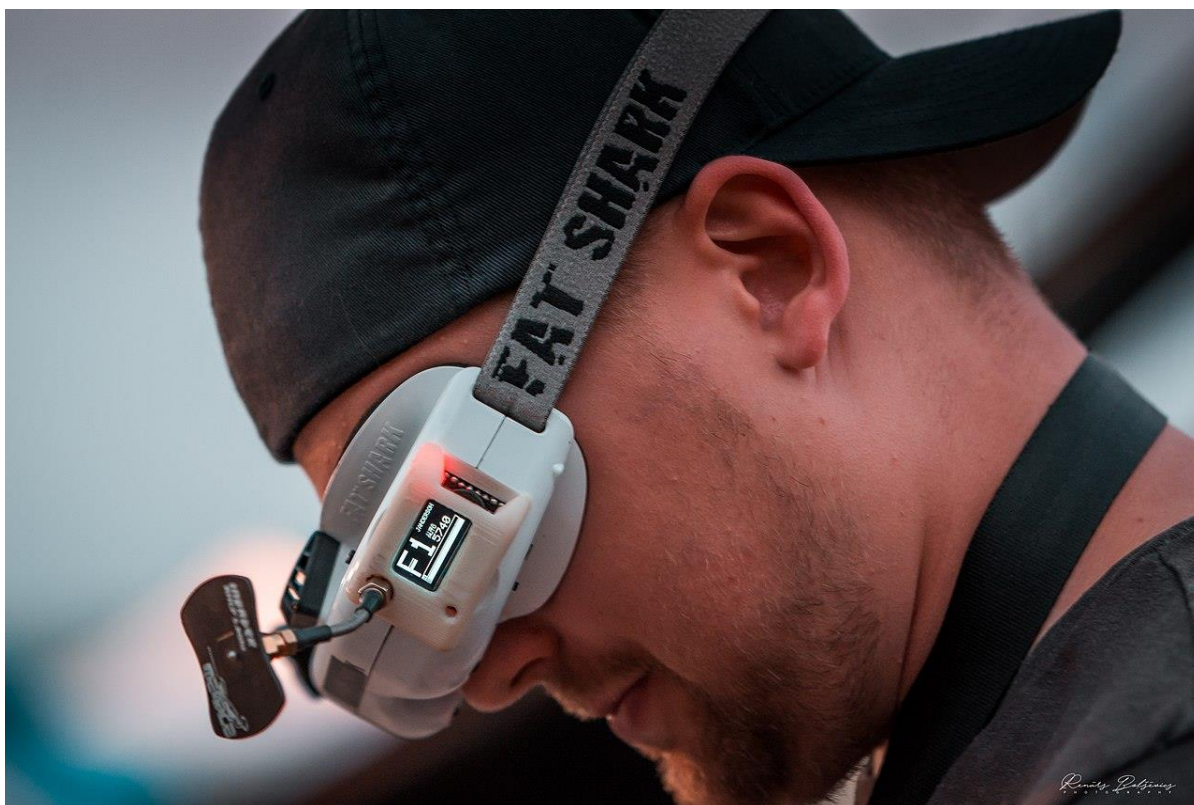


Slika 5: Daljinski upravljalnik FS-i6 in sprejemnik FS-A8S

2.1.2 FPV Očala

FPV očala so drugi najpomembnejši element kompleta. Drone bomo menjevali, opazovali pa bomo skozi ista očala. Namenjena so sprejemu videa signala, ki ga oddaja video oddajnik na dronu (vTx). Namesto očal lahko uporabimo tudi zaslon, ki pa ne ponuja tako dobre FPV izkušnje. Sprejemna enota videa je sestavljena iz video sprejemnika vRx in dveh zaslonov na katerih vidimo sliko. Razdalja sprejemanja na analognih očalih je močno odvisna od anten, ki jih nanje priklopimo. Na boljša očala lahko priklopimo dve anteni. Običajno priklopimo eno, ki sprejema video signal z manjše razdalje v vseh smereh, in drugo, ki sprejme signal z veliko večje razdalje v eni smeri. Tako lahko letimo daleč v smeri usmerjene antene, v bližini pilota pa tudi za njim, brez motenj v videu.

Za prenos videa imamo dva sistema: analognega in digitalnega. Analogni je tradicionalni sistem prenosa. Njegove komponente so veliko cenejše, zakasnitev prenosa je minimalna (15 ms), dosežemo lahko domet 20 km. Pri analognem sistemu imamo veliko možnosti za nadgradnjo signala. Na drugi strani je digitalni sistem, ki je veliko dražji. Zakasnitev prenosa je 35 ms, domet, ki ga lahko dosežemo pa je 4 km (po FFC,SRRC; po CE je 0,7 km). Slika digitalnega sistema je dosti boljša kot slika analognega sistema. Ob slabšem signalu se v analognem videu pojavljajo šumi. Šumov pri digitalnem prenosu ni, ko pa je dron izven dometa, se prenos preprosto ugasne.



Slika 6: FPV analogna očala

Sistem, ki sem izbral je analogen. Izbral sem ga, ker je cenejši in omogoča veliko več možnosti za nadaljnje izboljšave. Prva očala sem želel narediti iz telefona, ki bi ga dal v natisnjen nosilec, za pogled na zaslon prijazen očem, pa bi vstavil leče. Z raziskavo sem ugotovil, da sprejemnik, ki se vklopi v telefon ni drag, prihaja pa do velikih zakasnitev zaradi pretvorbe iz analognega v digitalni signal, kar je pri veliki hitrosti letalnika velik problem. Zato sem izbral zaslon s sprejemnikom. Iz zaslona sem želel narediti FPV očala a se je pojavil problem, kako bi ga razdelil. Možnost izdelave bi bila z enojno lečo, a sem se zaradi nizke cene rabljenih očal odločil za nakup teh. Zaslon še vedno uporabljam, če želim komu poleg pokazati, kaj vidim v očalih med letom.

Očala, ki jih uporabljam, so EV100, testiral sem tudi EV800D. Obe podpirata samodejno iskanje najmočnejše frekvence in dve priključeni anteni. Druga imajo prednost vgrajenega DVR-ja (to je pretvornik, ki nam video shrani na SD kartico – digital video recorder), pogled je dober zaradi velikega zaslona, vgrajena sprejemnika pa delujeta tako, da vidimo video tistega z močnejšim signalom.

Na drugi strani imamo EV100 z elegantno minimalno obliko, DVR lahko dodamo zunaj očal. Prednosti so nastavljiva dioptrija in razdalja med očmi, da vidimo enojno sliko. Vgrajen imajo tudi ventilator, ki prepreči rosenje leč. Za sprejemanje imajo en sprejemnik. Ta menjuje video dveh sprejetih signalov tako hitro, da tega ne opazimo.

Z očali EV100 sem na začetku imel probleme s slabo sliko, kar sem odpravil, ko sem nekajkrat napolnil in spraznil baterijo, ki nekaj časa ni bila v delovanju. Problem sem reševal tudi tako, da sem imel priključeno napajanje iz pomožne baterije preko micro-USB kabla. Neprijetnost na teh očalih je bila majhnost zaslonov, tako, da številke na zaslonu skoraj niso bile vidne. To sem izboljšal, z odstranitvijo pene na očalih, kjer so se te najbolj dotikale glave. Tako sem imel leče bližje očem in sem posledično videl večjo sliko.



Slika 7: FPV očala EV100

2.1.3 Baterije

Za drone zaradi njihove učinkovitosti uporabljamo baterije LiPo (litij-polimerske). Njihova prednost je, da lahko kljub svoji majhni prostornini in teži shranijo veliko energije ter zagotovijo velike izhodne tokove za napajanje motorjev. Baterijo izbiramo glede na več dejavnikov, ki vplivajo na zmogljivost. To so: napetost, kapaciteta, velikost, teža in specifikacija C.

Pri dronih z velikostjo propelerjev 5 inčev so najbolj v uporabi baterije s štirimi celicami. Označimo jih 4S kar pomeni 4 zaporedno (angl. series) vezane celice. V uporabi med začetniki so tudi baterije s tremi celicami, izkušeni piloti pa letijo z baterijami s 6 celicami. Ena celica pri LiPo bateriji ima nazivno napetost 3,7 V, napolnjena 4,2 V, spraznjena do najnižje varne meje pa 3 V. To pomeni, da ima 4S baterija nazivno napetost 14,8 V, napetost polne baterije pa je 16,8 V. Baterij, da bi podaljšali njihovo življenjsko dobo in imeli med letom optimalno učinkovitost, nikoli ne praznimo na 3 V na celico. Običajno pristajamo z napetostjo 3,6 V. Ob pristanku se ta napetost rahlo dvigne in brez dodatnega polnjenja oz. praznjenja zraste na shranjevalno napetost 3,8 V.

Kapaciteto baterije želimo imeti čim višjo. Pojavi se dilema, da so baterije z večjo kapacitivnostjo tudi večjih dimenzij in težje, s tem izgubimo na okretnosti in pospeških drona. Zato iščemo baterije, ki nam nudijo čim boljše razmerje med dolžino leta in zmogljivostjo letalnika.

Specifikacija C nam pove, koliko toka lahko baterija konstantno dovaja. V mojem primeru baterije z 1,55 Ah kapacitivnosti in specifikacijo 100 C, je to 155 A. Baterije polnimo z 1 C oz. 2 C, ob takojšnji uporabi po polnjenju pa največ do 5 C. Pri takšnem polnjenju morajo biti baterije ogrete na vsaj 30°C.



Slika 8: LiPo bateriji z 4 in 6 celicami

Kemija litij-polimernih baterij ima zaradi tako dobrih zmogljivosti tudi slabe lastnosti. Z nepravilno uporabo baterije degradirajo – poveča se jim notranja upornost – to opazimo, ko ob polnjenju oz. praznjenju vedno večji del električne energije prehaja v toplotno, zaradi česar se baterija segreva in se lahko vname. Višanje notranje upornosti zmanjšuje njihovo učinkovitost. Notranja upornost novih baterij je 2 - 6 mΩ, od 7 do 12 mΩ je uporaba nemotena, pri 12 - 20 mΩ se začnejo kazati znaki staranja baterije. Nad 20mΩ pa je čas ko baterijo zamenjamo. Baterije nam lahko zagorijo tudi zaradi udarca, še posebej ob predrtju.

Za svojo prvo baterijo sem izbral 4S baterijo podjetja FunFly z 1550 mAh kapacitivnosti in 100 C specifikacijo. Med raziskovanjem sem delal tudi z 4S in 3S Tattu baterijami z 45 C specifikacijo. Za izbiro sem se odločil zaradi najboljšega razmerja med kapacitivnostjo in težo baterij, ki so bile na voljo. Pri izbiri baterije sem pazil, da bo zagotovila dovolj toka, da bom lahko napajal motorje, ki bodo omogočili veliko hitrost in potrditev tretje hipoteze.



Slika 9: LiPo baterija

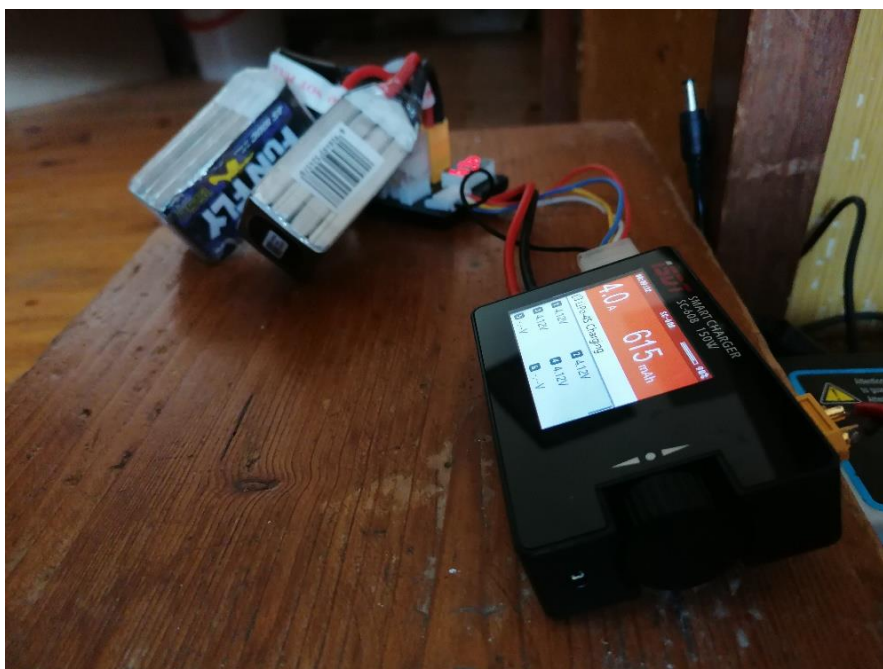
2.1.4 Polnilec

Polnilec nam omogoči, da lahko naše visokozmogljive baterije napolnimo. Za polnjenje LiPo baterij uporabljamo univerzalne polnilce, ki lahko napolnijo več vrst baterij. Običajno so ti polnilci priloženi brez napajalnika, ki je dodaten strošek. S polnilcem lahko izvajamo več dejanj: polnjenje, ravnovesno polnjenje, praznjenje, shranjevanje. Boljši polnilci nam merijo tudi notranjo upornost baterij.

Polnilec ima več funkcij. Pri običajnem polnjenju imamo priključen samo konektor s celotno napetostjo baterije. Ta vrsta polnjenja se pri baterijah z več celicami običajno ne uporablja. Za njih uporabimo ravnovesno polnjenje, pri katerem polnilec nadzira napetost vsake posamezne celice in jih polni enakomerno. To nam podaljša življenjsko dobo baterij, saj bi pri običajnem polnjenju dobra celica prej dosegla maksimalno napetost kot slabša in bi jo polnilec polnil preko optimalne delovne napetosti. Polnilec nam omogoča tudi praznjenje, funkcija nam koristi, če želelimo leteti in nas je preseneti slabo vreme. Tako lahko baterijo spraznimo, da nam zaradi predolge napolnjenosti ne degradira. Pomembna lastnost polnilca je tudi shranjevanje baterij. Polnilec napetost celic LiPo baterije nastavi na 3,80 V.

Pri polnilcih je pomembna njihova moč. Iz moči izvemo, ali bo polnilec zmožel polnjenje baterije (maksimalno napetost baterije pomnožimo s polnilnim tokom in dobimo moč, ki jo polnilec potrebuje). Dodatno moč polnilec potrebuje za vzporedno polnjenje, saj polni več baterij. Napetost polnjenja je stalna, tok pa se sešteva glede na kapacitivnost in specifikacijo C.

Da lahko napolnimo več baterij hkrati, jih polnimo vzporedno. Za takšno polnjenje potrebujemo ploščo za vzporedno polnjenje; z njo sem preverjal tudi napetost baterij na terenu, saj ima ta vgrajen voltmeter. Napetost baterij, ki jih želimo polniti, se na posameznih celicah ne sme razlikovati več kot za 0,02V.



Slika 10: Polnjenje LiPo baterij

Prvi polnilec, ki sem ga uporabljal, je bil 80 W Imax B6. Med raziskovanjem sem dobil možnost uporabe 150 W polnilca ISDT SC-608 (slika 10). Ker nisem imel napajalnika, sem ga napajal preko avtomobilskega akumulatorja. Na tak način sem polnil baterije tudi na terenu, ko smo potovali z avtomobilom.



Slika 11: Polnilec Imax B6

2.1.5 Akcijska kamera

Kakovost videa na FPV očalih je slaba, da je zakasnitev prenosa minimalna in imamo sliko v živo. Zato je na dron nameščena akcijska kamera, ki nam let posname v višji kakovosti. Kamera mora zagotoviti snemaje z visokim številom sličic na sekundo (FPS), da videoposnetek teče gladko tudi ob hitrem premikanju drona. Pri kameri je dobro imeti tudi omilitev vibracij, saj dron ves čas vibrira ob nenehnem uravnovešanju. Prav tako mora biti čim manjša, lažja in s čim manj občutljivimi deli, ki se lahko razbijejo. Kamere podjetja GoPro imajo z vsako verzijo več teh lastnosti in so manj primerne za FPV letenje.



Slika 12: Akcijska kamera na FPV dronu

Med raziskovalnim delom sem uporabljal kamero SJ4000. Da bi lahko potrdil hipotezo in posnel dober akcijski posnetek, sem uporabljal tudi GoPro hero 8, ki mi je omogočil prikaz tega, kaj FPV dron zmore. Pri GoPro kameri je bila velika prednost blaženje tresljajev, zato se jih na posnetku sploh ne opazi. Fotografijo posneto s to kamero lahko vidite na sliki 46.

2.1.6 Simulator

FPV simulator je igra, kjer lahko pilotiramo simuliran FPV letalnik z daljinskim upravljalnikom. Tako se naučimo letenja v akrobatskem oz. izboljššanem: zračnem načinu, kar je zelo zahtevno. V teh načinih dron ne uporablja nobenega senzorja za stabilizacijo in je popolnoma prepuščen našim spretnostim. Simulator je najboljši način, da začetniki začnejo z letenjem in ga izboljšujejo, izkušeni piloti pa ga lahko uporabijo za učenje zahtevnih akrobatskih trikov. S simulatorjem preprečimo škodo in posledično dodatne stroške.

Preden imamo simulator je dobro imeti daljinski upravljalnik. Za treniranje potrebujemo ustrezen kabel, preko katerega poteka komunikacija z računalnikom. Tako bomo za učenje in za pilotiranje uporabljali isti upravljalnik. Na ta način lahko preizkusimo letenje preden bi imeli stroške z nakupom celotnega kompleta.

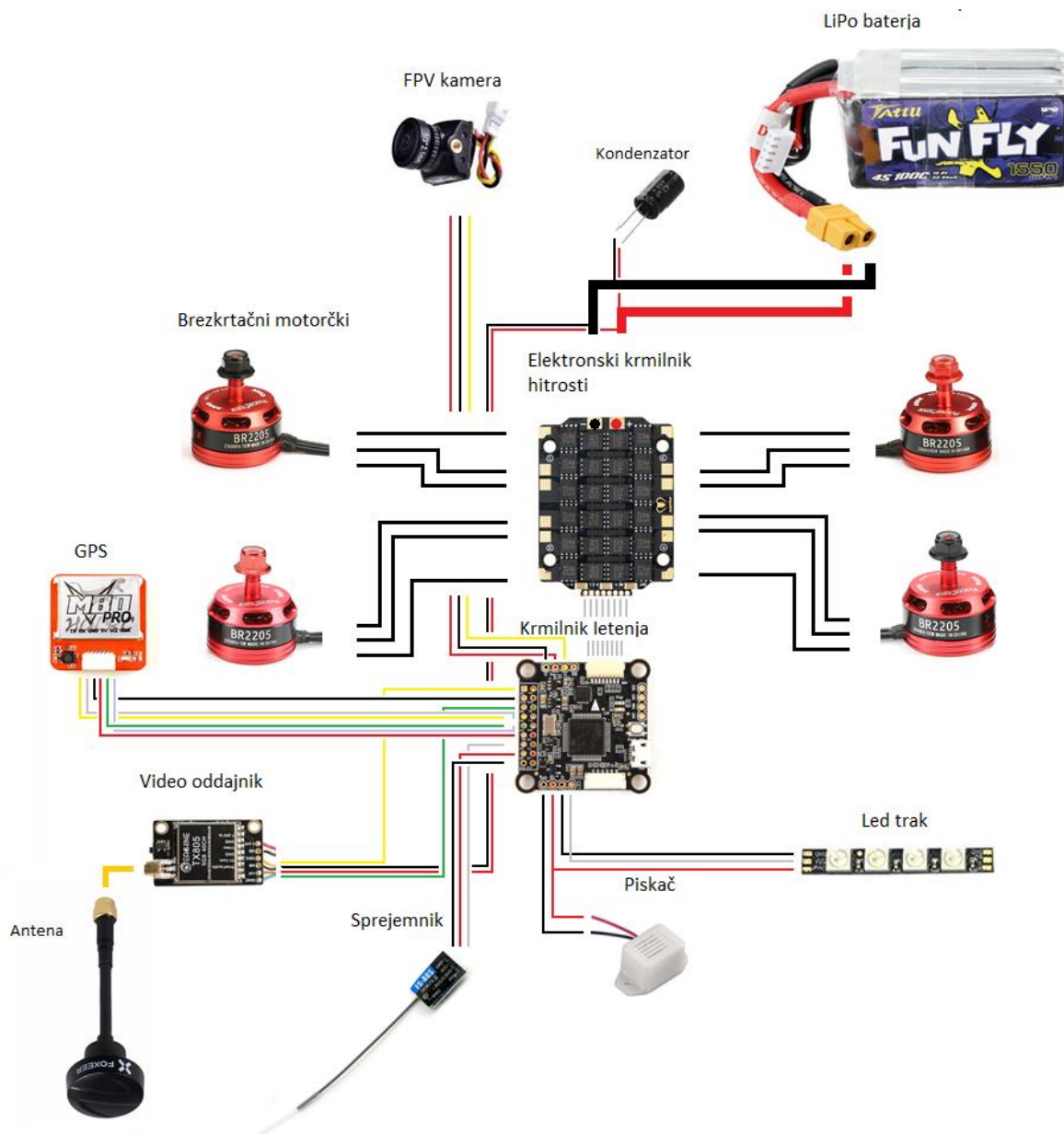
Ena izmed najboljših FPV simulatorjev sta LiftOff in Uncrashed, ki sem ju tudi preizkusil. Med raziskovanjem sem uporabljal predvsem FPV Freerider, katerega demo verzija je brezplačna, a z namernimi zaostanki. V njem sem osvojil osnove letenja, da si nisem povzročil še več popraviljanja. Prav tako sem se naučil obvladati letalnik pri veliki hitrosti, da sem dobil možnost za potrditev četrte hipoteze: letenje z 100 km/h. Ko sem imel dron že sestavljen in sem začel z učenjem leta sem ugotovil, da je letenje z FPV dronom vse prej kot enostavno, to sem dodatno potrdil še z mnogimi poleti. Tako sem lahko preveril pravilnost četrte hipoteze, v kateri sem predvideval, da bo letenje enostavno.



Slika 13: Simulacija letenja v simulatorju

2.2 Sestava dronove strojne opreme

Za delovanje FPV drona potrebujemo baterijo, krmilnik letenja, elektronski krmilnik hitrosti, brezkrtačne motorčke, FPV kamero, video oddajnik in sprejemnik signala daljinskega upravljalnika. Dodamo lahko tudi GPS, piskač, LED trak in še kak dodaten senzor. Na sliki so komponente, ki sem jih uporabil na svojem dronu. Prikazano je tudi, kako jih povežemo.



Slika 14: Vežalna shema FPV drona

2.2.1 Krmilnik letenja – FC

Krmilnik letenja (flight controller) so možgani letalnika. To vezje ima vrsto senzorjev, ki zaznavajo gibanje drona in ukaze uporabnika. Na podlagi teh podatkov nadzoruje hitrost motorjev, da se plovilo premika v skladu z navodili. Osnovna senzorja krmilnika sta senzor nagiba in pospeška. Boljši krmilniki lahko imajo tudi barometer (senzor tlaka) in magnetometer (kompas). FC je tudi vozlišče za periferne naprave, kot so GPS, LED trak in sonar.



Slika 15: Krmilnik letenja Holybro kakute F4 V2.3

Na vsakem krmilniku letenja je različno število strojnih serijskih vmesnikov UART. UART kratica pomeni Univerzalni Asinhroni sprejemnik (Receiver)/oddajnik (Transmitter). Vsak UART ima dve nožici, TX za prenos podatkov in RX za sprejem. TX na periferni napravi se poveže z RX na FC in obratno. Nanje priklopimo zunanje naprave, ki bodo komunicirale s krmilnikom (GPS, sprejemnik, VTx – smart audio). Nalogo UART-u dodelimo v zavihku ports v Betaflight kofiguratorju.

Poleg možne strojne opreme lahko na svojem krmilniku letenja uporabljamo tudi različno programsko opremo (firmware), ki ponuja različne funkcije za specializirane aplikacije. INav je zasnovan za maksimalno uporabo GPS-a, KISS je bolj osredotočen na uporabo dronov za tekmovanja in preprosto uporabo. Betaflight pa je odprtokodni program, ki ga razvija in vzdržuje skupnost. Ima največjo bazo uporabnikov, zato bomo v primeru težav najverjetneje dobili pomoč. Ima tudi najširši nabor krmilnikov letenja.

2.2.1.1 Prikaz podatkov na zaslonu – OSD

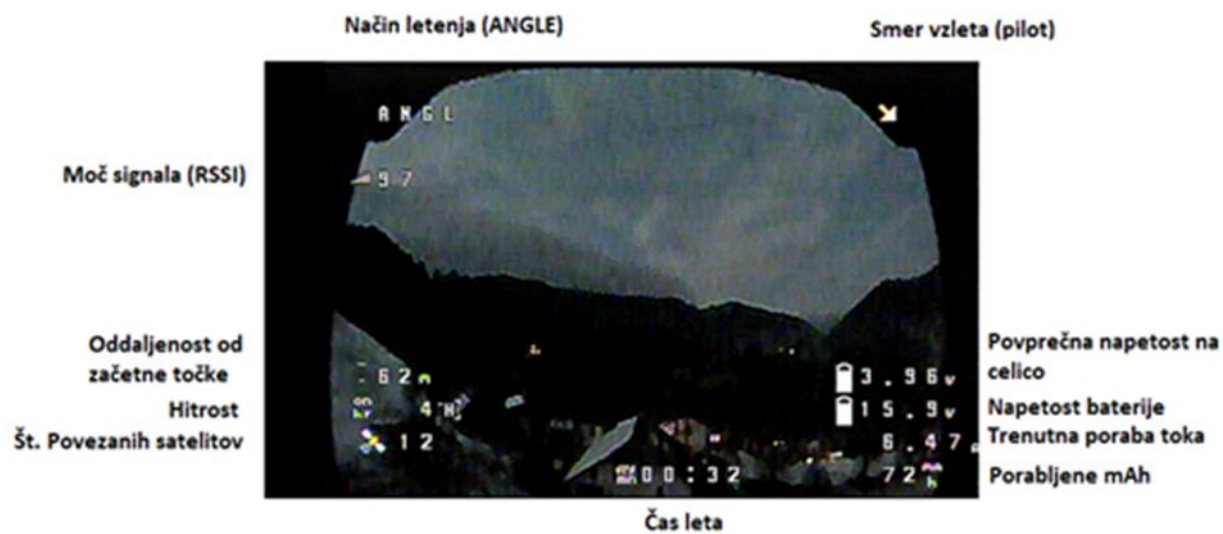
Večina krmilnikov podpira OSD. To so podatki, ki jih krmilnik letenja doda na signal kamere pred prenosom preko video oddajnika. Vidimo ga kot izpisane podatke na zaslonu očal poleg video prenosa. Kratica pomeni predvajanje na zaslonu (angl: On Screen Display). Funkcija je zelo uporabna, saj nam med letom podaja podatke o stanju letalnika, kot so: napetost baterije, trenutni tok, porabljeno kapaciteto, čas letenja, način letenja (Slika 16 in 17). Če imamo na dronu tudi GPS in RSSI (Receiver Signal Strength Indication) povezavo preko sprejemnika ali prost AUX kanal, namenjen RSSI komunikaciji, nam izpiše tudi moč signala daljinskega oddajnika, število povezanih satelitov, hitrost letenja, višino letalnika in smer, v kateri je pilot. Ob koncu leta pa nam izpiše statistične podatke leta: dolžino, minimalno napetost, maksimalen tok, maksimalno oddaljenost od pilota, preleteno razdaljo ...



Slika 16: Prikazovanje podatkov na zaslonu – OSD

Pred začetkom leta lahko nastavitve krmilnika letenja, ki smo jih predhodno nastavili na računalniku spremenimo preko podatkov, ki se nam izpisujejo na zaslonu (OSD) z daljinskim upravljalnikom. Funkcije, ki jih lahko spremenimo so: frekvenca, moč oddajanja video oddajnika, barve led luči na traku, protokol pristajanja ...

Primer uporabe je, če želimo leteti v zaprtem prostoru oz. pod krošnjami dreves: s podatki, ki jih vidimo v očalih, lahko s prestavljanjem kontrol daljinskega upravljalnika protokol pristajanja iz GPS reševanja spremenimo na padec. To nam koristi, da se dron ne požene v zrak, kot je namen reševanja, saj bi se zaletel v strop prostora, ampak pade na tla. Prav tako lahko brez pritiskov na tipko video oddajnika, ki je lahko nedostopna zaradi skrčene postavitve komponent na dronu, zmanjšamo moč oddajanja, saj bi v zaprtem prostoru privedla da odbojev signala in posledično do motenj.

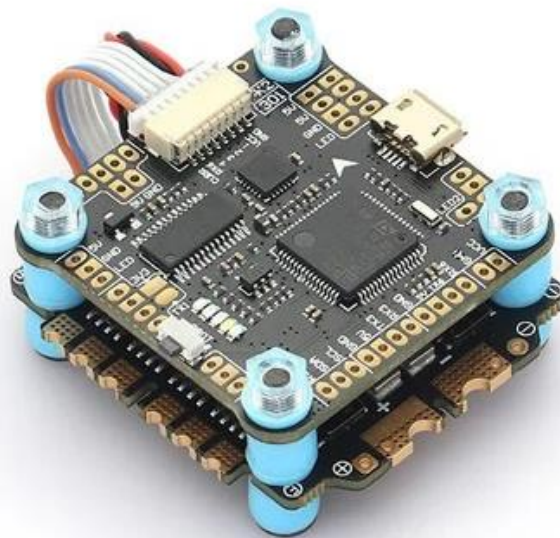


Slika 17: Razlaga prikazanih podatkov na zaslonu – OSD

2.2.1.2 Moja izbira krmilnika letenja in hitrosti

Krmilnik letenja in elektronski krmilnik hitrosti sem kupil v skupnem paketu, da sem ju dobil ceneje kot ločene. To sta Mamba f405 mk2 in F40 4v1 ESC. Izbral sem ju zaradi podpore baterij od 3 do 6S in ESC-ja, ki lahko prenese maksimalen tok motorjev. Na senzorje, ki jih podpira takrat še nisem gledal, saj jih nisem poznal. Ta komplet sem kupil dvakrat zaradi uničenega mikroprocesorja, ki sem ga tudi drugič uničil. Zato sem delal tudi s krmilnikom Holybro kakote F4 V2.3. Izbral sem ga zaradi podpore barometra, dosti UART komunikacijskih kanalov in podpore ESC 4v1, da sem ga lahko priklopil z mambinim ESC-jem brez večjih zapletov.

Krmilnik letenja in elektronski krmilnik hitrosti sta povezana s kablom, preko katerega krmilnik letenja sporoča, kako hitro naj se motorji vrtijo, dobi pa napajanje, povezavo z ampermetrom, preko sprejemnega pina UART 6 pa tudi informacije o temperaturi in številu vrtljajev motorjev na minuto. V kompletu Mamba s tem ni bilo problemov. Ob uporabi novega krmilnika letenja pa sem moral konektor odstraniti in ločeno prispajkati žice na pomešane pine.

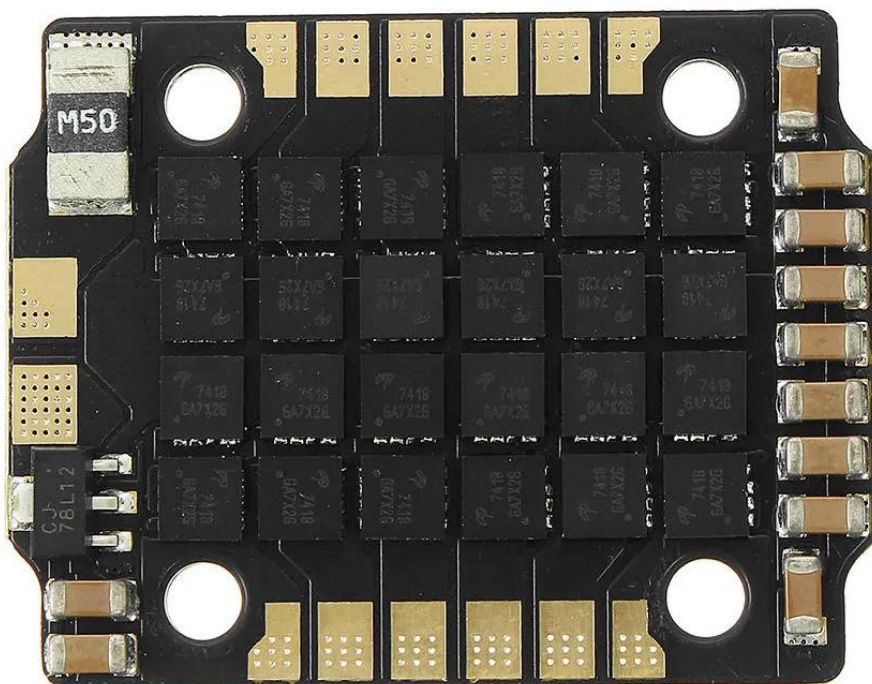


Slika 18: Mamba FC in ESC komplet

2.2.2 Elektronski krmilnik hitrosti – ESC

Elektronski krmilnik hitrosti (electronics speed controller) sprejema signale krmilnika letenja in nadzoruje hitrost motočkov. Prav tako posreduje pa mu podatke o svoji temperaturi, vrtljajih motorčkov in toku. Ko vklopimo baterijo v letalnik nam ESC preko motorčkov, katerih tuljave uporabi kot tuljave v zvočniku z zvočnimi signali oz. zaigrano melodijo sporoči komunikacijo z motorčki, z zaključnima piskoma pa tudi s krmilnikom letenja. Pri izbiri moramo paziti, da ESC prenese tokovno obremenitev, ki jo zahtevajo motorčki tako preprečimo njegovo eksplozijo. Izberemo lahko štiri ESC-je v enem vezju oz. uporabimo ločene, za slednje potrebujemo pri vezavi tudi PDB (ploščico za distribucijo energije).

Tako kot na krmilniku letenja tudi na elektronskem krmilniku hitrosti lahko spremenimo vdelano programsko opremo in jo prilagodimo glede na naše potrebe. Najnovejši spletni konfigurator, ki nam to omogoči, je BlueJay konfigurator.



Slika 19: Elektronski krmilnik hitrosti

2.2.3 Motorji

Za FPV dron uporabimo brezkrtačne motorje, saj so lažji in bolj učinkoviti kot krtačni. Za svoje delovanje potrebujejo elektronski krmilnik hitrosti (ESC), s katerim so povezani s tremi žicami. Motorje izbiramo glede na delovno napetost, faktor KV, smer navoja in glede na velikost propelerjev, ki so ji namenjeni.

Pri motorjih, namenjenih 5-inčnim propelerjem, uporabljamo baterije 3-6S. Glede na delovno napetost in faktor KV lahko izračunamo vrtljaje motorja na minuto tako, da pomnožimo napetost in faktor KV. Motorček z 2300 KV pri napetosti polne 4S baterije 16,8 V ima 38 640 vrtljajev na minuto (RPM), kar je 644 na sekundo (motor je brez obremenitve propelerja). Tak motor lahko z 5-inčnim propelerjem doseže navor okrog 900 g. Vsi motorčki na dronu se ne vrtijo v isto smer, diagonalno sosednja motorčka na dronu se vrtita v isti smeri (smer urinega kazalca oz. nasprotna). Ta lastnost nam omogoči obračanje drona na mestu (smer osi z), zato moramo izbrati dva motorčka z levim in dva z desnim navojem, da se z vrtenjem varovalne matice ne odvijajo.



Slika 20: Brezkrtačni motorji: Racerstar 2300KV

Na dronu sem uporabil Racerstar motorje 4S, 2300 KV. Zaradi okvare enega od motorjev, sem za določen čas uporabljal tudi Eachinov brezkrtačni motor. Pri izbiri sem gledal na to, da bodo motorji zagotovili dovolj moči, da bodo z lahkoto dvignili letalnik, tako bo ta lahko dosegel hitrost 100 km/h. S tem bi lahko potrdil tretjo hipotezo.

2.2.4 Propelerji

Glede na velikost propelerjev izbiramo ostale komponente (okvir, motorje, posledično tudi esc). Velikost drona nam določi velikost propelerjev, ki jih uporabljamo. 3-inčni se uporabljajo za majhne drone večinoma z zaščitnimi propelerji, takšni letalniki lahko letijo v zgradbah in v bližini ljudi. Najbolj pogosti, 5-inčni, se uporabljajo za običajne FPV letalnike z velikimi pospeški. 7-inčni in večji so uporabljeni predvsem za povečanje nosilnosti za večje akcijske kamere. Z večanjem propelerjev pa se na enakih motorjih zmanjša pospešek.

Propelerje izberemo iz plastičnih, čim bolj nelomljivih materialov. Dva propelerja sta namenjena vrtenju v smeri urinega kazalca, dva pa v nasprotni, zato potrebujemo propelerje z nagibom na obe strani, tako da bodo propelerji zrak tiščali k tlom.

Sam sem uporabil 5-inčne LDARC propelerje.

2.2.5 FPV kamera

FPV kamera je kamera z izredno majhno ločljivostjo, da je zakasnitev prenosa videa čim krajša. Kamera preko žice krmilniku letenja posreduje analogni signal videa. Prilagojena je letenju na določeni svetlobi, na kateri je pogled najboljši. Boljše kamere imajo možnost nastavljanja svetlobe trenutnim potrebam s posebno nadzorno ploščico, ki jo vklopimo v kamero. Če krmilnik letenja to podpira, lahko te nastavitve opravimo tudi kar preko OSD nastavitvev.



Slika 21: FPV kamera na dronu

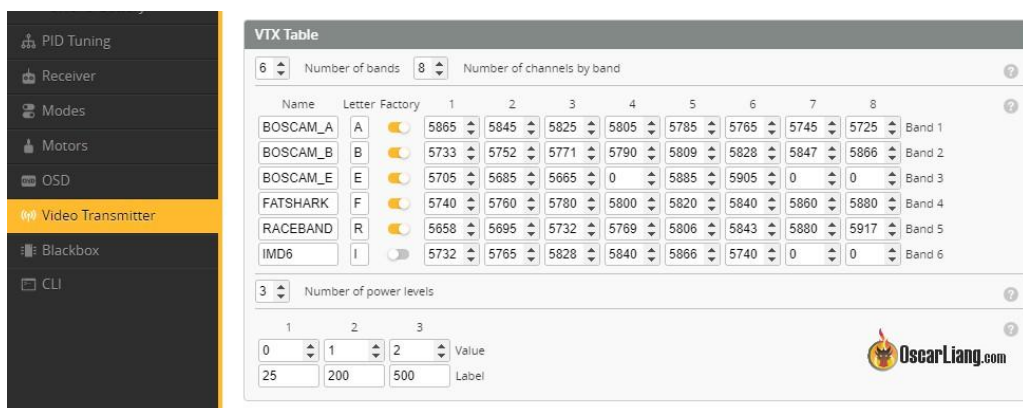
Na dron sem namestil Caddx Turbo EOS2 FPV kamero. Med raziskovanjem sem delal tudi z Foxeer kamero. Med uporabo sem ugotovil, da je izbira kamere zelo pomembna, saj je od nje odvisno, kako dobro bomo videli podrobnosti.



Slika 22: FPV kamera: Caddx Turbo EOS2

2.2.6 Video oddajnik – vTx

Video oddajnik prejete signale videa iz krmilnika letenja spreminja v prostorsko valovanje, ki ga preko antene sprejemnik na očalih sprejme in spremeni v video sliko na zaslonu. Ko oddajamo video signal, se nanj lahko priklopi neomejeno število sprejemnikov, ki so v dometu oddajanja in sprejemajo na enaki frekvenci kot oddajnik oddaja. vTx oddaja na različnih frekvencah in močeh. Na povprečnem oddajniku imamo na voljo 40 frekvenc od 5,645GHz do 5,945 GHz in štiri moči oddajanja najpogosteje 25mW, 200mW, 600mW, 800mW lahko pa tudi 1 in 2W.

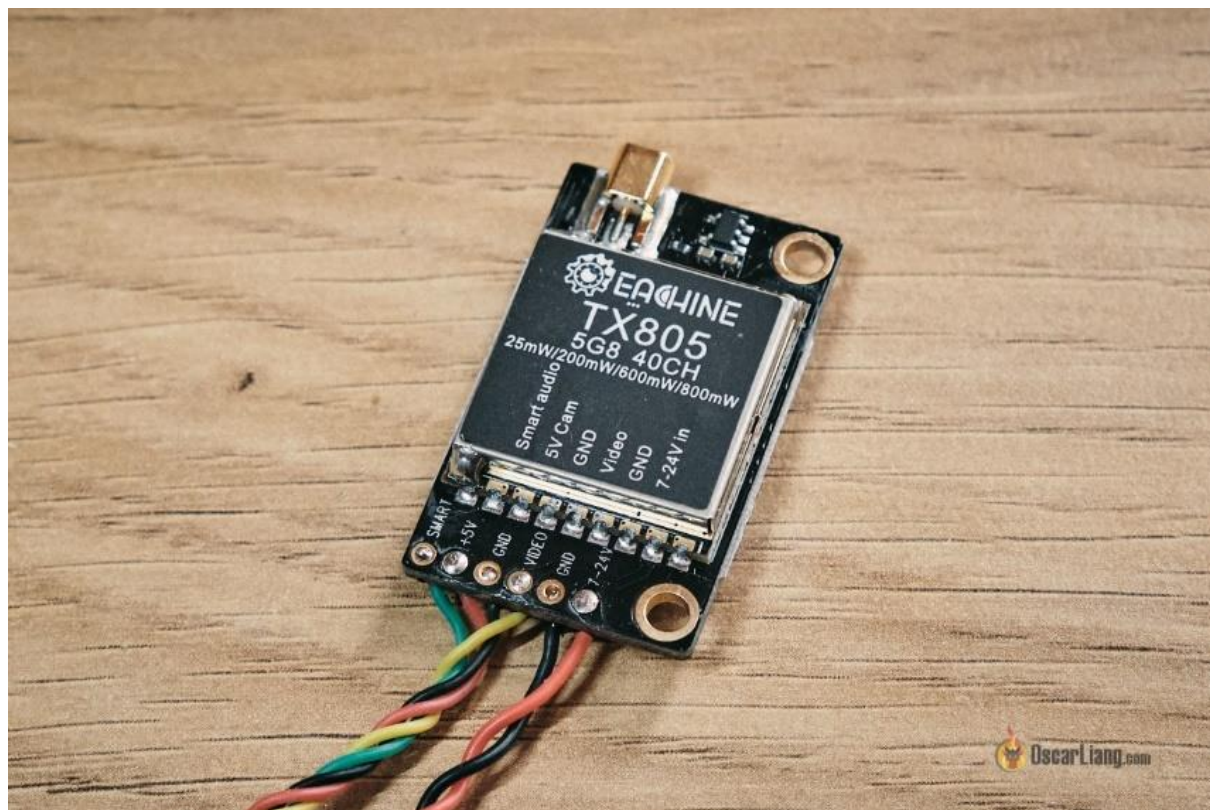


Slika 23: Tabela oddajanja video frekvenc

Napredna funkcija video oddajnikov je smart audio, ki deluje preko kanala za prenos zvoka. Ker zvoka iz video oddajnika ne sprejemamo (ker bi posneli samo ropot propelerjev, posnetega pa imamo na akcijski kameri) ta funkcija izkoristi prost kanal za prenos podatkov. Tako lahko nastavitve moči in frekvence spreminjamo preko OSD sistema. Te nastavitve lahko spreminjamo tudi preko tipke na oddajniku, ki pa ni nujno dostopna zaradi skrčene postavitve komponent. Signalizacija kanalov na oddajniku poteka preko majhnih led diod in jo je brez navodil nemogoče razumeti.

Video oddajnika nikoli ne priključimo na napajanje brez antene. Antena z oddajanjem preprečuje prekomerno segrevanje in vžig.

Na dron sem na začetku namestil video oddajnik Eachine TX805. Zaradi napake sem ga nato zamenjal z Eachine TX23.

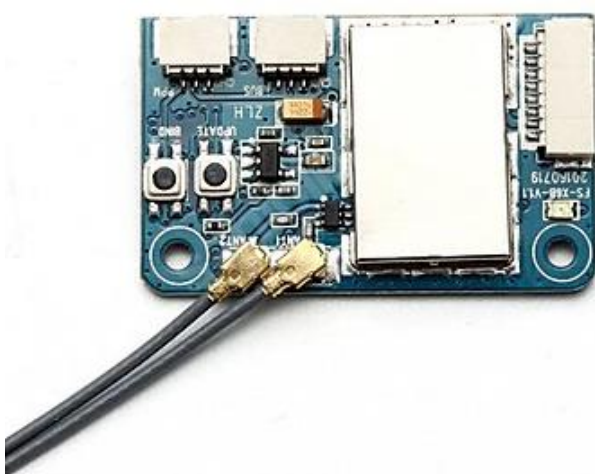


Slika 24: Video oddajnik

2.2.7 Daljinski sprejemnik – Rx

Sprejemnik je nameščen na dronu in ukaze prejete od oddajniške enote sporoča krmilniku letenja, ki upravlja motorje in s tem dron. Sprejemnik ima eno ali dve anteni, ki morajo biti na kvadrokopter pritrjene tako, da ne glede na položaj okvir ne ovira sprejemanja. Daljša antena na sprejemniku nam bo zagotovila boljši doomet. Komunikacijo med sprejemnikom in daljinskim oddajnikom vzpostavimo s pritiskom na tipki za sprijemanje (angl. binding) in vklopimo napajanje.

Boljši sprejemniki podpirajo tudi RSSI. Kratica pomeni indikacijo moči signala sprejemanja. Tako lahko na zaslonu preko OSD funkcije vidimo, kdaj nam bo zmanjkalo signala.



Slika 25: Daljinski sprejemnik

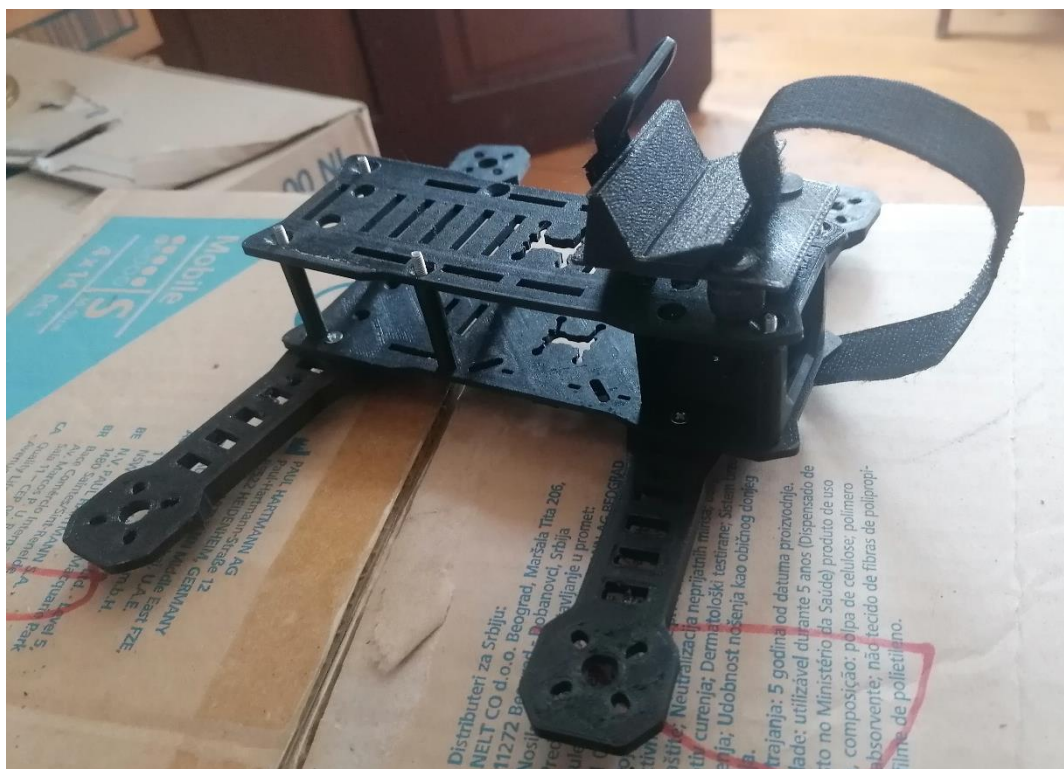
Sprejemnik sem naročil v kompletu z daljinskim oddajnikom. Izbral sem set s priloženim sprejemnikom FS-A8S, prednost pri njem je njegova majhnost. Med raziskovanjem sem zaradi okvare prejšnjega uporabil tudi sprejemnik FS-iA6B.



Slika 26: Daljinski sprejemnik FS-iA6B

2.2.8 Okvir

Okvir letalnika drži elektronske komponente na svojem mestu in jih varuje, zato mora biti iz materiala, ki mu kljub padcem in trkom pri veliki hitrosti to omogoči. Prav tako mora biti lahek, da dronu ne povzroča dodatne obremenitve. Vse to nam omogočajo okvirji iz ogljikovih vlaken (angl. carbon fiber). Cenovno veliko bolj ugodni pa so 3D tiskani okvirji, ti niso kompaktni kot ogljikovi, a zdržijo marsikatero obremenitev. Njihova prednost je v tem, da lahko ob poškodbi kakšnega dela hitro in poceni natisnemo novega. Karbonski deli pa so dragi in nanje običajno čakamo več mesecev.



Slika 27: 3D tiskan okvir

2.2.9 Dodatna strojna oprema

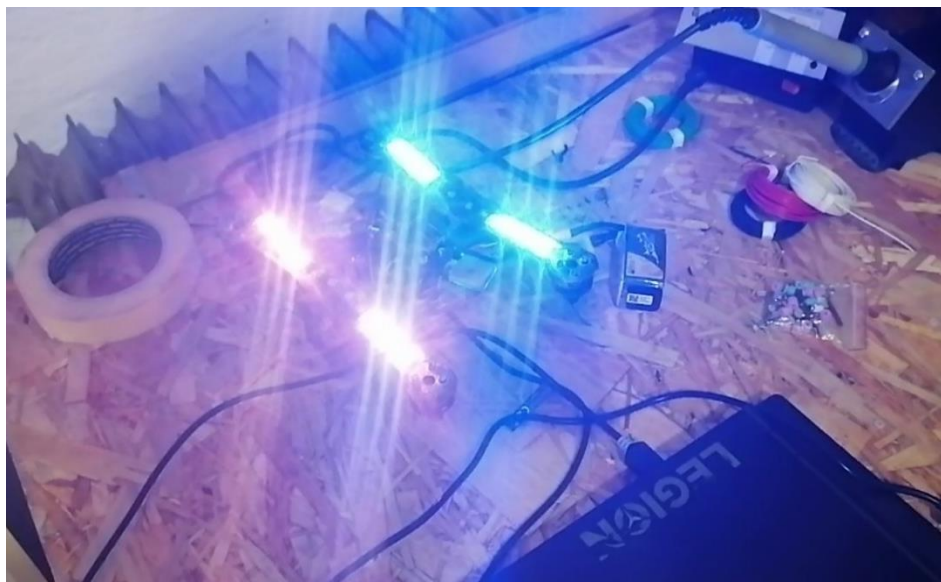
Z osnovno opremo nam dron povsem dobro leti. Z majhnimi dodatki pa ga lahko zelo izboljšamo. Dodamo lahko funkcijo vračanja ob izgubi signala, piskanje ob izgubi letalnika, samodejno izmikanje oviram, podaljšamo lahko doomet video signla in dodamo led trak, ki je vedno dober dodatek.

GPS na dronu nam doda veliko funkcij. Na zaslonu nam prikazuje koordinate, hitrost, nadmorsko višino pred letom, med letom pa višino od vzletne točke, prikazuje nam smer začetka leta, če bi se med letom npr. med drevesi izgubili. Za ustrezno delovanje potrebujemo z GPS-om povezanih vsaj 8 satelitov. Za najboljši izkoristek GPS-a uporabimo iNav konfigurator. Z njim lahko naredimo klasičen filmski dron.

Antene preprečujejo pregrevanje video oddajnika oz. sprejemnika in nam izboljšajo domet. Prav tako nam signal oddajnika usmerijo. Na dronu imamo anteno (priklopleno v video oddajnik), ki oddaja signal v vseh smereh (omni anteno). Na sprejemnih očalih pa imamo poleg omni še dodatno usmerjeno anteno.

Sonar je dodatek, ki zaznava predmete okoli drona. Deluje tako, da odda visokofrekvenčni ton, nato pa šteje tako dolgo, da se ton odbije od ovire in vrne v mikrofona. To dronu omogoči izmikanje oviram in uravnavanje višine.

Led trak poudari dron na nočnem nebu, na dirkah pa loči letalnike med sabo. Trak, ki ga uporabimo, je pameten, to pomeni, da lahko vsaka led dioda žari v svoji barvi. Uporabimo ga lahko kot indikator stanja napetosti, video kanala oz. položaja ročice za plin. Pri uporabi nas omejujeta maksimalni tok, ki ga odda 5V regulator in hitrejše praznjenje baterije.



Slika 28: LED trakovi na dronu

Na dronu sem uporabil GPS HGLRC M80PRO, običajen pameten led trak in anteno foxer pagoda pro, na očaliha pa anteni iFlight Albatross in Realacc Triple Feed Patch.



Slika 29: GPS HGLRS M80PRO



Slika 30: Antena Foxer pagoda pro

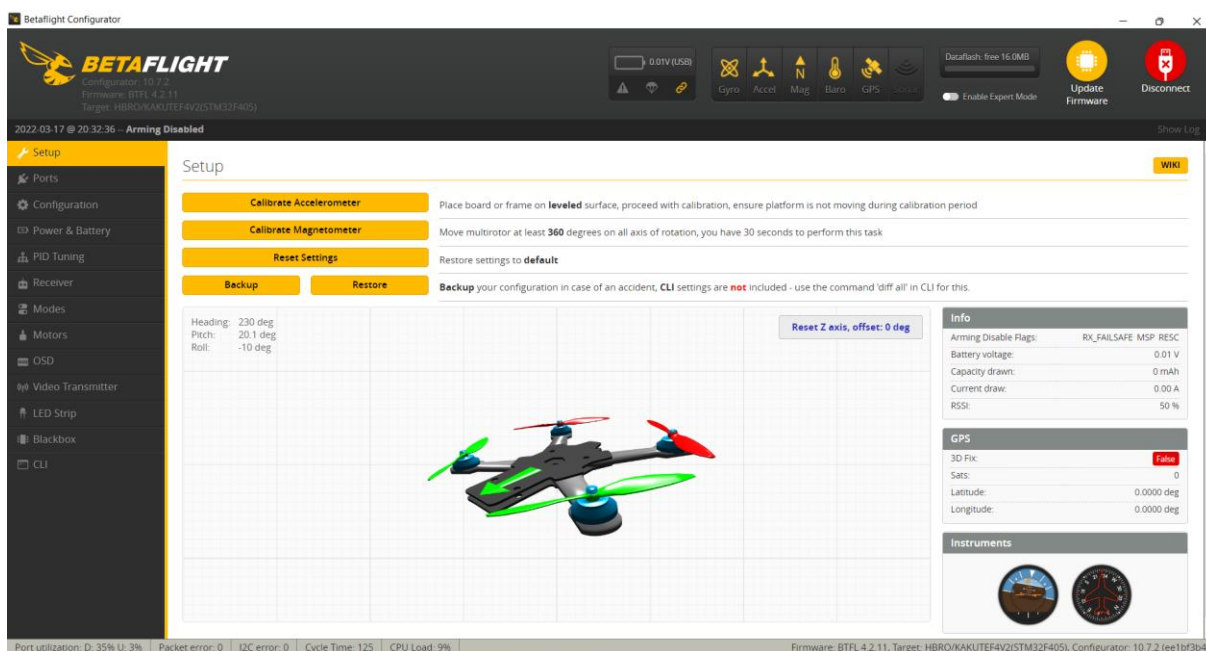
2.3 Programska oprema drona – firmware

2.3.1 Betaflight – Programska oprema krmilnika letenja (FC)

Betaflight je programska oprema za krmilnike letenja, ki se uporablja za letenje večrotorskih plovil in plovil s fiksnimi krili. Od Baseflight-a in Cleanflight-a se razlikuje po tem, da se osredotoča na zmogljivost letenja in vrhunske dodatke funkcij.

Za povezavo krmilnika letenja z Windows operacijskim sistemom potrebujemo naložiti dodaten gonilnik ImpulseRC.

V Betaflightu, se nam najprej odpre 3D model letalnika, ki se premika s premiki fizičnega krmilnika. Za konfiguracijo ga moramo imeti vklopljenega v računalnik in odprtega v programu. Vse priključene elemente lahko prilagodimo našim potrebam in željam. Upravljamo lahko vhode krmilnika, način komunikacije s sprejemnikom in GPS, barve vsake posamezne LED diode na traku. Prilagodimo si tudi stikala daljinskega upravljalnika, na katera dodamo željene funkcije.



Slika 31: Betaflight konfigurator

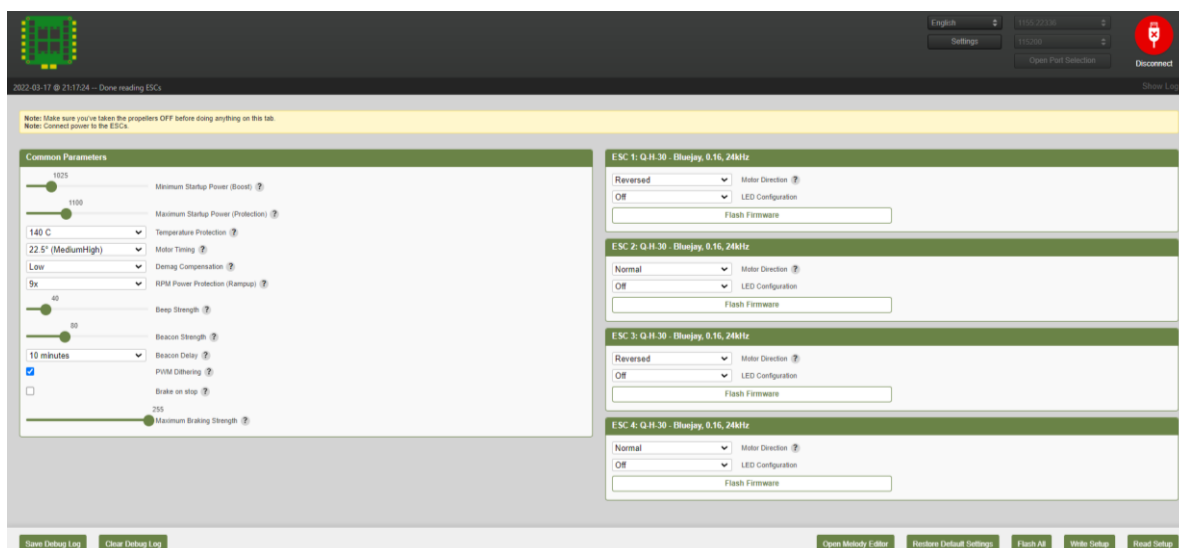
Sodobno vdelano programsko opremo FC lahko konfiguriramo prek računalnika, pametnega telefona ali celo radijskega krmilnika.

2.3.2 BlueJay – Programska oprema elektronskega krmilnika hitrosti (ESC)

Bluejay je naslednik BLHeli_S in BLHeli_32 (namenjen je 32 bitnim ESC-jem). Trenutno je najboljša programska oprema za cenejše ESC-je, ki niso 32 bitni. Dostopna je preko brskalnika in je za razliko od predhodnikov odprtokodna, zato jo skupnost lahko nadgrajuje. Omogoča nam, da na krmilnik lahko shranimo več funkcij in zagotovimo boljšo komunikacijo z motorji. Možni nastavitvi elektronskega krmilnika hitrosti s to programsko opremo, ki na predhodniku BLHeli_S nista možni, sta:

- nastavev frekvence komunikacije z motorji glede na velikost propelerjev (24, 48, 96 kHz – večji kot so propelerji manjša je frekvenca);
- sprememba začetne melodije ob vklopu baterije (ESC melodijo zaigra na motorje tako, da njihovo navitje uporabi kot navitje zvočnika, vrteč del motorja pa trese kot membrano).

Sprememba programske opreme ESC-jev nam najbolj služi, če želimo zamenjati smer vrtenja motorjev brez spajkanja žic. Nastavimo lahko tudi čas, po katerem dron začne piskati, saj predvideva, da smo dron izgubili.



Slika 32: BlueJay kofikator

3 Postopek izdelave naprave

3.1 Izdelava 3D tiskanega okvirja

Pri raziskovanju spletnih virov sem ugotovil, da se s 3D tiskanim okvirjem leti tako dobro kot s karbonskim. Ker imam 3D tiskalnik, sem se odločil, da bom okvir za letalnik natisnil. S tem sem veliko prihranil. Ker nisem poznal mer in ker so na medmrežju dostopni zelo dobri okvirji za 5-inčne FPV drone, sem uporabil že narejen model.

Okvir Peon 230 sem izbral zaradi dizajna, na katerega lahko zaradi univerzalnih odprtih priklopimo skoraj vsako komponento kakršnekoli dimenzije. Prav tako je okvir zasnovan tako, da nam ob morebitnih zlomih nog ni potrebno zamenjati celotnega okvirja.

Prvi okvir sem natisnil iz PLA materiala, ki je eden najboljših za 3D tiskanje. Okvir sem utrdil z vijaki; za distančnik, ki držijo zgornjo in spodnjo ploščo, pa sem uporabil plastične cevke. Glavni nosilni plošči sem natisnil s 30 % napolnjenostjo, noge pa s 70 %.

Polomljene noge sem nato menjal s 100 % zapolnjenimi, prav tako nosilne plošče. Ker so se PLA deli kljub temu zelo lomili, sem jih zamenjal s PETG. PETG ob obremenitvi ne počí kot PLA ampak je bolj prožen.

Končni okvir sem naredil iz PETG materiala. Tokrat sem natisnil tudi distančnike, saj so lažji kot kovinski in trši kot cevke. Natisnil sem tudi nosilec za FPV in akcijsko kamero. Naredil sem 3D modele gumijastih distančnikov za blaženje tresljajev akcijske kamere in jih stiskal z fleksibilnim filamentom. Z enakim materialom sem natisnil tudi nosilec za akcijsko kamero.



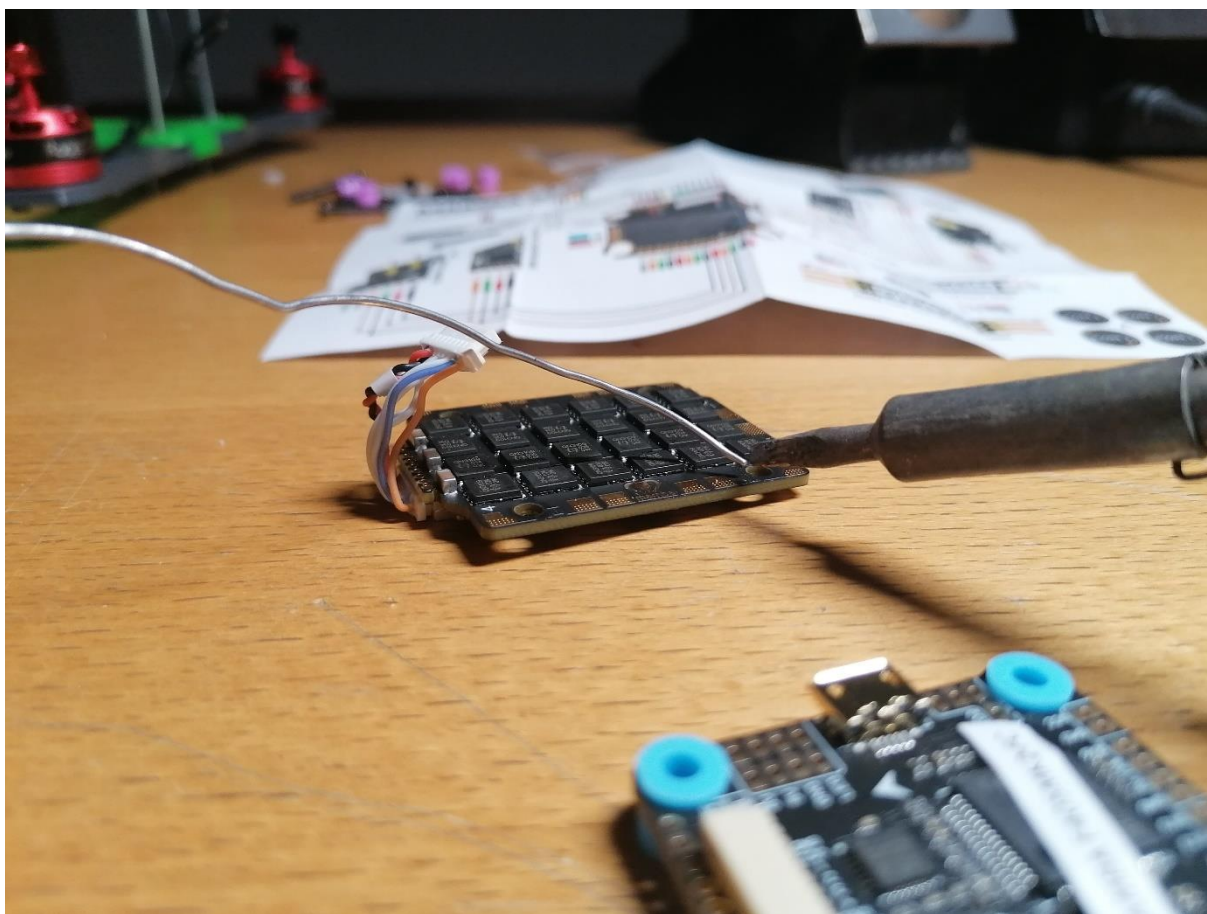
Slika 33: 3D natisnjen okvir

3.2 Postopek sestave

Sestave drona sem se lotil s priklopom motorčkov na elektronski krmilnik hitrosti. Za zgled sem imel navodila, ki so bila priložena h kompletu FC in ESC-ja. Pazil sem, da so bili motorčki glede na usmerjenost puščice na krmilniku leta, ki pomeni smer leta, razporejeni tako, da so se označene smeri vrtenja na shemi in motorčkih ujemale. Porajalo se mi je vprašanje, kako pravilno priklopiti brezkrtačni motor, saj ni bilo nobene oznake, kam katera od treh žic sodi. Poizvedoval sem na spletu, a nisem našel ustrezne razlage. Zato sem predvideval, da je vseeno, kako jih priklopim.

Nato sem priklopil FPV kamero na 5V napajanje in video vhod. Zatem pa še video oddajnik na 9V napajanje, video izhod in funkcijo smart audio, ki sem jo priklopil na oddajniški pin UART 3 (Tx3). S priklopom kamere na krmilnik letenja in ne direktno na oddajnik sem krmilniku omogočil dodajanje podatkov na video (On Screen Display). Dodal sem še daljinski sprejemnik, ki sem ga poleg napajanja priklopil še na pin SBUS.

Komponente sem pritrdil na prvi 3D tiskan okvir. Pri pritrditvi motorjev sem pazil, da nisem izbral predolgh vijakov, ki bi poškodovali navitje. Na vijake pod elektronskim krmilnikom hitrosti in krmilnikom letenja sem namestil gumijaste blažilnike tresljajev, ki rahlo ublažijo tresenje. Vse ostale komponente sem nato prilepil na okvir.



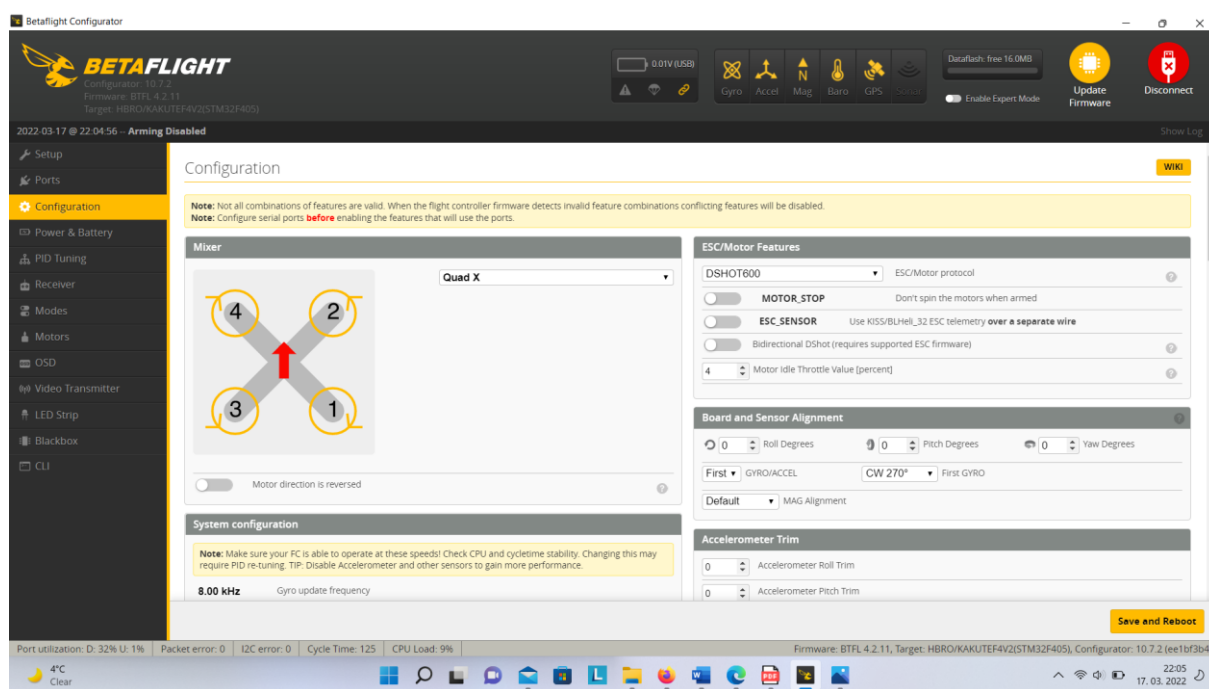
Slika 34: Začetek izdelave

3.2.1 Konfiguracija programske opreme

Začel sem z nastavljanjem programske opreme krmilnika letenja v programu betafight. Najprej sem jo posodobil. Po namestitvi, so bili prikazani neobičajni podatki, ki jih nisem mogel spreminjati. Ugotovil sem, da sem namestil verzijo za drug krmilnik. Po popravku je krmilnik deloval pravilno.

Potem sem vzpostavil komunikacijo med daljinskim upravljalnikom in sprejemnikom. Način komunikacije krmilnika s sprejemnikom sem nastavil na IBUS, zatem sem na sprejemniku pritisnil bind gumb in mu z vklopom baterije zagotovil napajanje. Lučka na sprejemniku je začela hitro utripati. Po ponovitvi postoka na oddajniku je ta na zaslonu izpisal »binding...«, lučka na sprejemniku je prenehala utripati, kar je pomenilo vzpostavljeno komunikacijo. Da komunikacija deluje, sem se prepričal v betafightu, kjer so se ob premiku krmilnih palčk premikali njim pripadajoči kanali.

Na stikalo daljinskega upravljalnika sem nastavil funkcijo »arm«. Ta, krmilniku sporoči, da smo pripravljeni na let in sproži vrtenje motorjev. Napolnil sem baterijo, namestil propelerje in se odpravil na prvo testiranje.



Slika 35: Konfiguracija programske opreme

3.3 Testiranje in odpravljanje problemov

3.3.1 Prvo testiranje

Vklopil sem baterijo. Na zaslonu video sprejemnika so bili mravljinci. Poiskal sem frekvenco oddajanja in dobil brezhibno sliko. Preizkusil sem preklopiti oddajnik na višjo moč. Na višji moči videa nisem dobil. Kasneje sem ugotovil, da je bil problem v priklopu video oddajnika na 9V in ni imel dovolj visoke napetosti za ustrezno delovanje.

Zagnal sem motorje, dodajal sem plin. Plin sem dodal skoraj do konca, dron pa ni vzletel. Izklopil sem motorje in jih ponovno prižgal, ob vklopu so začeli neenakomerno pospeševati. Opazil sem, da na dronu ni vse v redu in preveril. Med testiranjem so se žice motorčkov snele in propeler je na dveh motorjih zbrusil izolacijo.

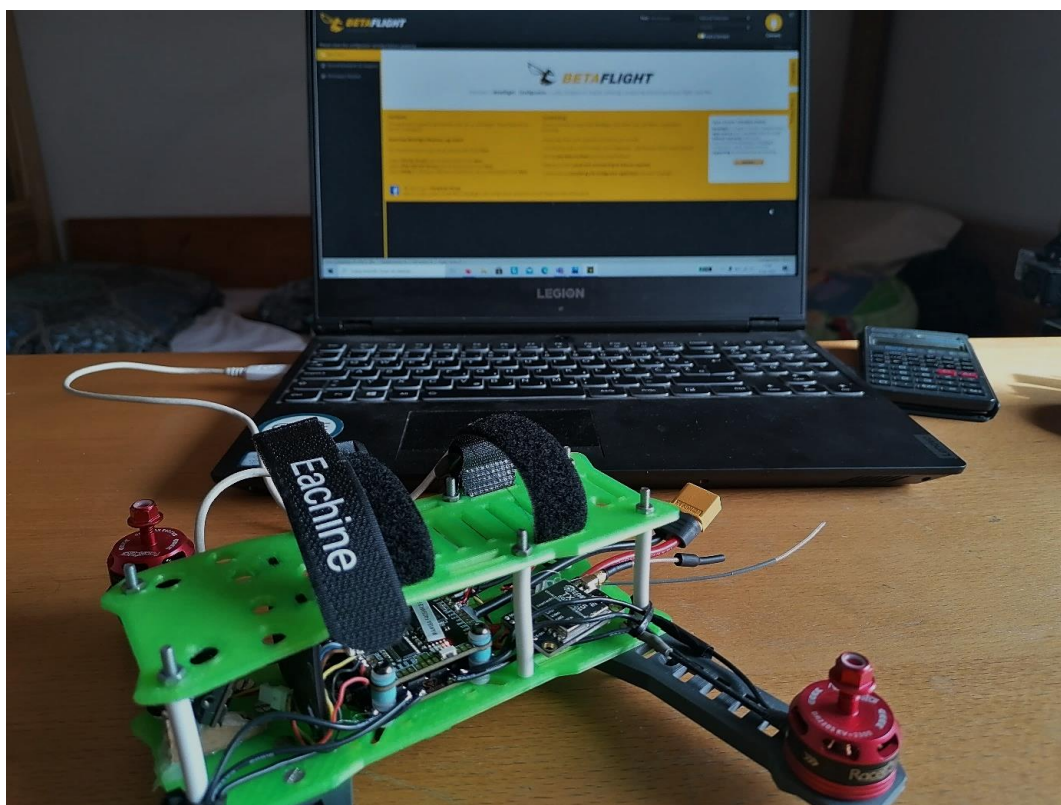
Vrnil sem se v delavnico in preveril stanje krmilnika, ki se ni več povezal z računalnikom. Od petih indikatorskih lučk na krmilniku leta je gorela samo oranžna za mikroprocesor. Ta je bil zelo vroč. To je pomenilo, da sta se dve zbrušeni žici na motorčkih dotaknili in povzročili kratek stik, ki je uničil mikroprocesor. Mikroprocesorja nisem mogel zamenjati, saj je v SMD obliki, zato sem naročil nov krmilnik.



Slika 36: Prvo testiranje

3.3.2 Prvo odpravljanje problemov

Lotil sem se popravila. Zbrušene žice sem pospajkal in čeznje dal termo skrčke za zaščito. Ko sem dobil nov krmilnik, sem ga zamenjal s starim in spet začel z nastavljanjem programske opreme. Tokrat sem nastavil tudi predvajanje na zaslonu (OSD). Na zaslon sem dodal prikazovanje informacije o povprečni napetosti na celico, trenutnem porabljenem toku, napis obvestil in čas leta. Testiral sem delovanje motorjev, a se ob sprožitvi stikala niso odzvali. Z raziskavo sem ugotovil, da ob vklopu baterije manjkata zaključna tona, kar pomeni, da krmilnik leta ne komunicira s krmilnikom hitrosti. Problem je bil v protokolu za komunikacijo. Ko sem ga spremenil na Dshot 600, so se motorji začeli vrteti. Stestiral sem tudi failsafe (varnostni padec). To sem storil tako, da sem pognal motorje in ugasnil daljinski upravljalnik. Motorji se morajo po izklopu ugasniti v nekaj sekundah. To je enako, kot če bi med letom zmanjkalo signala in bi dron padel na tla ter ne bi odletel po svoje. Motorji se niso ustavili. Vseeno sem se odločil dron testirati, vendar na takšni razdalji, da ne morem izgubiti signala.



Slika 37: Odpravljanje problemov

3.3.3 Ponovno testiranje

Ob vklopu baterije so motorji zapiskali petkrat, tako sem vedel, da komunikacije delujejo in je dron pripravljen na let. Sprožil sem »arm« stikalo, da so se motorji začeli vrteti. Ob dodajanju plina je poskakoval, namesto da bi letel.

Problem sem začel odpravljati z raziskavo. Ugotovil sem, da se dva od motorjev vrtita v napačno smer. Problem sem rešil z menjavo dveh od treh žic na motorjih, ki sta se vrtela v napačno smer.

Napaka je bila odpravljena in dron sem prvič dvignil v zrak. Preko zaslona sem spremljal stanje baterije, prikaz porabe toka ni deloval. Pri naslednjem poskusu, sem dron spustil malo višje, upravljanje je bilo zelo zahtevno, saj je bil način letenja, ki sem ga nastavil, »acro trainer« (treniranje akrobatskega načina – dron se ne izravna sam, varnostno se ne more obrniti na glavo, takrat še drugega načina nisem poznal). Nato sem dron obrnil okoli njegove osi, da je gledal proti meni. Ker sem dron upravljal, s pogledom s tal, brez gledanja na zaslon, so se mi v tistem hipu obrnile vse komande. Dron mi je ušel izpod nadzora; da ga ne bi izgubil, sem izklopil motorje.

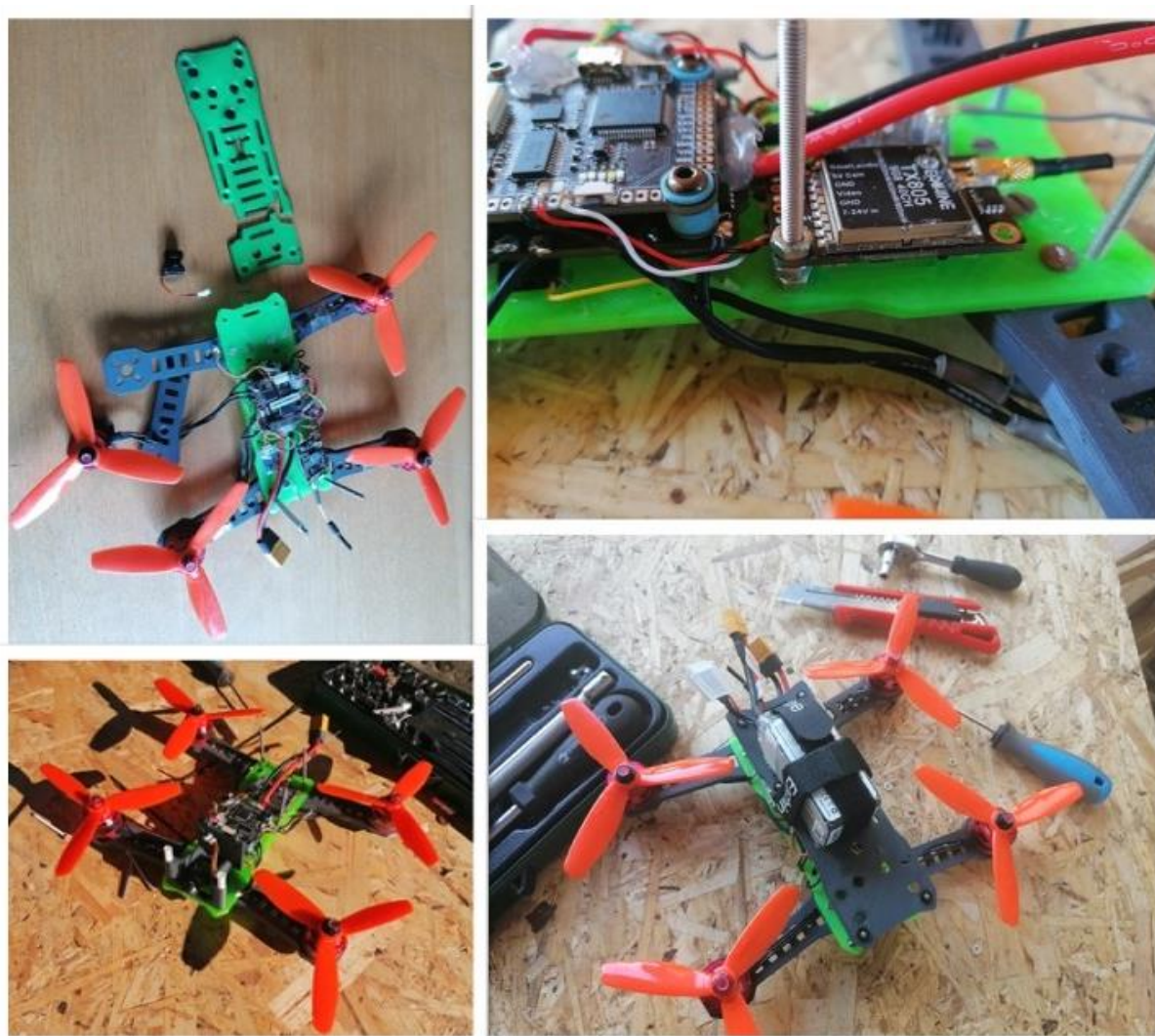
Ob padcu sem izgubil video signal. Ko sem našel dron, sem ugotovil, da se je to zgodilo zaradi izpoljene baterije. Zaradi udarca na kamnito ograjo, sem zlomil nogo, zgornjo nosilno ploščo in podrčnil baterijo, ki bi lahko ob predrtju zagorela.



Slika 38: Polomljen dron

3.3.4 Ponovno odpravljanje problemov

Ponovno sem se lotil popravila. Natisnil sem novo gornjo nosilno poščo in nogo, obe tokrat s stoodstotno napolnjenostjo. Da žice motorjev niso visele naokrog sem jih napeljal skozi noge letalnika. Video oddajnik sem privijačil na enega od nosilnih vijakov, da je bil trdno pritrjen, še vedno pa sem ga lahko porinil ven in ročno spremenil frekvenco oz. moč oddajnika. Pine s prispajkanimi žicami sem zalil z vročim lepilom, da ne bi prišlo do kakšnega kratkega stika. Baterijo pa sem, da ne bi spet zdrsnila iz pritrdilnih trakov, zapel navzkrižno. Kasneje sem ugotovil, da imajo profesionalni piloti, ki baterije pripnejo samo počez, pod baterijo gumijasto podlago, ki baterijo drži na mestu. Na dronu sem imel samo gladko plastiko, zato je baterija tudi zdrsnila z ježkov in priletela ob tla.



Slika 39: Popravilo letalnika

Po popravilu zrakoplova sem se spet odpravil letet. Letel sem v acro-trainer načinu, ker drona nisem dobro obvladal, sem se zaletel v veje drevesa in ponovno zlomil nogo. Ob tem sem se odločil za nakup novega filameta (nitke za tiskanje) PETG. Natisnil sem nove kompaktnejše noge in jih namestil na letalnik. Začel sem s treniranjem leta v simulatorju FPV Freerider. Preletel sem pet ur.

Na daljinski oddajnik sem dodal angle način, ki ga s stikalom lahko preklopim na acro-trainer in acro. Ugotovil sem, da je angle način res slab za nadaljnje letenje v akrobatskem ali zračnem načinu, kot sem izvedel na spletu, vendar zelo dober za začetnike, saj se letalnik uravnava sam.

Dron sem testiral. Postavil sem ga na vzletišče in počasi dodajal plin, dron se je dvignil in letel, če sem dodal veliko plina pa se je prevrnil na stran. Problem je bil z enim od motorčkov, ki se je ustavljal ob višji obremenitvi. Kljub temu sem letel z nizkim plinom in zlomil nogo iz PETG materiala. Ko sem jo zamenjal, sem spet testiral. Dron se je nekajkrat prevrnil a je vseeno letel. Prvič sem dosegel višino okrog 10 m in letel okrog pol minute brez padca, nato sem pristal. Dobil sem več samozavesti za letenje. Dron sem spet dvignil pri nizkem plinu okrog 5 m v zrak, nato se je motorček ustavil in dron je padel na tla. Okvir je bil poškodovan, ob vklopu baterije pa ni bilo več zadnjih dveh piskov. Ob pregledu sem ugotovil, da se mikroprocesor spet zelo segreva. Krmilnik letenja je bil znova uničen.



Slika 40: Dron po padcu

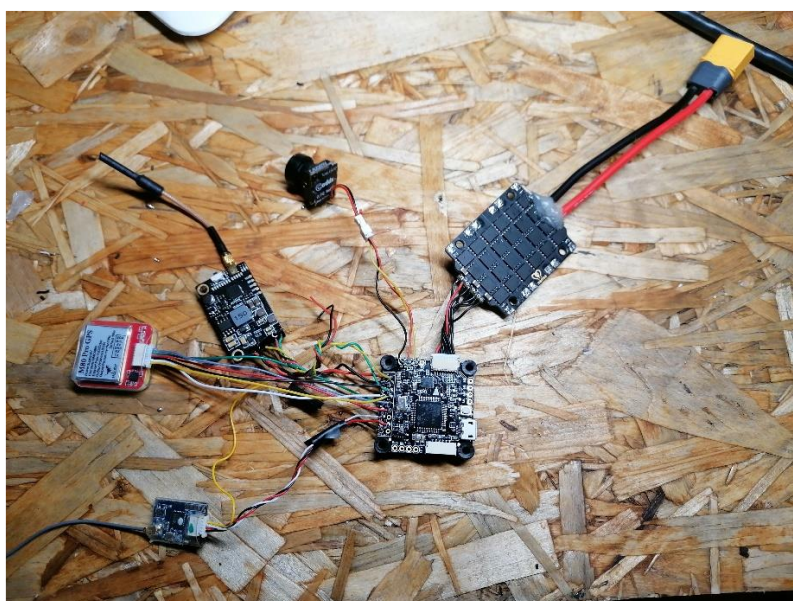
3.3.5 Končna izdelava

Naročil sem nov, dražji krmilnik letenja, zraven pa še GPS in boljši anteni. Po padcu sem moral zamenjati večino okvirja, saj razen treh nog ni ostalo nič celega.

Med čakanjem na dele sem naredil nov okvir s 100 % napolnjenostjo iz PETG materiala (nekaj delov tudi iz fleksibilnega material). Ogrodje sem za zaščito pobarval in ga sestavil. Novo nogo letalnika sem tokrat natisnil s pravokotnimi plastmi in ne diagonalnimi, da bi zdržale večje obremenitve. Ko sem dobil krmilnik, sem vso elektroniko prispajkal skupaj. Nato sem dron sestavil. Žic motorjev nisem več napeljeval skozi noge, saj jih je bilo nepraktično odspajkovati, ko sem rabil noge menjati.



Slika 41: Barvanje okvirja

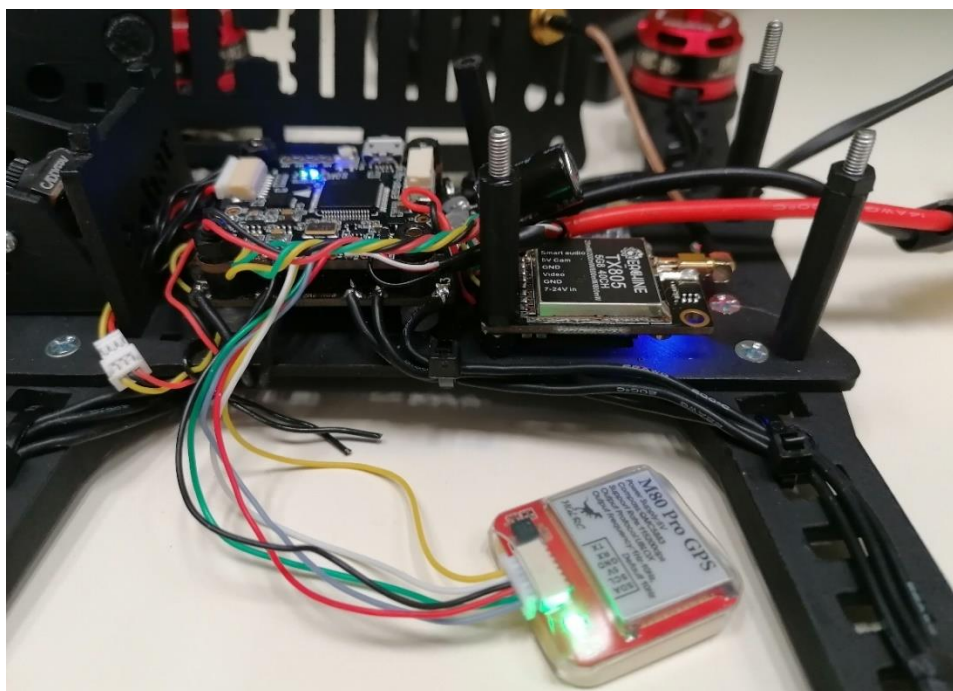


Slika 42: Povezane komponente

Ponovno sem začel z nastavitvami programa drona na nov krmilnik. GPS se mi ob priklopu napajanja ni povezal z krmilnikom, lučka na njem pa je gorela. Napaka je bila v priklopnih pinih, saj sem povezal Tx na Tx in Rx na Rx. Tx (oddajanje) moramo priklopiti na Rx (sprejemanje). Da bi skonfiguriral motorčke, sem v dron vklopil baterijo. Iz drona sem je pokadilo. Krmilnik letenja je ob povezavi z računalnikom še vedno deloval, kar je bil zelo dober znak. Nato sem odkril napako. Video oddajnik je imel priklopljene zelo drobne žice. Med prestavljanjem se je tista za napetost snela in naslonila na minus, kar je vodilo do kratkega stika.

Po njem video oddajnik ni več deloval, prav tako tudi B+ pin na krmilniku (pin celotne napetosti baterije). Po pogovoru s starejšimi dijaki sem izvedel, da je video oddajnik zaradi velike porabe bolje priklopiti neposredno na napajanje baterije, kot na pine krmilnika. Oddajnik, ki sem ga imel na zalogi, mi je tako prišel prav. Priklopil sem ga neposredno na napajanje, vzporedno pa tudi kondenzator, ki ohranja napetost ob velikih pospeških, da ne pade preveč in ne izgubimo video signala.

Nadaljeval sem z nastavitvami programske opreme. Ob zagonu določenega motorja na računalniku se ni zagnal pravi motor na dronu. To sem odpravil v ukazni vrstici, kjer sem zamenjal vire motorjev na pinih mikroprocesorja. Smer vrtenja motorjev sem moral nastaviti v pravo smer. To sem tokrat naredil z BlueJay konfiguratorjem. Prav tako sem nastavil drug začetni zvok.



Slika 43: Elektronske komponente na okvirju

Na nov krmilnik sem priklopil tudi LED trak in nastavil stalno oranžno barvo na sprednje noge, na zadnje dve pa barvo, ki jo lahko spreminjam z obračanjem potenciometra na daljinskem upravljalniku. LED trak pa ni omejen na nastavljene barve, preko OSD nastavitvev lahko barvo traku spremenimo na večino osnovnih barv.

Z vnosom karakteristik video oddajnika in konfiguracijo, sem omogočil smart audio (spreminjanje frekvence, moči oddajanja preko OSD nastavitvev). Za bolj natančno vodenje letalnika sem nastavil tudi končne toče in središča kanalov, da je upravljanje čim bolj natančno. Na prost kanal med daljinskim oddajnikom in sprejemnikom sem dodal indikator moči signala. Ta mi na zaslonu prikazuje moč signala daljinskega upravljalnika. Dodal sem tudi več funkcij na stikala daljinskega upravljalnika. Od leve proti desni sem dodal:

- Piskanje;
- Načina leta Headfree in flip over after crash;
- Izklop led traku in GPS reševanje;
- Upravljanje barv LED traku;
- Angle, horizon in air načine leta;
- Zagon motorjev »arm«.



Slika 44: Prikaz funkcij stikal in potenciometrov

Piskanje sem dodal, da dron lažje najdem ob padcu. Haedfree način, da lahko letim brez očal, ne glede na obrnjenost drona (po osi z), bo dron, ko bom dal ukaz za naprej šel stran od mene. Flip over after crash omogoči, če dron ob padcu pade na glavo, se mi na zaslonu očal izpiše smer optimalnega obrata, v katero porinem palčko daljinskega oddajnika in dron se obrne v tisto smer pokonci. Tako lahko priletim nazaj brez pobiranja letalnika. Na začetku potenciometra, ki upravlja kanal, imam LED trak izklopljen, s premikom ga vklopim, na skrajni legi pa se vklopi reševanje (vračanje). GPS reševanje sem dodal, da lahko testiram, če reševanje deluje in se dron vrne nazaj na vzletno točko. Z drugim potenciometrom upravljam barvo LED traku na zadnjih nogah letalnika. Angle, horizon in air so načini letenja, ki jih preklapljam s predzadnjim stikalom. Pri angle načinu se dron sam uravnoveša v vodoravno lego, enako tudi pri horizon le, da lahko naredi tudi premete. Pri air načinu se dron ne uravnoveša, saj je prepuščen našim spretnostim. Skrajno desno stikalo uporabljam za zagon motorjev. Skrajno desnega uporabljam zato, da lahko z desno držim upravljalnik, priletim nad sebe in v zraku izklopim motorje ter si dron podam v levo roko.

Motorček, s katerim sem imel probleme, sem razstavil, ga očistil in poskusil, če deluje bolje; ker ni bilo izboljšanja, sem uporabil drug motorček.

Sprejemnik FS-A8S mi je s povezavo na daljinski upravljalnik FS-i6x prenehal delovati, zato sem ga zamenjal z FS-IA6B in tako preveril, če je težava v sprejemniku ali v programski opremi. Na tem sprejemniku so se kanali odzivali. Poskusil sem, če varnostni padec (failsafe) deluje. Motorji se niso ustavili, ampak so počasi začenjali pospeševati. Zato sem se lotil odpravljanja problema in raziskovanja kako bi se motorji ob izgubi signala izklopili. Problem sem rešil tako, da sem na daljinskem oddajniku spremenil protokol oddajanja iz IBUS na SBUS prav tako na krmilniku leta.



Slika 45: Izdelan FPV dron med preizkusom

Z novim motorčkom je dron začel delovati. Tako sem dobil priložnost, da sem prvič letel tako dolgo, da sem spraznil baterijo.



Slika 46: Letenje z FPV dronom



Slika 47: Frankolovo iz zraka



Slika 48: Doma izdelan FPV dron



Slika 49: Povezava do posnetka poleta

3.4 Testiranje okvirja iz ogljikovih vlaken

Da bi raziskal pravilnost hipoteze, sem preizkusil letenje drona z okvirjem iz ogljikovih vlaken (carbon fiber). Z letenjem sem ugotovil, da je tak dron bolj stabilen. Ko vzletim, ga manj zanaša kot 3D natisnjenega. Največja prednost pa je, da se skoraj nikoli ne zlomi. Med testiranjem sem letel zelo nizko in se večkrat zaletel v drevo, dron je ostal cel. 3D natisnjen okvir je ostal nepoškodovan le ob redkih padcih, na karbonskemu pa po padcih ni bilo nobenih poškodb.

4 Razprava

Pred začetkom raziskovanja sem postavil hipoteze, ki sem jih skozi raziskovanje preveril:

- Z doma narejenim FPV dronom bom lahko posnel akcijski posnetek.

To hipotezo lahko povsem **potrdim**. Posnel sem akcijski posnetek. Ob tem je potrebno poudariti, da je bila pot do posnetka zelo dolga in zahtevna. Možna je pod pogojem, da ima izdelovalec dovolj časa, orodij in znanja, ki ga pri izdelavi potrebuje. Poleg osnovnega znanja elektronike, ki ga pridobivam v srednješolskem izobraževanju, sem potreboval mnogo dodatnega znanja, ki sem ga pridobival iz drugih virov. Imel sem dovolj znanja, časa in orodji, ki jih uporabljam za izdelovanje raznih projektov ter raziskovanje.

- Izdelam lahko cenovno ugodnejši dron, kot je DJI FPV combo, ki je z njim primerljiv.

To hipotezo lahko **delno potrdim**. Strošek materialov doma izdelanega FPV letalnika se giblje okrog 200€, celotnega kompleta pa okrog 400€. To je precej manj v primerjavi z DJI FPV combom, ki stane okrog 1 300€. Izdelan dron lahko leti, približno 8 min, DJI-jev pa 20 min. Hitrosti in zmožnost snemanja sta pri obeh dronih primerljivi. Moj izdelek ponuja dodatne možnosti nadgradnje in poceni rezervne dele. Za ceno ene DJI-jeve baterije jih za svoj dron dobim pet.

- Doma narejeni dron bo lahko dosegel hitrost 100 km/h.

To hipotezo, lahko v celoti **potrdim**, saj sem z dronom dosegel hitrost 110 km/h. Hitrost lahko še povečam z uporabo lažje baterije in z drugim načinom leta, ki ga še ne obvladam. Način omogoča večji naklon letalnika in pri najvišjem pospešku ne bom tako hitro pridobival na višini ampak bo več navora porabljenega za hitrost. Z nadgradnjami bi lahko dosegel hitrost vsaj 160 km/h.

- Letenje z dronom bo preprosto.

To hipotezo lahko na podlagi svoje subjektivne izkušnje leta **ovržem**. Letenje letalnika je izredno zahtevno že v ravnovesnem načinu. Da obvladamo letenje, ko ima pilot popoln nadzor potrebujemo ogromno izkušen iz simulatorja. Dron leti kamor ga usmerim, dokler mu ne dam drugačnega ukaza, tudi, če ga obrnem na glavo. Sam ga po več kot letu raziskovanja še vedno ne obvladam.

- 3d tiskan okvir bo tako dober kot tisti iz ogljikovih vlaken.

To hipotezo lahko **delno potrdim**. Letenje z obema okvirjema je primerljivo, 3D natisnjen okvir je nekoliko lažji, pri padcih pa se hitro zlomi. Okvir iz ogljikovih vlaken se zelo težko zlomi, njegov problem pa je, da deluje kot Faradayeva kletka, kar lahko onemogoči GPS, oddajane oz. sprejemane signale, ki so potrebni za delovanje.

- Doma narejen dron bo podpiral napredne funkcije (vračanje, izpis stanja baterije, piskanje v primeru izgube drona).

To hipotezo lahko v celoti **potrdim**. Dron podpira vse naštete funkcije, ki so boljše kot sem si jih zastavil. Poleg izpisa stanja baterije, se mi na zaslonu očal izpišejo še: opozorila, način leta, trenutna poraba toka, moč signala daljinskega upravljalnika, hitrost, višina, oddaljenost in smer vzletne točke ter preletena razdalja. Piskanje lahko sprožim s stikalom na daljinskem upravljalniku oz. se sproži samo, če zmanjka signala. Na dron sem dodal še druge funkcije kot so: obračanje po padcu na glavo, upravljanje barv LED traku ...

5 Zaključek

S potekom raziskovanja sem zelo zadovoljen, saj sem presegel vsa svoja pričakovanja. Ko sem že imel dele letalnika in za sabo veliko raziskovanja, si nisem predstavljal, da bom lahko s temi deli toliko dosegel. To mi je uspelo s pravilno uporabo delov in dobro nastavljeno programsko opremo. Takrat nisem vedel, da obstajajo možnosti spreminjanja nastavitvev preko OSD sistema, prikaza jakosti signala daljinskega upravljalnika, samodejnega vračanja, sprožitve piska ob izgubi, profil z omejeno hitrostjo, če dron posodim, uporaba LED traku in z njim tudi indikacija moči oddajnika, stanja baterij, dodajanja plina, spreminjanje barv ...

Med raziskovanjem sem spoznal mehansko in programsko delovanje FPV dronov. S poglobljanjem v posamezne komponente sem jih lahko izboljševal in izboljševal tudi celoto. V mojem primeru je bilo letenje FPV drona le približno 5 % dela z njim. Ostalih 95 % pa so bila stalna popravila in izboljšave. Med raziskovanjem sem se naučil upravljanja naprav in prenašanja videa preko brezžičnih komunikacij. Naučil sem se tudi pravilno vzdrževati baterije in dobro pridobivati podatke s spleta. Skozi raziskovanje sem dokazal, da se lahko lotim zahtevnega projekta in da moram vztrajati klub neuspehom. Pri raziskavi mi je največ pomenilo druženje z dijaki višjih letnikov, ki tudi pripravljajo različne projekte, saj so me naučili več kot ure šolske prakse.

Letalnik je mogoče nadgraditi. 3D natisnjen okvir bom zamenjal z okvirjem iz ogljikovih vlaken. Zamenjal in nadgradil bi lahko osnovne komponente kompleta, prav tako tudi posamezne dele drona. Možnosti nadgradnje so tudi v programski opremi (PID nastavitve).

Raziskava je pokazala samo majhen del možnosti, ki obstajajo v FPV tehnologiji. Je samo izhodišče za nadaljnjo raziskovanje.



Slika 50: Doma izdelan FPV dron pred poletom

6 Viri

All About Multirotor Drone Batteries:

<https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multirotor-fpv-drone-battery/>,
dostop 1. 3. 2022.

Betaflight 3.4 & 3.5 Setup For Total Beginners:

<https://www.youtube.com/watch?v=xmaTq4JgTXI>, dostop 23. 2. 2022.

DJI Digital FPV System:

<https://www.dji.com/si/fpv>, dostop 4.3. 2022.

FPV Analog vs Digital System:

<https://dronenodes.com/fpv-analog-vs-digital-systems/>, dostop 4. 3. 2022.

FPV Drone ESC Buyer's Guide:

<https://oscarliang.com/choose-esc-racing-drones/#support-for-active-braking-and-hardware-pwm>, dostop 7. 3. 2022.

FPV Drone Flight Controller Explained:

<https://oscarliang.com/flight-controller-explained/>, dostop 7. 3. 2022.

How to Build an FPV Drone From Scratch (Analog FPV System):

<https://oscarliang.com/build-fpv-drone-analog/>, dostop 11. 3. 2022.

How to Choose FPV Drone Motors:

<https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>, dostop 8. 3. 2022.

How to Flash Bluejay Firmware to BLHeli_S ESC:

<https://oscarliang.com/bluejay-blheli-s/>, dostop 12. 3. 2022.

How to Setup Betaflight Firmware:

<https://oscarliang.com/betaflight-firmware-setup/>, dostop 11.3. 2022.

TATTU FUNFLY 1550mAh 14.8V 100C 4S1P:

<https://www.lipo.si/izdelek/G-FF1500/tattu-funfly-1550mah-148v-100c-4s1p>, dostop
2. 3. 2022

The Best FPV Camera for FPV Drones:

<https://oscarliang.com/best-fpv-camera/>, dostop 10. 3. 2022.

The Best Motors and Propellers for FPV Drones:

<https://oscarliang.com/best-motors-props/>, dostop 8. 3. 2022.

The Best Radio Transmitter for FPV Drones:

<https://oscarliang.com/radio-transmitter/>, dostop 1. 3. 2022.

The Best VTX (Video Transmitter) for FPV Drones:

<https://oscarliang.com/top-5-best-vtx-mini-quad/>, dostop 10. 3. 2022.

6.1 Viri slik

Slika 1: https://newsroom.porsche.com/es_ES/deporte-estilo-de-vida/2021/es-porsche-drive-2-extremes-taycan-cross-turismo-christophorus-399-24740.html, dostop 9. 3. 2022.

Slika 2: <https://www.youtube.com/watch?v=f7YMgfjUfGk>, dostop 1. 3. 2022

Slika 4: <https://learn.parallax.com/sites/default/files/download/1835/Multirotor-Flying-Guide-ELEV-8-V2.pdf>, dostop 1. 3. 2022.

Slika 5: https://www.banggood.com/FlySky-i6-FS-i6-2_4G-6CH-AFHDS-RC-Transmitter-Mode-2-With-FS-A8S-8CH-Mini-Receiver-p-1157144.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN, dostop 16. 3. 2022.

Slika 6: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:REN_6045.jpg, dostop 3. 3. 2022.

Slika 7: https://www.eachine.com/Eachine-EV100-720+540-5_8G-72CH-FPV-Goggles-With-Dual-Antennas-Fan-7_4V-1000mAh-Battery-p-996.html, dostop 16. 3. 2022.

Slika 8: <https://oscarliang.com/6s-mini-quad-racing-drone/>, dostop 16. 3. 2022.

Slika 9: <https://www.drone-fpv-racer.com/en/tattu-funfly-lipo-battery-4s-1550mah-100c-3951.html>, dostop 11. 3. 2022.

Slika 11: https://www.banggood.com/IMAX-B6-80W-6A-Lipo-Battery-Balance-Charger-with-Power-Supply-Adapter-p-1401686.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN&ID=47184, dostop 16. 3. 2022.

Slika 12: <https://quadmeup.com/2021/09/29/gopro-hero-10-black>, dostop 6. 3. 2022.

Slika 15: <https://www.flyingtech.co.uk/electronics/holybro-kakute-f4-v23-flight-controller-osd-baro>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 18: https://www.banggood.com/DIATONE-Black-Mamba-F25-25A-2-4S-4-in-1-BLHeli_S-Dshot600-ESC-For-RC-FPV-Racing-Drone-p-1338223.html?cur_warehouse=CN, dostop 15. 3. 2022.

Slika 19: <https://www.getfpv.com/diatone-mamba-basic-stack-f405-mk2-fc-f50-50a-blheli-s-hv-esc.html>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 20: <https://www.amazon.in/RacerStar-BR2205-2300kV-Brushless-Racing/dp/B071SKX5CR>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 21: <https://oscarliang.com/best-fpv-camera-quadcopter/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 22: <https://www.unmannedtechshop.co.uk/product/caddx-turbo-eos-2-fpv-camera/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 23: <https://oscarliang.com/smartaudio-tramp-vtx-control-vtxtables/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 24: <https://oscarliang.com/eachine-tx805-vtx/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 25: <https://quadhut.com/image/cache/catalog/flysky-fs-i6x-2-4ghz-10ch-afhds-2a-rc-transmitter-with-x6b-i-bus-receiver--2456-800x800.jpg>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 26: <https://www.rcgoing.com/flysky-2-4g-6ch-fs-ia6b-receiver-ppm-output-with-ibus-port/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 29: <https://alexnlid.com/product/hglrc-m80pro-flight-controller-gps-qmc5883-compass-module-with-cable-for-fpv-racing-rc-drone/>, dostop 15. 3. 2022.

Slika 30: https://www.banggood.com/Foxeer-Pagoda-Pro-5_8GHz-3dBi-RHCP-FPV-Antenna-86mm-SMA-or-RP-SMA-Black-or-Red-or-Orange-p-1225647.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN&ID=224523628, dostop 16. 3. 2022.

Slike 3, 10, 13, 14, 16, 17, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50: lasten arhiv

IZJAVA*

Mentor **Zupanc Davor** 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 **Letalnik s pogledom prve osebe (FPV dron)**, katere avtor je **Žohar Anton Martin**:

- 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, 13. april 2022



Podpis mentorja

Zupanc

Podpis odgovorne osebe

Lazar

*

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.