

Projektiranje i izvedba kvadkoptera

Bosnar, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:908270>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mario Bosnar

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Mario Essert, dipl. ing.

Student:

Mario Bosnar

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru na ukazanoj pomoći i svim profesorima na predanom znanju koje mi je ovo omogućilo te obitelji i prijateljima na ukazanoj podršci.

Mario Bosnar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mario Bosnar**

Mat. Br.: 0035196846

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje i izvedba kvadkoptera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design and realization of a quadcopter**

Opis zadatka:

Kvadkopter ili kvadrotor je višerotorski helikopter koji se pokreće s 4 rotora. Kvadkopteri obično koriste dva para fiksno nagibnih propelera: dva u smjeru kazaljke na satu i dva u suprotnom. Upravljanje se postiže promjenom brzine rotora. Za razliku od helikoptera koji mijenja nagib rotora za upravljanje svojom pozicijom i brzinom, kvadkopter mijenja samo brzine rotora i tako stvara različite momente oko svoje osi. Zbog svoje male veličine, kvadkopteri su jeftiniji i izdržljiviji od klasičnih modela helikoptera, jer su mehanički jednostavniji.

U ovom radu, potrebno je:


1. Upoznati i objasniti fizikalne zakone letjelica, posebice helikoptera,
2. Proučiti postojeće izvedbe kvadkoptera iz literature i rješenja s Interneta,
3. Konstruirati mehanički 3D model kvadkoptera,
4. Projektirati elektroničko upravljanje i komunikaciju preko Interneta,
5. Napisati programski kod u Python jeziku za temeljne upravljačke algoritme,
6. Realizirati projektirani model i optimirati parametre za kvalitetnije odzive upravljanja,
7. Osmisliti i realizirati paralelno procesiranje višeprocorskog sustava za poboljšanje performansi.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.


Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Mario Essert

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Sadržaj

Popis slika:	II
Popis oznaka:	IV
1. Uvod	1
2. Upoznavanje osnovnih fizikalnih zakona letjelica	2
2.1 Osnovne jednačbe dinamike letjelice.....	2
2.2 Ukratko o aerodinamici zrakoplova.....	4
2.3 Gibanje helikoptera	6
2.3.1 Primitivna teorija propelera	6
2.3.2 Osnove leta helikoptera	7
3. Kvadkopter	10
3.1 Trenutno postojeće izvedbe kvadkoptera	10
3.2 Izrada 3D konstrukcije	15
3.2.1 Nosiva pločica.....	18
3.2.2 Krilo kvadkoptera	20
3.2.3 Udarna opterećenja i lom konstrukcije	25
3.3 Konačna konstrukcija	30
3.4 Projektiranje sustava upravljanja letjelicom	31
3.4.1 Upravljački uređaji	32
3.4.2 Projektiranje komunikacije preko interneta	34
3.4.3 Projektiranje kontrolera leta.....	37
4. Realizacija projektiranog modela	42
4.1 Analiza dinamike letjelice.....	45
5. Zaključak	50
Literatura	51

Popis slika:

Slika 1 Apsolutni i relativni koordinatni sustav iz [1]	2
Slika 2 Sile tlaka na tijelo uronjeno u mirujućí fluid	4
Slika 3 Raspored tlaka na tijelo koje se giba kroz fluid	5
Slika 4 Gibanje krila kroz fluid	5
Slika 5 Shematski prikaz idealiziranog polja strujanja	6
Slika 6 Helikopter u lebdjenju	7
Slika 7 Helikopter u napredujućem letu	8
Slika 8 Helikopter u spuštanju	9
Slika 9 DJI Inspire 1 V2.0 4K HD camera 1900\$	11
Slika 10 DJI Phantom 3 4K Camera 750\$	11
Slika 11 DJI Inspire 2 8677\$	12
Slika 12 MAHATMA shipping drone 40 000\$	13
Slika 13 Prvi dizajn	16
Slika 14 Drugi dizajn	16
Slika 15 Konaćni 3D model	17
Slika 16 Nosiva ploćica i nosivi stupovi	18
Slika 17 Statićka naprezanja ploćice	19
Slika 18 Sklop nosaća motora	20
Slika 19 Sklop krila	21
Slika 20 Dio krila 1	22
Slika 21 Spoj na krilu	23
Slika 22 Dio krila 2	23
Slika 23 Nosać motora	24
Slika 24 Nagib letjelice od 45°	25
Slika 25 3D printanje nosive ploćice	26
Slika 26 Noćica	27
Slika 27 Pomaci noćice uslijed udarnog opterećenja od 50N	27
Slika 28 Pomaci noćice uslijed udarnog opterećenja od 100N	28
Slika 29 Naprezanja uslijed udarnog opterećenja od 100N	29
Slika 30 Konaćni model	30
Slika 31 Primitivna shema cjelokupnog sustava	31
Slika 32 HOTAS	32
Slika 33 Rudder pedals	33
Slika 34 Drone runner, aplikacija za mobitel	34
Slika 35 ESP8266	35
Slika 36 Alcatel prijenosni modem	36
Slika 37 Micropython	38
Slika 38 Promjena poloćaja senzora	39
Slika 39 ADIS 16364	41
Slika 40 MAG3110, magnetometar	41

Slika 41 BMP180, barometar	42
Slika 42 Realiziranje kvadkoptera i testiranje	43
Slika 43 Odziv i pobuda tokom mirovanja.....	45
Slika 44 Linearna pobuda.....	46
Slika 45 Nagla promjena orijentacije	46
Slika 46 Odziv regulatora na kružno gibanje	47
Slika 47 Promjena orijentacije letjelice prilikom isključenog regulatora	47
Slika 48 Odziv regulatora.....	48
Slika 49 Promjena upravljačke veličine i odziv regulatora.....	49

Popis oznaka:

Oznaka	Jedinica	Opis
a_p	[m/s ²]	prijenosno ubrzanje
a_k	[m/s ²]	Coriolisovo ubrzanje
a_r	[m/s ²]	relativno ubrzanje
m	[kg]	masa
$\tilde{\Omega}$	[rad/s]	kutna brzina rotacije Zemlje
a_o^B	[m/s ²]	ubrzanje točke O relativno na B koordinatni sustav
V_r	[m/s]	obodna brzina tijela koje rotira oko Zemlje
ρ točke O	[m]	vektor od središta relativnog koordinatnog sustava do točke O
g	[m/s ²]	gravitacijsko ubrzanje
f_m	[m/s ²]	vektor masenih sila
p	[N/m]	statički tlak
ρ	[kg/m ³]	gustoća
C_L	[-]	koeficijent uzgona
F_i	[N]	sila

Sažetak

Jedna od najaktivnijih grana robotike bavi se izradom bespilotnih letjelica. Njihova svrha je mnogobrojna. Od fotografiranja raznih scenarija, do mjerenja u geodeziji, raznošenja pošte, nadziranje prostora itd. Isto tako, razmatra se uporaba i u ostalim područjima, poput medicine, građevinarstva, manipuliranje objektima unutar industrije, hitne intervencije, prijevoz... Očito je da su mogućnosti primjene mnogobrojne.

Ovaj rad se bavi projektiranjem i realizacijom kvadkoptera. Razrađuju se problemi nastali prilikom programiranja raznih komunikacija između upravljačkih uređaja te između upravljačkih i mjernih sustava. Objasnjava se način upravljanja letjelicom.

Praktični dio rada sastoji se od potpune realizacije projektirane i modelirane letjelice te testiranja i analize ponašanja te iste letjelice tokom leta.

Ključne riječi: quadrotor, bespilotna letjelica, kvadkopter

1. Uvod

Kvadkopter je bilo koji zrakoplov sa četiri rotora. Navedena vrsta letjelice pripada podjeli bespilotnih letjelica (engl. UAV, unmanned aerial vehicle). Njihova primjena obuhvaća svakim danom sve veći broj sektora.

Neki od njih su:

- Industrija filmova
- Sport i ostale rekreativne aktivnosti
- Nadzor
- Vojna industrija
- Privatna uporaba
- Novinarstvo

Prvi put kad se UAV spominje u povijesnim zapisima je 12.7.1849. godine, kada je Austrija napala Veneciju. Podigli su u zrak tzv. bespilotne balone (engl. unmanned balloons) koji su bili puni eksploziva. Jedan dio balona je stigao do cilja, ali manji dio ih se vratio zbog vjetera i pao na Austrijske linije.

Dalje se, kroz povijest, ova vrsta letjelica razvija isključivo za vojnu uporabu. Tek prije desetak godina UAV postaje dio i ostalih industrija te započinje nagli razvoj. Prvo u području raznih mjerenja, a konačno u industrijama zabave, gdje nastaje još veća potražnja.

Polako se uvodi primjena u sektore poput građevinarstva (trenutno za razna mjerenja), pošta (dobro poznati Amazon dronovi), a možda s vremenom postane dio industrija sa serijskom proizvodnjom dobara, medicine, javnog prijevoza itd.

Teško je predvidjeti gdje se sve može koristiti ovaj oblik letjelica. Možda će jednog dana služiti za popravljavanje raznih zrakoplova tokom leta tog istog zrakoplova. Jedan od trenutnih zidova koje treba prekoračiti je poboljšanje komunikacije UAV-a i korisnika. Upravo to pitanje komunikacije dotiče se u ovom radu te se primjenjuje jedna od mogućih solucija, a to je uporaba interneta kao medija za prijenos informacije, umjesto brže ali i ograničenije radio komunikacije.

Ovaj rad bavi se problematikom izrade jednostavnijeg tipa bespilotne letjelice, odnosno kvadkoptera (engl. quadcopter). To je letjelica manjih dimenzija s četiri aktuatora. Jasno će se prikazati koji su temeljni dijelovi kvadkoptera, uključujući mehaničke, energetske, upravljačke i mjerne sustave.

Dokazat će se da je potreban opseg znanja, kako bi se izradila ovakva vrsta letjelice, i dalje prilično velik. Posljedica toga je i velika cijena, što rezultira neiskorištavanjem potpunog funkcionalnog kapaciteta ovih letjelica.

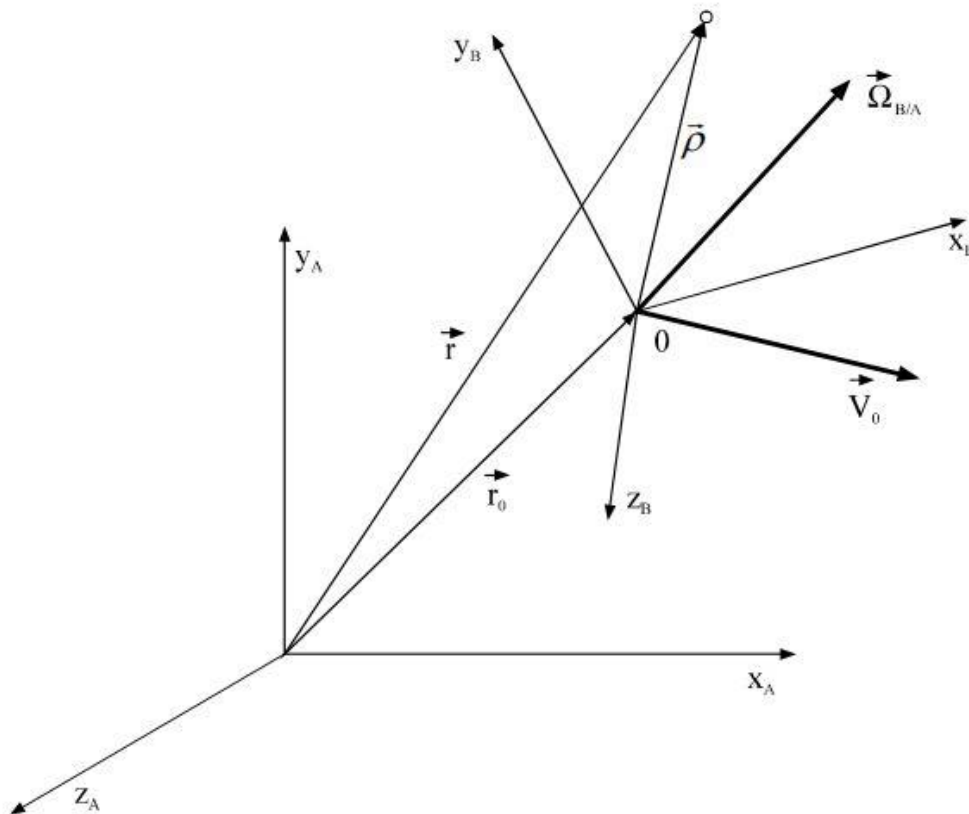
2. Upoznavanje osnovnih fizikalnih zakona letjelica

2.1 Osnovne jednadžbe dinamike letjelice

Na početku, kako bi se lakše razumjela korištena terminologija, moraju se objasniti pojmovi apsolutnog i relativnog koordinatnog sustava.

Relativni koordinatni sustav se nalazi u središtu letjelice te se giba s obzirom na apsolutni koord. sustav.

Apsolutni koordinatni sustav se nalazi, u ovom slučaju, na Zemljinoj površini te ne mijenja svoju poziciju.



Slika 1 Apsolutni i relativni koordinatni sustav iz [1]

Na slici su prikazani apsolutni (x_a, y_a i z_a) i relativni (x_b, y_b i z_b) koordinatni sustav. Vektor \vec{r} opisuje položaj točke o s obzirom na koordinatni sustav A, za koji vrijedi $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{\rho}$. Odnosno,

vektor \vec{r} je jednak zbroju vektora pozicije relativnog koordinatnog sustava naspram apsolutnog (\vec{r}_0) i vektora pozicije točke o naspram relativnog koordinatnog sustava ($\vec{\rho}$).

Pošto letjelica ne leti ravno već rotira oko Zemlje, ona ustvari ima kutnu brzinu. Ta kutna brzina izražena je vektorom $\vec{\Omega}_{B/A}$.

Iz [1] vrijedi da je akceleracije točke o jednaka zbroju prijenosnog, Coriolisovog i relativnog ubrzanja

$$a = a_p + a_k + a_r \quad (1.1)$$

gdje je prijenosno ubrzanje jednako

$$a_p = a_o^B + \tilde{\epsilon}\rho + \tilde{\Omega}\tilde{\Omega}\rho, \quad (1.2)$$

(prijenosno ubrzanje jednako je zbroju ubrzanja točke o oko koord. sustava B , relativnog translacijskog ubrzanja vektora ρ i ubrzanja posljedice rotacije relativnog koordinatnog sustava B)

Coriolisovo ubrzanje, koje je posljedica rotacije Zemlje, glasi

$$a_k = 2\tilde{\Omega}V_r \quad (1.3)$$

te relativno ubrzanje

$$a_r = \ddot{\rho} \quad (1.4)$$

Osnovne inercijske sile se mogu opisat pomoću jedne jednadžbe, iz [1], koja glasi

$$ma_r = R - ma_p - ma_k = R - F_p - F_K. \quad (1.5)$$

Sila R je resultantna vanjska sila. Sila F_p je prijenosna sila, dok F_K predstavlja Coriolisovu silu. Očito je da vrijedi

$$F_K = -ma_k = -m \cdot 2(\tilde{\Omega} \times V_r), \quad (1.6)$$

što se podudara s definicijom Coriolisove sile.

Dodatni pojmovi, koji se uvode kao osnovni pojmovi, su gravitacijsko ubrzanje i „kruto tijelo“.

„Kruta tijelo“ ne podrazumijeva tijelo velike čvrstoće, već tijelo čije su čestice konstantno jednako udaljene. Odnosno, čestice krutog tijela su u konstantnom međusobnom odnosu. Iz [1] slijedi:

„...sila kojom djeluje jedna čestica na sve ostale čestice jednaka je sili kojom djeluju te čestice na tu jednu česticu. Kada promatramo jednu česticu, onda moramo uzeti u obzir resultantu djelovanja svih drugih čestica na tu jednu (dF_u), ali kada promatramo sve čestice zajedno, tj. kada tu jednu česticu pridružimo svim ostalim onda se njeno djelovanje na sve druge i djelovanje drugih na nju poništavaju te je ukupna unutrašnja sila jednaka nuli. „

Prema tome, ako promatramo samo jednu česticu, uzimajući u obzir gravitacijsko ubrzanje i postojanje ostalih čestica, možemo proširiti jednadžbu (1.5)

$$a_r \cdot dm = dR + a_\gamma dm + dF_u + dF_p + dF_K \quad (1.7)$$

Ubrzanje a_γ predstavlja gravitacijsko ubrzanje. Sila F_u je posljedica međusobnog djelovanja čestica tijela.

Nakon integriranja jednadžbe (1.7) po masi, prema [1], konačno se dobiva

$$\tilde{\Omega} V_K + \dot{V}_K = \frac{R}{m} + g + (-a_{ck}). \quad (1.8)$$

g je gravitacijsko ubrzanje, a član a_{ck} predstavlja rezultirajuće Coriolisovo ubrzanje

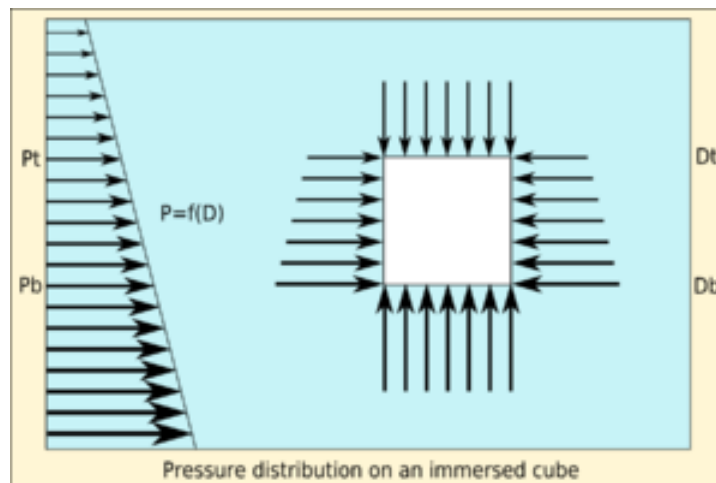
$$a_{ck} = 2\tilde{\Omega}_0 V_{cr}. \quad (1.9)$$

2.2 Ukratko o aerodinamici zrakoplova

Aerodinamika zrakoplova bit će ukratko predstavljena preko pojma sile uzgona.

Definicija sile uzgona, iz [2]:

„Sila uzgona je rezultat djelovanja sila tlaka po površini tijela uronjenog u fluid. Sila uzgona je jednaka težini fluida istisnutog tijelom (težini istisnine), djeluje vertikalno u vis i prolazi težištem istisnine.“



Slika 2 Sile tlaka na tijelo uronjeno u mirujući fluid

Očito je da tlak raste s dubinom, što se poklapa s osnovnom jednadžbom statike fluide,

$$\rho \cdot f_m = grad p. \quad (1.10)$$

Ona kaže da tlak najbrže raste u smjeru masenih sila, kako je i prikazano na slici 2.

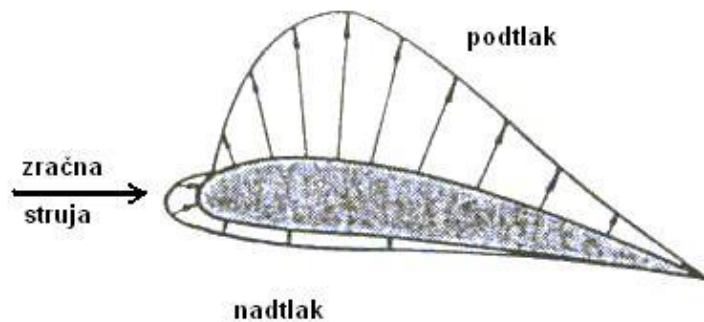
Sila uzgona na zrakoplov ovisi o obliku i površini tijela (u ovom slučaju krila), kao i o samoj brzini zrakoplova.

Jednadžba dinamičke sile uzgona na gibajuće tijelo u fluidu glasi:

$$F_u = C_L \cdot \frac{v^2 \rho}{2} \cdot S \quad (1.11)$$

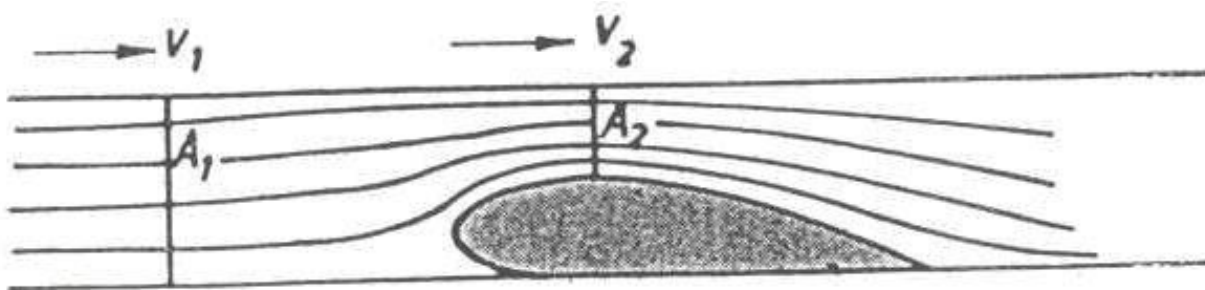
C_L je koeficijent uzgona koji ovisi o obliku i orijentaciji tijela. V predstavlja brzinu gibanja tijela kroz fluid, ρ gustoću fluida, S karakterističnu površinu tijela (obično se prvo određuje S , a poslije toga C_L , jer su te karakteristike međusobno ovisne).

Na sljedećoj slici je prikazana raspodjela tlaka na krilu zrakoplova.



Slika 3 Raspored tlaka na tijelo koje se giba kroz fluid

Takva raspodjela tlaka je posljedica samog oblika tijela, kao prema sljedećoj slici.



Slika 4 Gibanje krila kroz fluid

Iz [3], očito je da aeroprofil uzrokuje sužavanje zraka. Poradi tog sužavanja (razlika površine A_1 i A_2), dolazi do razlike tlaka, kao na slici 3. Posljedica te razlike tlaka je i sama sila uzgona.

Prema [3], određivanje sile uzgona moguće je samo ako se zna oblik zrakoplova, njegove karakteristike i koeficijenti koji su dobiveni mjerenjem, karakteristični grafovi (ovisnost napadnog kuta i sile uzgona, ovisnost karakteristične površine otpora i uzgona i sl.) itd. Većina

tih podataka dobivena je mjerenjem. Zbog složenosti računanja sile uzgona na tipični zrakoplov, te iz razloga jer se drugačije računa kod kvadrokoptera, neće se dublje ulaziti u ovo poglavlje.

2.3 Gibanje helikoptera

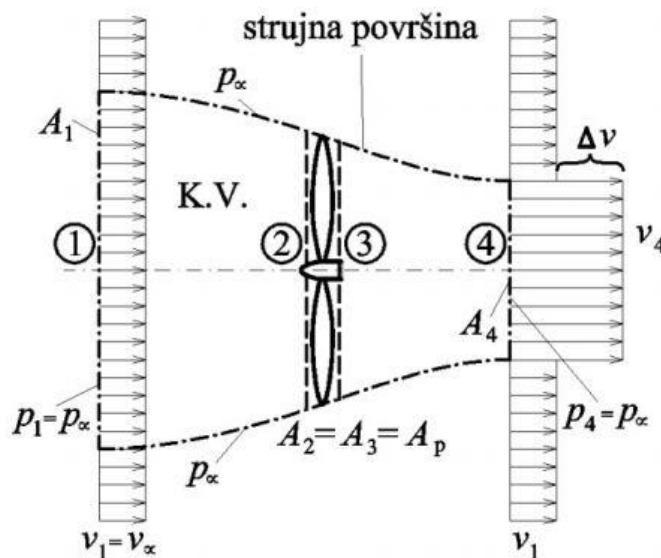
Za razliku od leta zrakoplova iz 2.2, čija dinamika najviše ovisi o obliku krila i izlaznoj snazi pogonskog motora, dinamika helikoptera se zasniva na teoriji propelera i najviše ovisi o orijentaciji lopatica.

2.3.1 Primitivna teorija propelera

Sljedeće informacije i slike potiču iz [2].

„Ova se teorija temelji na idealiziranoj slici strujanja uz pretpostavku neviskoznog strujanja fluida i definira samo okvirne odnose među integralnim veličinama karakterističnim za propeler, pa se ovom teorijom propeleri ne mogu projektirati. Analizirat će se slučaj avionskog propelera koji se giba konstantnom brzinom v_∞ u mirujućem zraku. Iz koordinatnog sustava vezanog na propeler izgledat će kao da fluid nailazi na propeler brzinom v_∞ . Sljedeća slika shematski prikazuje propeler i odabrani kontrolni volumen.“

Spominje se novi pojam, viskoznost. Ono označuje sposobnost fluida da se opire gibanju. Suprotno tome, neviskozni fluid je fluid koji ne pruža otpor gibanju.



Slika 5 Shematski prikaz idealiziranog polja strujanja

Izvod sljedećih jednačbi može se vidjeti u dodatnoj literaturi [2].

Ovdje nas zanimaju samo dvije stvari. O čemu ovisi razlika tlaka ispred i iza propelera te o čemu ovisi brzina strujanja zraka.

Prema jednačbi

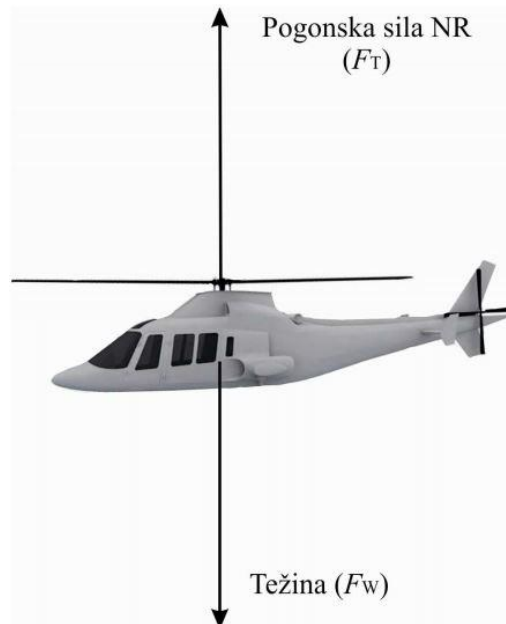
$$p_3 - p_2 = \frac{\rho}{2}(v_4^2 - v_\infty^2) \quad (1.12)$$

razlika tlaka ovisi o samoj gustoći fluida i o razlici kvadrata brzine fluida na ulaznom i izlaznom presjeku odnosno u presjecima 1 i 4. Brzina na izlaznom presjeku ovisi o brzini strujanja zraka kroz propeler.

$$\Delta v = 2(v_p - v_\infty) \quad (1.13)$$

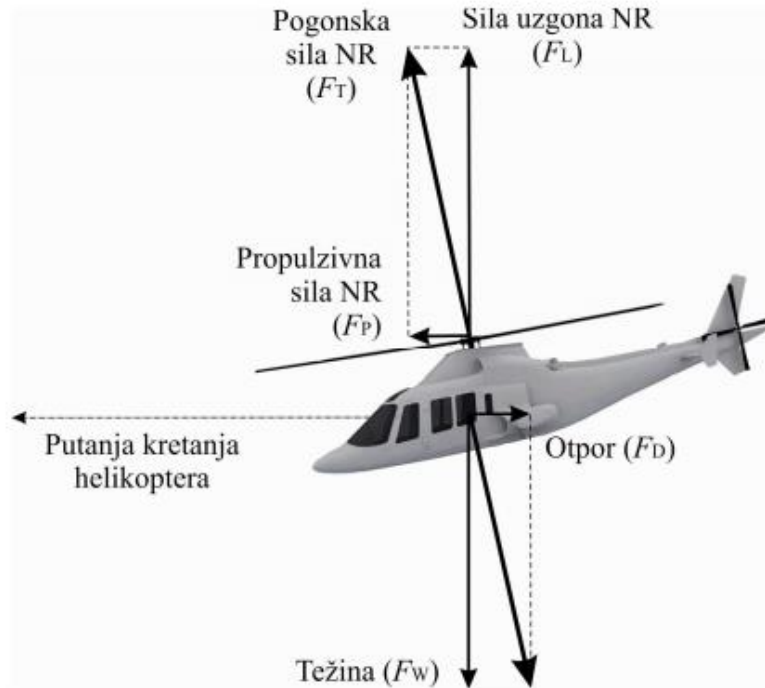
2.3.2 Osnove leta helikoptera

Kao što je već napomenuto, za razliku od zrakoplova iz 1.2, pogonska sila helikoptera (NR) uvijek je okomita na ravninu diska rotora te se, osim u lebdjenju, razlaže na dvije komponente.



Slika 6 Helikopter u lebdjenju

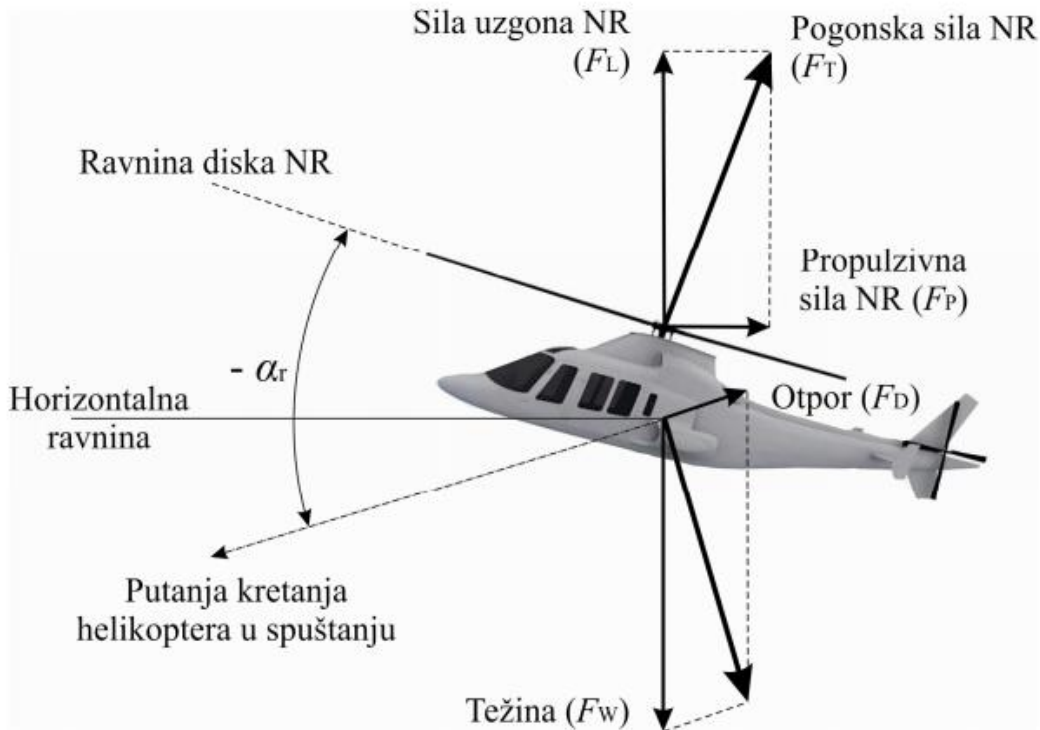
Vertikalna komponenta odnosno nosiva sila rotora F_T djeluje u suprotnom smjeru od težine helikoptera F_W . Kako bi helikopter promijenio poziciju, treba primijeniti određenu silu koja će poremetiti ravnotežu.



Slika 7 Helikopter u napredujućem letu

Promjenom **nagiba** diska rotora pilot mijenja smjer vektora pogonske sile NR koja se dijeli na okomitu komponentu odnosno silu uzgona i horizontalnu komponentu odnosno propulzivnu silu.

Na slici 8 prikazan je helikopter u spuštanju prilikom slijetanja. Bitno je primijetiti da položaj trupa ne ukazuje na smjer gibanja. To je posljedica nagiba diska kako bi se propulzivna sila usmjerila prema željenom smjeru kretanja. Iz tog razloga, napadni kut α_r je negativan prilikom spuštanja helikoptera. Suprotno vrijedi za penjanje helikoptera.



Slika 8 Helikopter u spuštanju

Ono što je bitno napomenuti, za razliku od mlažnjaka (zrakoplovi s mlaznim pogonom), helikopter ne treba mijenjati izlaznu snagu pogonskog motora već mijenja samo nagib lopatica. Zbog precesije, što je svojstvo žiroskopa da se os rotacije otkloni za 90° od smjera djelovanja sila za tu os, nagib lopatice rotora nastupa 90° ispred osi željene rotacije.

Očito, princip gibanja helikoptera je potpuno drugačiji od ostalih vrsta zrakoplova, iako vrijede isti zakoni aerodinamike.

Princip rada kvadrokoptera, unatoč tome što i on koristi rotor kao helikopter, dosta je drugačiji. Pilot upravlja položajem helikoptera, kao što je već spomenuto, mijenjajući nagib lopatica rotora. Kvadrokopter ne mijenja nagib lopatica već mijenja broj okretaja rotora. Pošto je dinamika ta dva sustava dosta različita, a glavna tema ovog rada je kvadrokopter, neće se detaljnije obrađivati ova cjelina.

Dublji opis dinamike helikoptera i samog propelera opisana je u [4] i [5].

3. Kvadkopter

3.1 Trenutno postojeće izvedbe kvadkoptera

Primitivna podjela bespilotnih zrakoplova:

- Za privatnu upotrebu
- Za vojnu upotrebu
- Ostalo

Ovdje će se posebno razmatrati privatna upotreba, koja se nadalje okvirno može podijeliti na letjelice za:

- Početnike
- Hobiste
- Profesionalce

Privatne bespilotne letjelice za početnike, po ovoj podjeli, imaju sljedeće karakteristike:

- Bez regulatora
- Cijene do 300\$
- Često potrebna kalibracija
- Malih dimenzija, snaga i male mase
- Praktična nosivost ~ 0 kg

Primjer: <https://www.hobbytron.com/StrikerFPVLiveView45CH24GHzRCDrone.html>

Za hobiste:

- S PID regulatorom
- Većina ima GPS
- Cijene i do 2000\$
- Trajanje leta do 20min
- Posjeduju kvalitetnu kameru i stabilizator kamere
- Letjelice veće cijene dolaze uz PC software

Primjer: <https://www.hobbytron.com/DJIInspire1V204KHDCameraRCDrone.html>



Slika 9 DJI Inspire 1 V2.0 4K HD camera 1900\$

<https://www.hobbytron.com/DJIPhantom34KCameraRCDrone.html>




Slika 10 DJI Phantom 3 4K Camera 750\$


Karakteristike profesionalnih bespilotnih letjelica:

- Cijene idu i preko 8000\$
- Vrhunske kamere i stabilizatori
- IMU senzori srednje klase, kvalitetni hardware
- Regulator
- GPS
- Software za PC i android
- Pattern recognition, praćenje cilja
- Let do 30min
- Izbjegavanje većih prepreka
- Propisana radna temperatura čak do -18°C
- Automatsko polijetanje i slijetanje
- ...

Primjeri: <http://www.bestbuy.ca/en-ca/product/dji-dji-inspire-2-quadcopter-drone-bundle-with-controller-zenmuse-x5s-camera-ready-to-fly-grey-cp-bx-000185/10553260.aspx?>



4 of 16



More Information

- **Ready to fly, easy to pilot:** The Inspire 2 is just about ready to fly right out of the box. About 1 minute of easy, tool-free assembly is all that's needed to get the quadcopter in the air and patrolling the skies.
- **Intelligent flight modes:** Piloting the drone is simple and risk-free, even for first timers and beginners. In addition to built-in obstacle avoidance, the Inspire 2 features a variety of straightforward autopilot flight modes, including Return to Home, Auto Land, Auto Take-off, and Auto Follow.
- **Powerful propulsion:** With the Inspire 2, the sky is yours. Go from 0 to 50mph (80kph) in less than 4 seconds, fly at a top speed of 67mph (108kph), and enjoy an operating radius of up to 7000m under ideal conditions.
- **Extended flight time:** Dual lithium polymer batteries mean the Inspire 2 can fly for between 25 and 27 minutes at a time. It also means if a problem occurs in 1 battery, the other can supply the power needed for a safe, accident-free landing.
- **Obstacle avoidance:** Advanced FlightAutonomy technology provides 2 directions of obstacle avoidance and sensor redundancy. Forward and downward vision systems detect obstacles up to 30 metres ahead, allowing you to fly with confidence and collision-free precision.
- **Low temperature operation:** Self-heating intelligent flight batteries mean the Inspire 2 can fly in temperatures as low as -20 degrees Celsius.
- **5.2K video processing:** The Inspire 2 is ready to help you capture cinema-quality video, thanks to the Cinecore 2.0 image processing system built into the drone's nose. Cinecore works well with the included Zenmuse X5S camera, and can deliver 5.2K RAW video at 30fps or 4K video at 60fps.
- **Dual operator mode:** The advanced video transmission system features dual signal frequency and dual channels, so video from the onboard FPV camera can be streamed simultaneously alongside video from the main camera. This allows for enhanced pilot and camera operator collaboration.
- **Spotlight Pro:** When you don't have a dedicated camera operator at the ready, Spotlight Pro lets you capture advanced tracking shots all by yourself.
- **Zenmuse-compatible:** The Inspire 2 quadcopter and Cinecore 2.0 image processor are compatible with the Zenmuse X5S camera (included) and the Zenmuse X4S camera (sold separately).
- **Controller included:** Driven by Lightbridge technology, the included remote controller has an operating range of up to 7km. It also offers signal frequency switching between 2.4GHz and 5.8GHz.

Slika 11 DJI Inspire 2 8677\$

https://www.amazon.com/MAHATMA-shipping-drone-payload-distance/dp/B071RGFNYD/ref=sr_1_1?s=toys-and-games&ie=UTF8&qid=1501670134&sr=1-1&keywords=drone

Ovaj dron, prikazan na slici 12, ima nosivost od 10kg i može prijeći udaljenosti do 10km. Specifičan je po svojoj visokoj cijeni, čak 40 000\$. To je otprilike jednako iznosu od 251 626,00 kn (dvije stotine pedeset i jedna tisuća šest stotina dvadeset i šest kuna), što je približno četvrtina milijun kuna.



Slika 12 MAHATMA shipping drone 40 000\$

Kao što vidimo, dronovi ovako visokih cijena i dalje imaju velike mane. Dvije najveće mane su način komunikacije i duljina trajanja leta.

Naime, komunikacija uvijek ide preko radio veze. Drugim riječima, ne možete sjediti između 4 zida u udobnoj fotelji i upravljati dronom već morate bit na otvorenom području.

Druga velika mana je ta da let ne traje duže od 40 min i kod najskupljih i najkvalitetnijih dronova. Ako traje iznad 20min, obično se podrazumijeva da letjelica miruje te ima nisku potrošnju baterije. Odnosno, ne može se preletjeti velika udaljenost od početne točke A do cilja B i vratiti se do točke A u roku od 30 min, već u puno kraćem vremenskom razdoblju.

Postoji li racionalno opravdanje ovako visokih cijena na tržištu, pokraj svih njihovih mana?

Kada bi osoba sama radila dron koji ima nosivost 10kg, vrhunsku kameru rezolucije 4k, senzore srednje klase (čije cijene za npr. akcelerometar i žiroskop idu od 4000 kn pa nadalje i više su nego dovoljno za vrlo precizni i fini regulator leta), stabilizator kamere itd., potrošilo bi se možda 6000\$. I to u slučaju vrhunske opreme i komadne proizvodnje.

Vrijedi li software odnosno R&D proizvodnje toliko novaca?

Popis komponenata i njihovih cijena kada bi radili vlastiti dron u komadnoj proizvodnji, za usporedbu s MAHATMA i DJI Inspire 2 dronom:

- [ADIS16405](#) modul magnetometra, žiroskopa i akcelerometra, 580\$
- [GPS](#) 10Hz osvježavanja, 66 kanala, preciznost mjerenja brzine ispod 0.1 m/s.. 40\$
- Barometar do 100\$
- Mikrokontroler texas instruments dvojezgreni maksimalno 1700\$
- [Kamera](#) 470\$
- IR senzor 300\$
- Ultrazvučni senzor 100\$
- Servo motori za kameru do 100\$
- Motori, BMS, baterije, kontroleri 2500\$

Sveukupna cijena iznosi 5900\$. Ako nadodamo cijenu izrade konstrukcije, možemo doći i do iznosa 6500\$. Recimo da smo zanemarili neke komponente i dodajmo još 1500\$. Došli smo do vrijednosti od 8000\$, a imamo potrebne materijale za dron koji ima nosivost veću od 10 kg, vrhunske senzore za ovakvu primjenu, vrhunsku kameru, mikrokontroler itd.

Treba imat razumijevanja i biti svjestan da se plaća znanje, a ne samo hardware. Ali, vrijedi li to znanje 30 000\$, pa i više? Sigurno ne. Kada biste izradili dron koji ima bolje karakteristike od DJI Inspire 2 (Slika 11, 8677\$), najvjerojatnije biste potrošili na hardware, u **komadnoj** proizvodnji, maksimalno 5000\$. Pošto je serijska proizvodnja jeftinija, tu biste dobili prosječni popust od 15% (najvjerojatnije i veći, ali treba uzet faktor sigurnosti). Cijena bi bila relativno sitnih 4250\$, što je manje od pola cijene drona DJI Inspire 2.

Vrijedi li to toliko? Ili je to posljedica nekonkurentnog tržišta?

3.2 Izrada 3D konstrukcije

3D model je napravljen u software-u Solidworks.

Postavljeni uvjeti:

- Vertikalna os svih motora mora ležati na istoj kružnici čiji centar se nalazi u središnjoj osi centra mase konstrukcije
- Centar mase konstrukcije mora biti ispod ravnine rotora kako ne bi dolazilo do prevrtanja uslijed momenta težine oko centra konstrukcije. Poželjno je da centar mase bude što niže kako bi se postigao što veći kut rotacije pri kojem centar mase ne prelazi ravninu motora odnosno rotora.
- Konstrukcija mora biti simetrična kako bi se postigla lakša regulacija i bolja stabilnost
- Treba osigurati prostor za baterije, senzore, mikrokontrolere i ostalu opremu
- Masa treba biti minimalna
- Moraju biti zadovoljeni svi uvjeti čvrstoće
- Konstrukcija treba imati mogućnost izrade određenim postupkom, u ovom slučaju 3D printanje

Dodatni, uvjeti:

- Poželjno je imati dio konstrukcije koji preuzima većinu energiju udara uslijed pada te se lomi, kako bi bila što manja šteta na ostalim komponentama. Taj dio treba biti lako zamjenjiv i što manje cijene
- Kako bi se postigao što manji otpor zraka, konstrukcija treba imati što manju površinu koja je okomita na smjer gibanja odnosno toka fluida
- Prostor ispod i iznad rotora mora biti „prazan“ kako bi bila veća korisnost propelera
- ...

Nakon što su postavljeni određeni uvjeti, bira se materijal konstrukcije. Izrada 3D printanjem nudi samo dvije opcije, PLA ili ABS.

PLA je gustoće 1210 do 1430 kg/m³, a ABS 900 do 1500 kg/m³.

PLA je manje elastičan odnosno više krhak u usporedbi s ABS-om.

PLA je jednostavniji za 3D printanje i manje zahtjevan.

Konačno, pobjedu odnosi ABS, zbog svoje elastičnosti i niže gustoće.

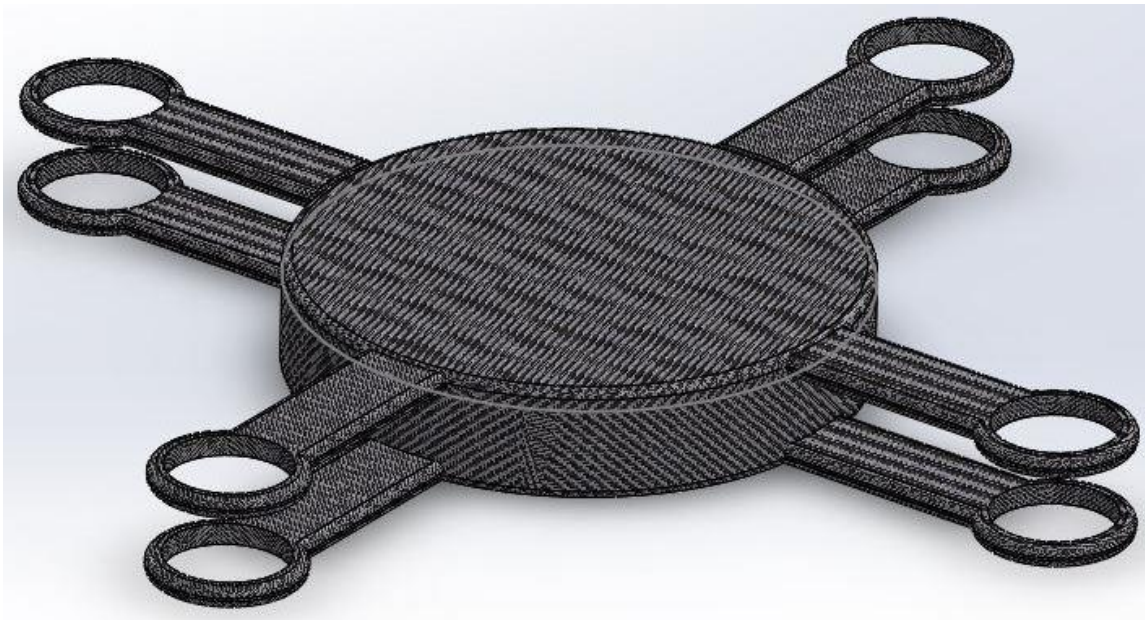
Nakon odabira materijala, radi se početni dizajn odnosno željeni izgled.

Neki od njih su:



Slika 13 Prvi dizajn

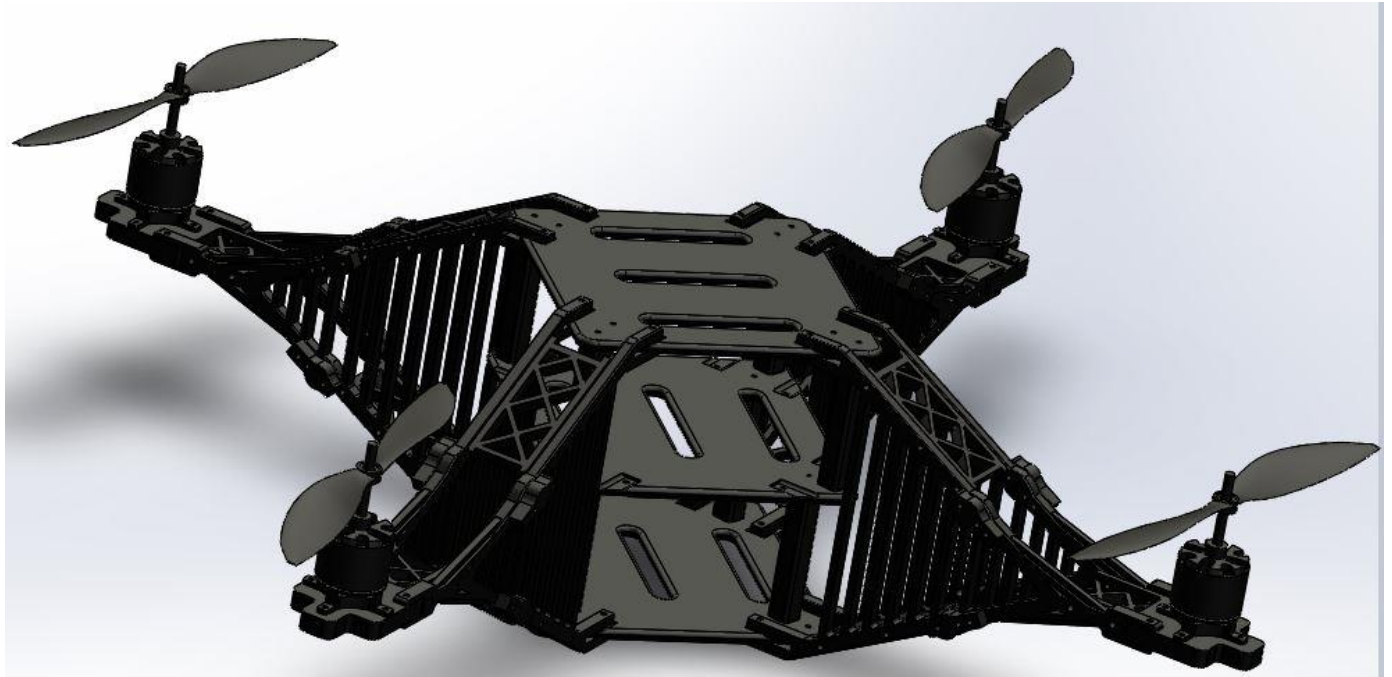
Problem kod ovog dizajna je vrlo očit. Jedina pozitivna strana je estetika. Masa je prevelika, nije simetričan, prostor za rotore je previše zatvoren itd.



Slika 14 Drugi dizajn

Mana drugog dizajna je preveliki otpor zraka i velika masa. Centar mase je blizu ravnine rotora. Najveća prednost je u zatvorenosti konstrukcije, što pruža veliku zaštitu komponentama.

Konačni dizajn, odnosno konačni 3D model je na slici 15.



Slika 15 Konačni 3D model

Ovom konstrukcijom zadovoljeni su skoro svi postavljeni i dodatni uvjeti.

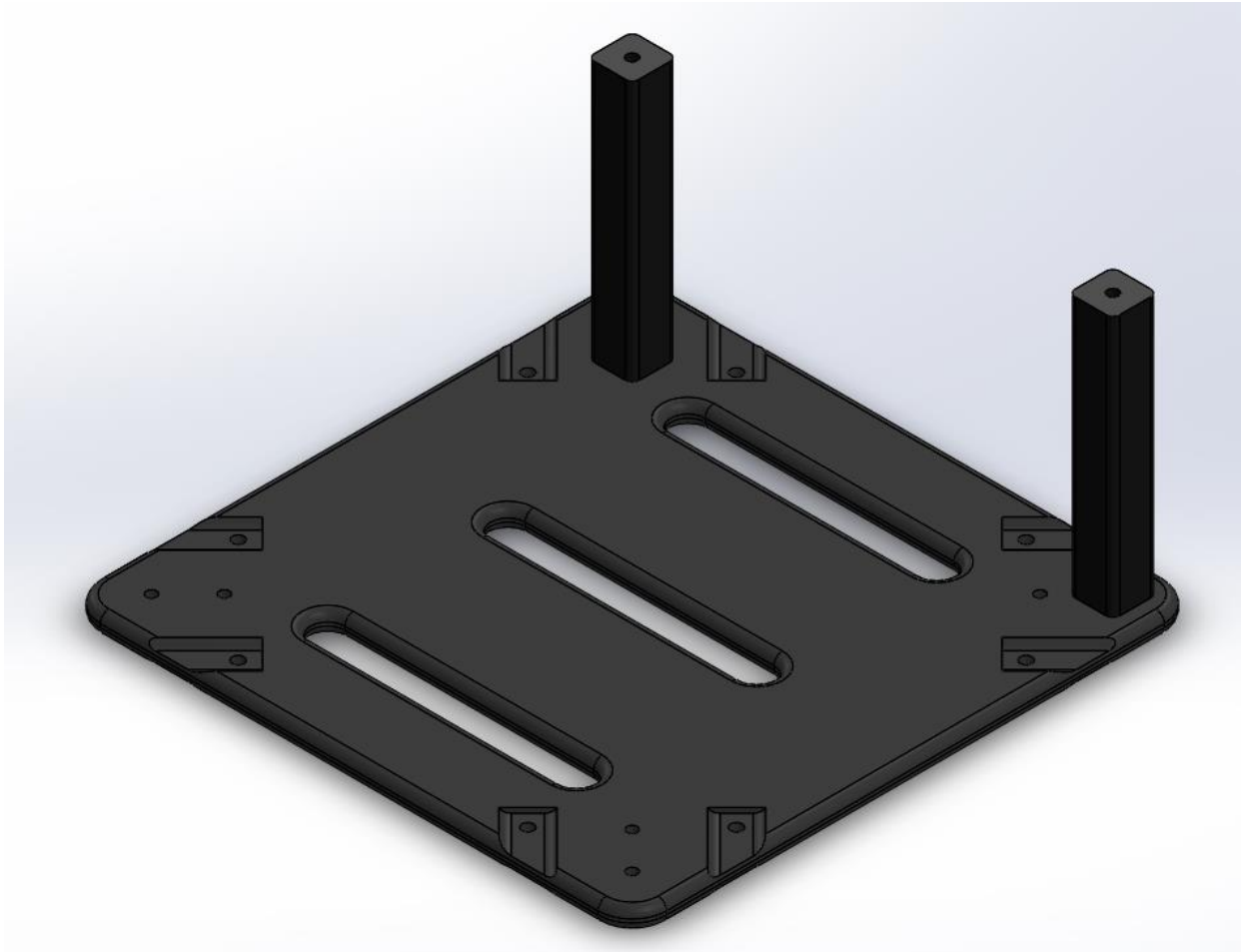
Jedini uvjet koji nije u potpunosti zadovoljen jedan je od dodatnih uvjeta, a to je nepostojanje komada koji bi preuzimao energiju udara.

Zbog specifičnosti tog problema, on je posebno promatran i proučen. Detaljnije o tome raspravljat će se kasnije u ovom radu.

U nastavku će se promatrati specifični dijelovi i poneki provedeni proračuni odnosno simulacije tokom izrade ove konstrukcije.

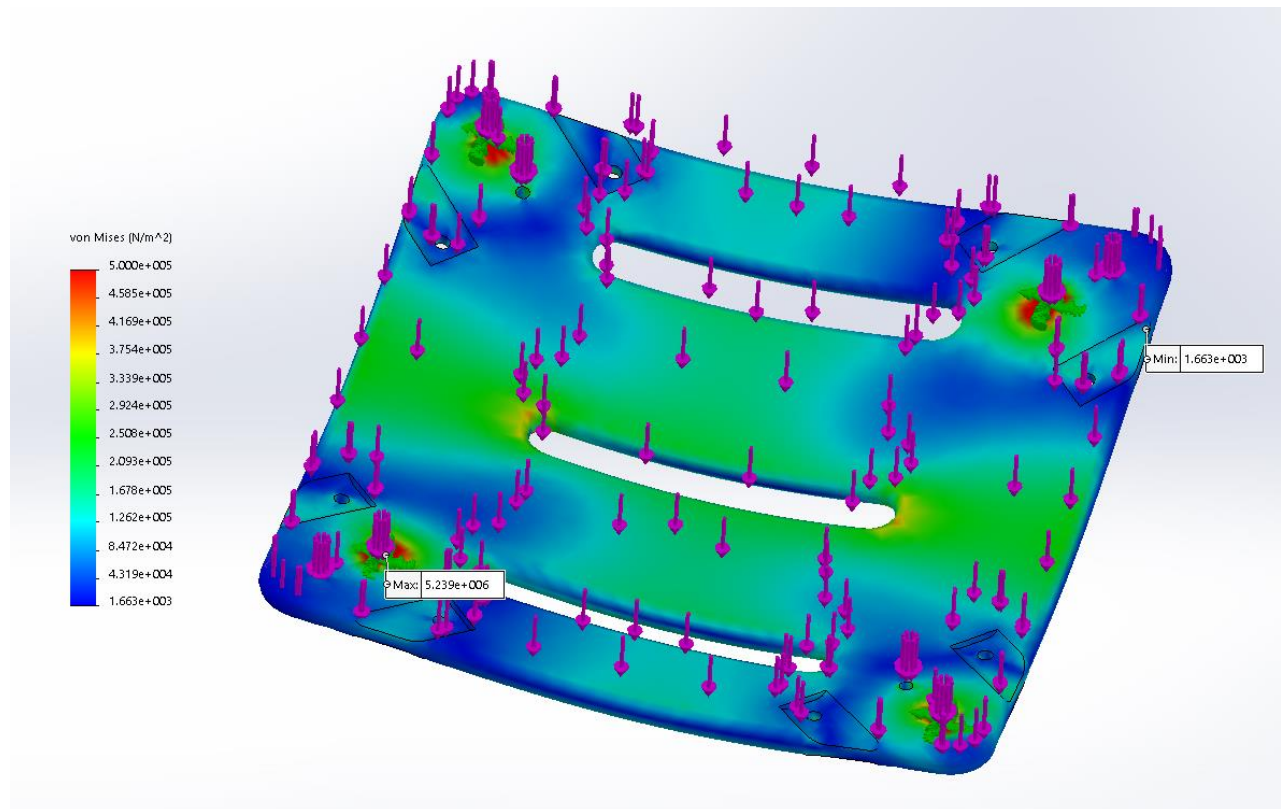
3.2.1 Nosiva pločica

Očito je da je prostor u sredini letjelice rezerviran za komponente poput baterija, mikrokontrolera, senzora itd. Taj prostor sastoji se od 3 nosive pločice povezane s nosivim stupovima i krilima.



Slika 16 Nosiva pločica i nosivi stupovi

Pločica je simetrična oko svoje horizontalne ravnine. Proveden je proračun savijanja uslijed djelovanja težine komponenata (nisu vidljive na slici) vertikalno kroz sredinu pločice, dok su 4 rupe za vijke djelovale kao uklještenja. Konačni faktor sigurnosti je iznad 4, što je zadovoljavajuće.



Slika 17 Statička napreznja pločice

Maksimalna vrijednost napreznja iznosi $\sigma = 5.239 \frac{N}{mm^2}$, dok je vlačna čvrstoća ABS-a, pri sobnoj temperaturi, jednaka $Re = 42.5 \frac{N}{mm^2}$. Drugim riječima, uvjeti čvrstoće su zasigurno zadovoljeni.

Sljedeće se promatra krilo letjelice odnosno nosač motora.

3.2.2 Krilo kvadrokoptera



Slika 18 Sklop nosača motora

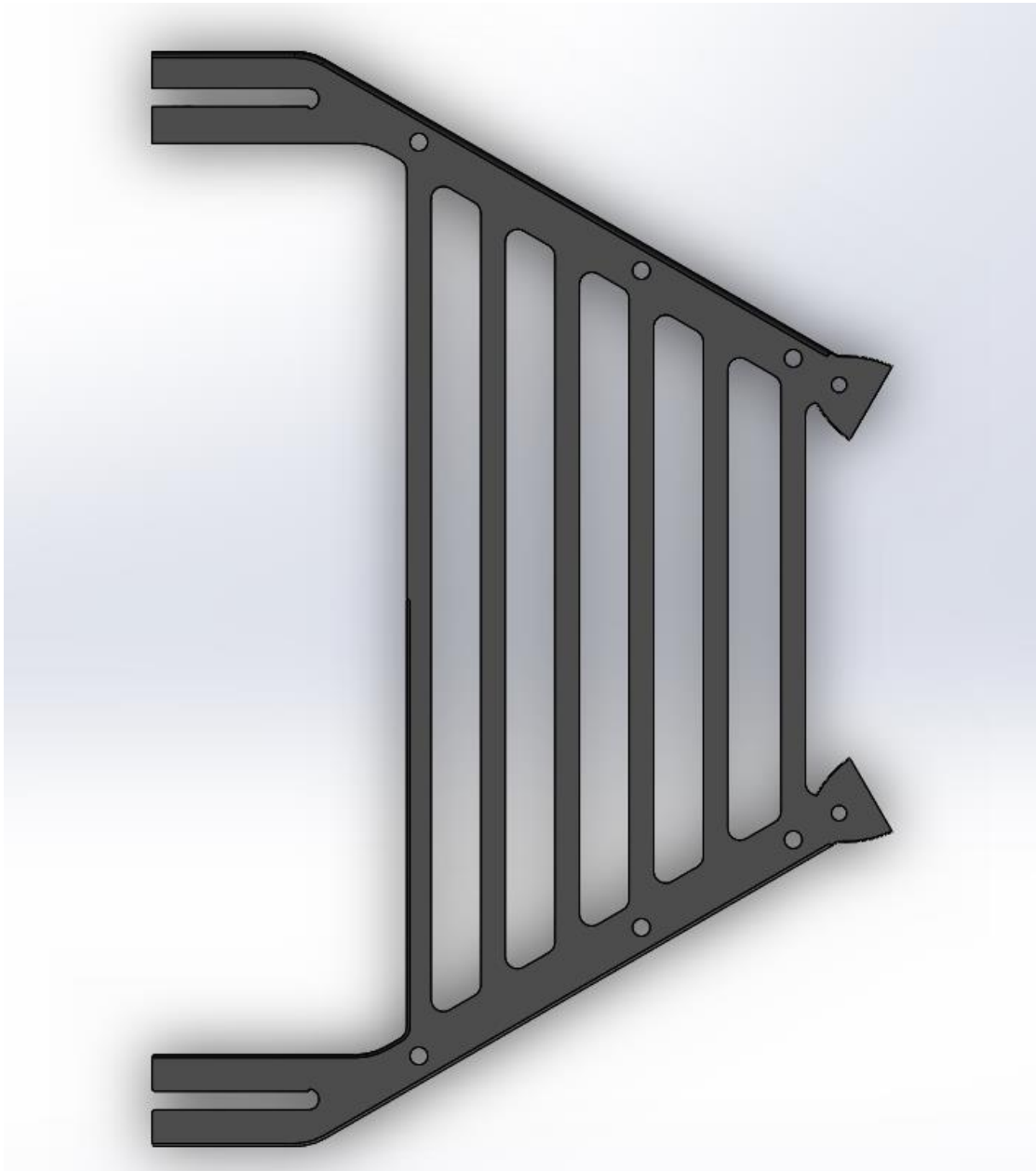
Dvije horizontalne „pločice“, postavljene između vertikalnih nosača, osiguravaju paralelnost lijevog i desnog dijela krila. Njihovo opterećenje je zanemarivo.

Kritični dijelovi se nalaze na krajevima svakog dijela ovog krila.



Slika 19 Sklop krila

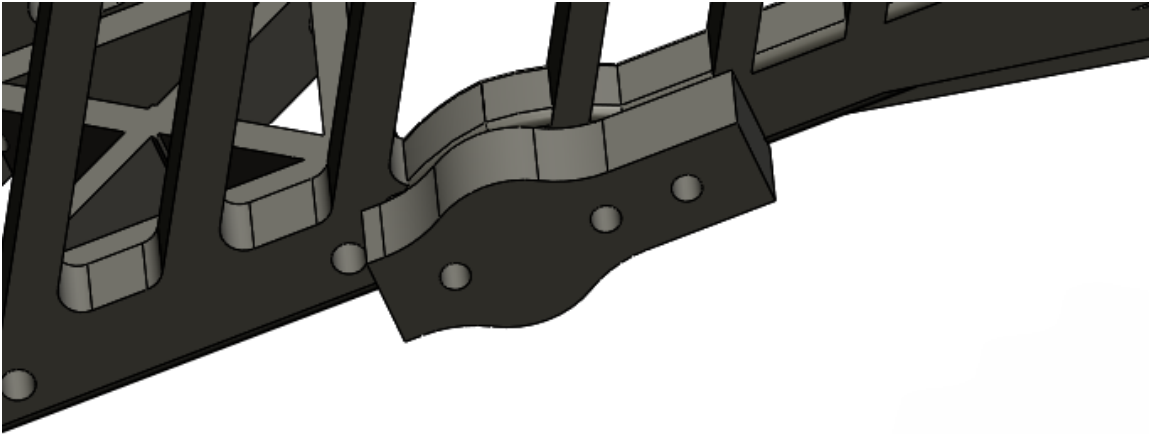
Na slici iznad prikazan je cjeloviti sklop krila i sve komponente koje su dio tog sklopa. Jedno krilo sastoji se od jedanaest (11) dijelova. Te dijelove čini 5 različitih komponenta. Svaka komponenta je prošla kroz iterativni postupak izrade te je konstruirana s velikom pažnjom i posvećenošću svakom učenom detalju.



Slika 20 Dio krila 1

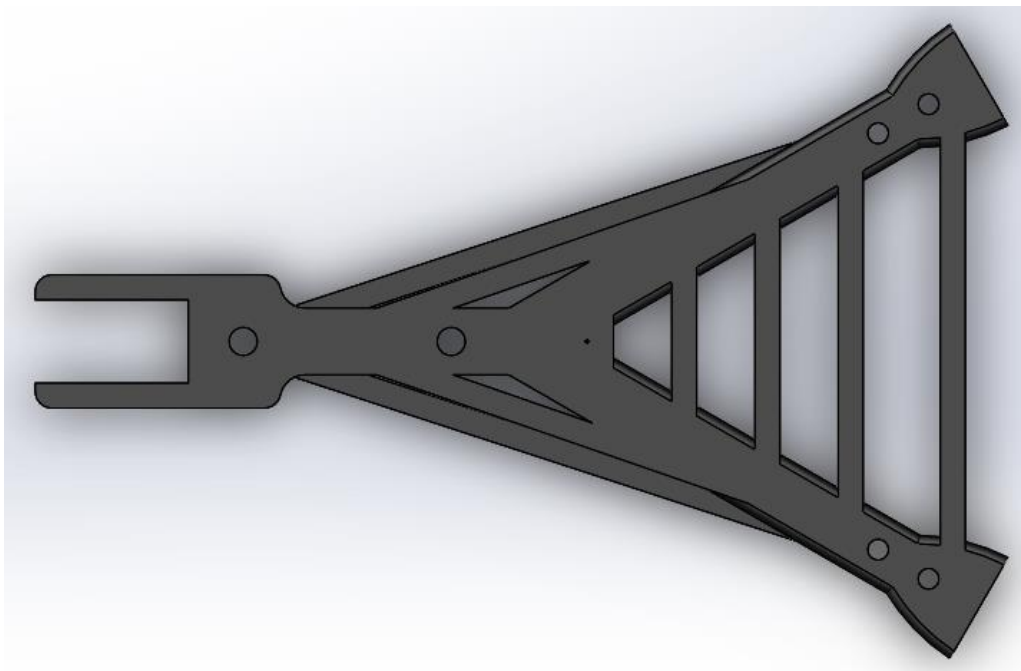
Kako bi se osigurali uvjeti čvrstoće spoja nosive pločice i krila, njihova dodirna površina je povećana. Zato su krakovi, na lijevom kraju ovog dijela, tako „izduženi“. Na desnom kraju može se primijetiti povećanje presjeka. Razlog tome je povećano opterećenje na savijanje na spoju krila. Vertikalne rešetke služe za osiguravanje pozicije i bolju raspodjelu naprezanja.

Na sljedećoj slici je detaljnije prikazan spoj na krilu.



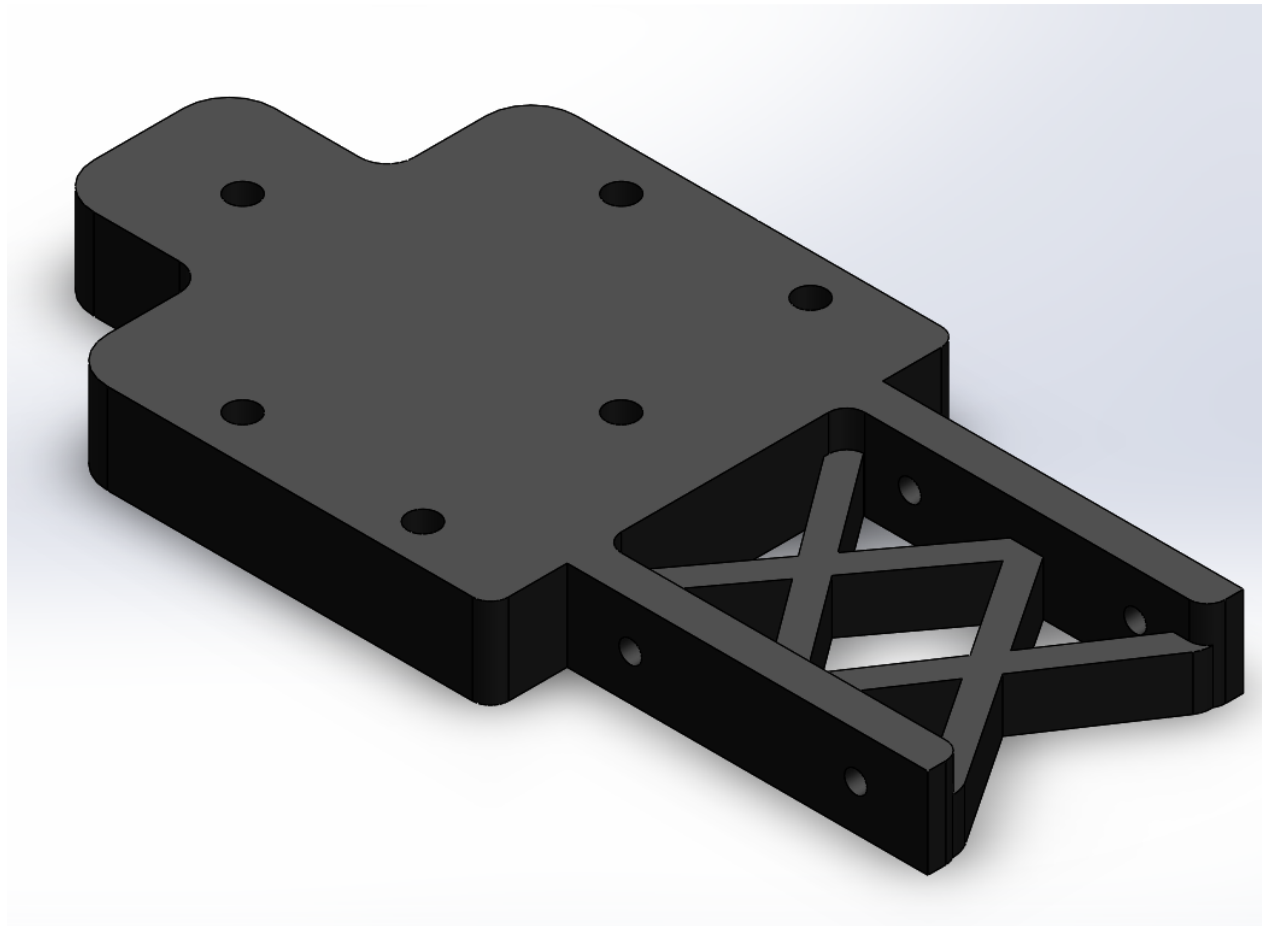
Slika 21 Spoj na krilu

Spoj je izveden preko pomoćnog komada koji ima tri točke spajanja. Ako se dodatno uzme u obzir i dodirna površina dijelova krila koji se spajaju, lako je za pretpostaviti da je ovo kruti spoj. Pomoćni komad također ima proširenje poprečnog presjeka. Razlog tome je podobnija raspodjela naprezanja tokom opterećenja na savijanje te zadovoljeni uvjeti čvrstoće tokom dinamičkih naprezanja.



Slika 22 Dio krila 2

Prvo što je očito je pojačanje konstrukcije, na sredini slike 22. Ono se koristi za ispunjavanje uvjeta čvrstoće uslijed naglih promjena opterećenja odnosno kad se pojave dinamička naprezanja. Ta dinamička naprezanja posljedica su same dinamike rotora i cjelokupnog kvadrokoptera. Drugi dio krila (Slika 22) spaja se s nosačem motora (Slika 23) preko 3 (2 vidljive) točke i dodirne površine, čime je osiguran nepomičan spoj skupa s uvjetima čvrstoće.



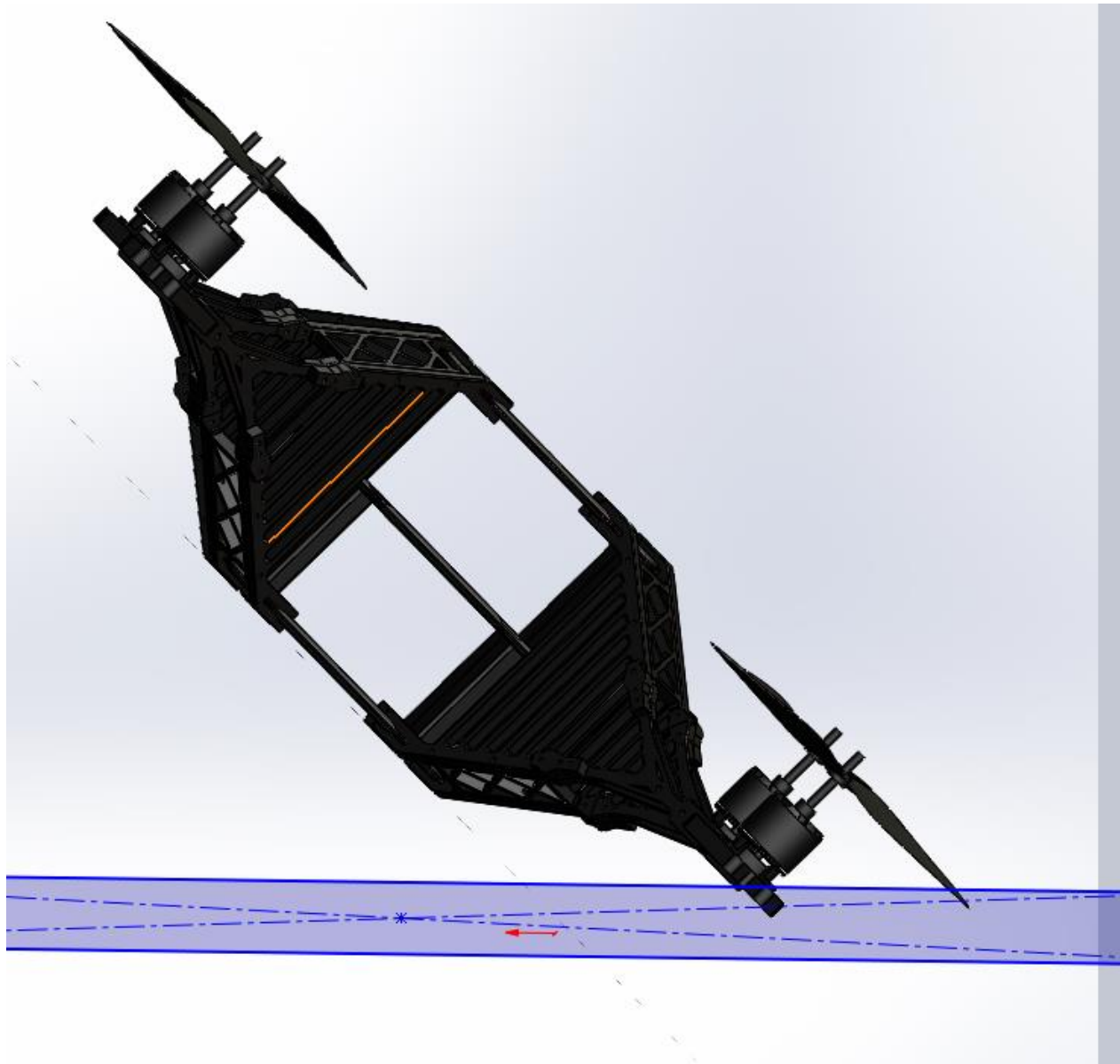
Slika 23 Nosač motora

Nosač motora male je površine kako bi se postigla bolja aerodinamična svojstva. Svi uvjeti čvrstoće su zadovoljeni. Vidljive su četiri točke spoja za motor te šest točki spoja za dva dijela komada krila sa slike 22.

Svi uvjeti čvrstoće su više nego zadovoljeni. Uz to, postignuta je mala masa konstrukcije i mogućnost izrade. Na putu do ovakvog konačnog oblika konstrukcije prošlo se kroz mnogo iterativnih postupaka i testiranja, koji nisu prikazani u ovom završnom radu.

3.2.3 Udarne opterećenja i lom konstrukcije

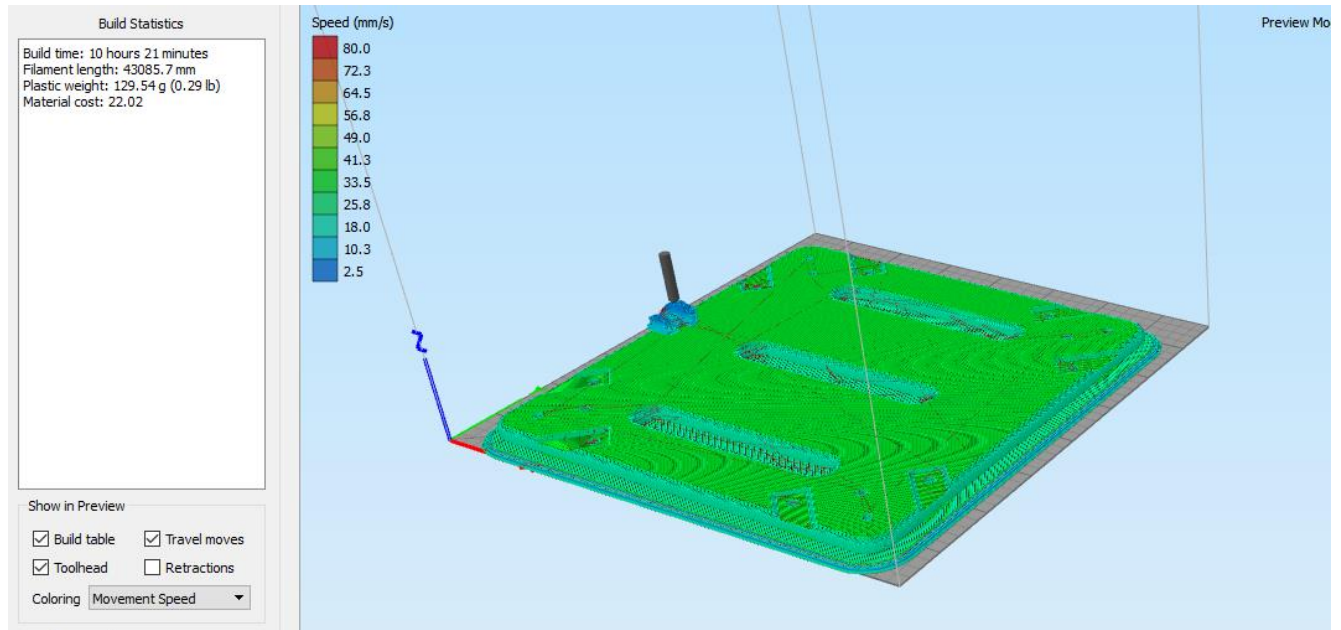
Naime, već je spomenuto da jedan dodatni uvjet nije ispunjen. Treba dodati lako zamjenjive dijelove koji bi preuzeli većinu energije udara, kako bi se osigurala minimalna šteta letjelice nakon nesretnog slučaja. Kako kvadkopter može udariti bilo kojim dijelom s bilo koje strane, nemoguće je uzeti sve slučaje naglih udarnih opterećenja u obzir. Zato je predviđen samo pad na „trbuh“, sve do maksimalnog nagiba od 45° .



Slika 24 Nagib letjelice od 45°

Na slici 24 prikazan je pad letjelice pod kutom od 45° . Vidljivo je da to nije mali kut, što znači da do ovakvog nagiba može doći ili potpunim prestankom rada motora tokom leta te gubitkom kontrole nad letjelicom, ili kao posljedica nespretnog upravljanja i/ili dodatnih smetnji poput vjetra.

Uslijed ovakvog pada došlo bi do loma spoja krila i nosivih pločica kvadkoptera ili do loma spoja krila i nosača motora. To bi dovelo do nužnog potpunog rastavljanja letjelice te izrada novih nosivih pločica. Te pločice nisu jeftine, te izrada, 3D printanjem, traje malo više od 10 sati. Dakle, nije ekonomično.

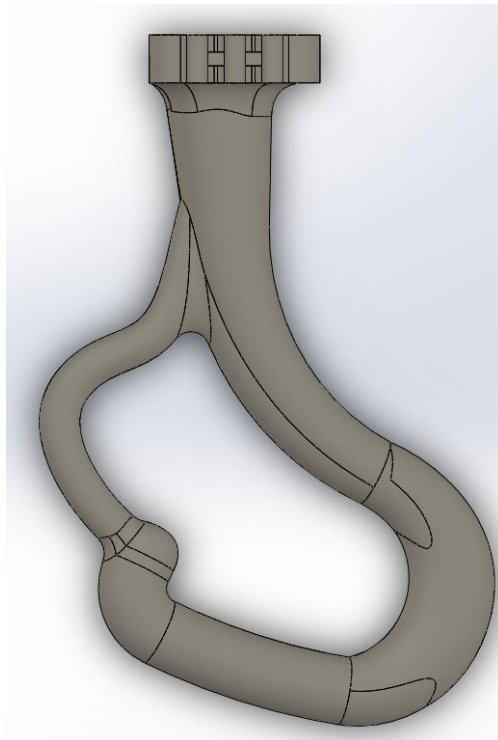


Slika 25 3D printanje nosive pločice

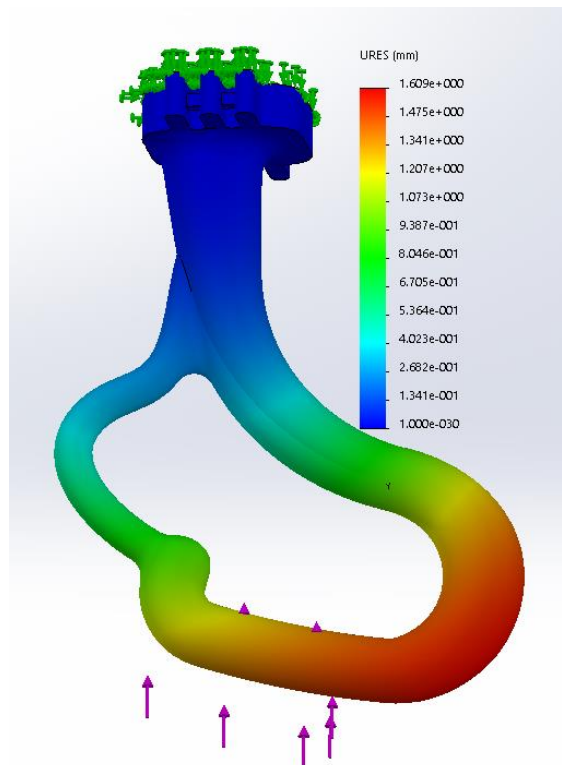
Iz navedenih razloga, izrađen je novi dio konstrukcije. Isto kao i ostatak letjelice, konačne dimenzije postignute su nakon nekoliko iteracija i testiranja. Lako je za pretpostaviti da je dodatni dio zapravo skup nožica. Nožice su takvog oblika da do nagiba od 45° vraćaju letjelicu u prirodni položaj, nakon dodira s tlom. Ono što je specifično kod nožica, za razliku od ostatka letjelice, je veliki utjecaj dinamičkih naprezanja i pojava malih, ali vidljivih elastičnih deformacija nakon udara kvadkoptera o površinu.

Pojava elastičnih deformacija je ciljani rezultat jer se time apsorbira jedan dio udarnih opterećenja što ujedno znači manje opterećenje na ostatku letjelice. Dakle, unošenjem novog komada, nožica, ne samo da smo osigurali povratak letjelice u prirodni položaj nakon pada pod kutom, već smo smanjili udarna opterećenja na cijelu konstrukciju i ispunili dodatni uvjet (dio konstrukcije koji je lako zamjenjiv, jeftin i puca pod većim neželjenim udarima).

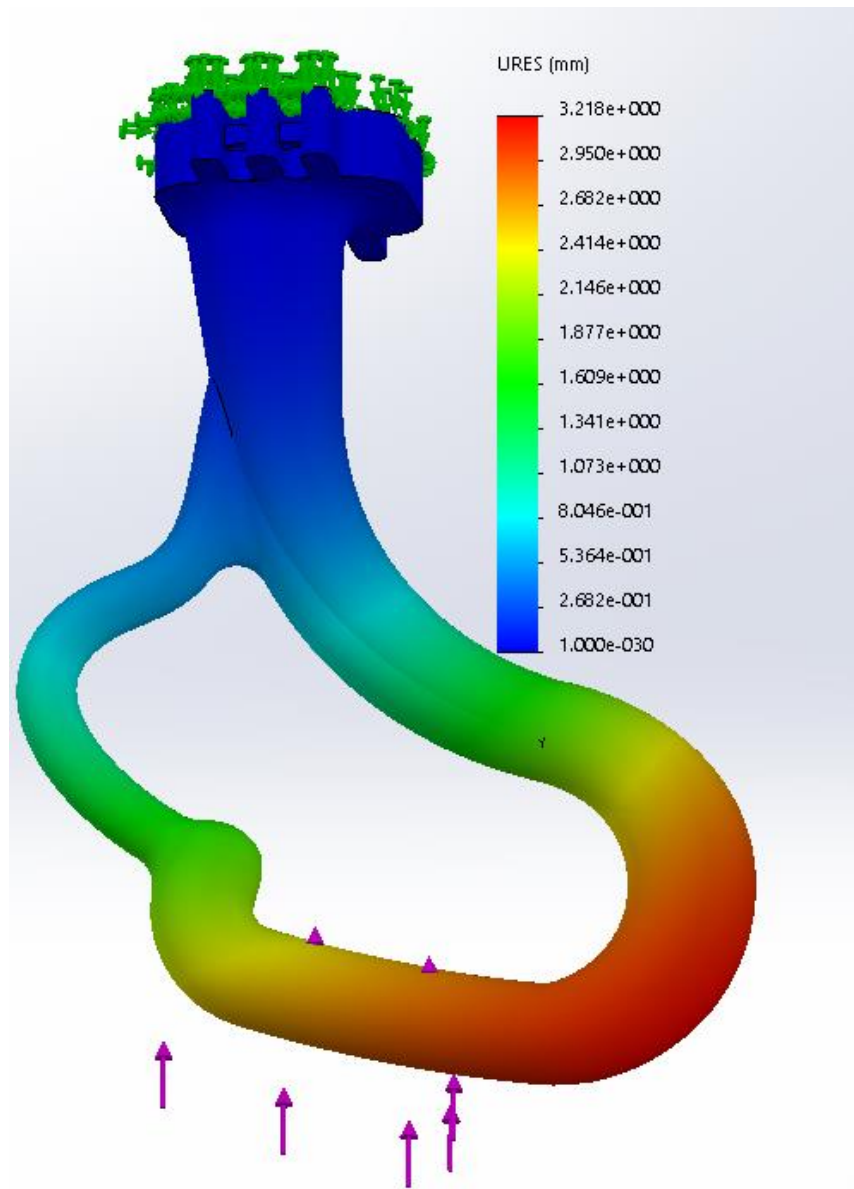
Nožica je prikazana na sljedećoj slici, zajedno s provedenom analizom udarnog opterećenja.



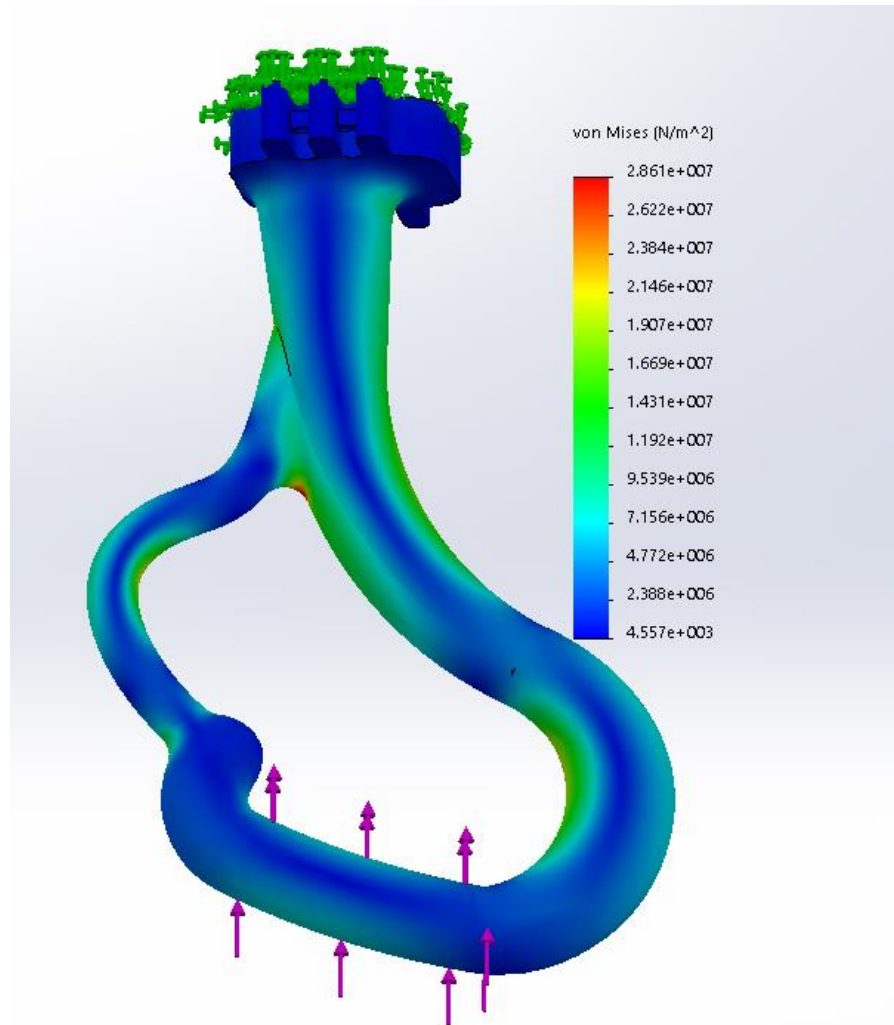
Slika 26 Nožica



Slika 27 Pomaci nožice uslijed udarnog opterećenja od 50N



Slika 28 Pomaci nožice uslijed udarnog opterećenja od 100N

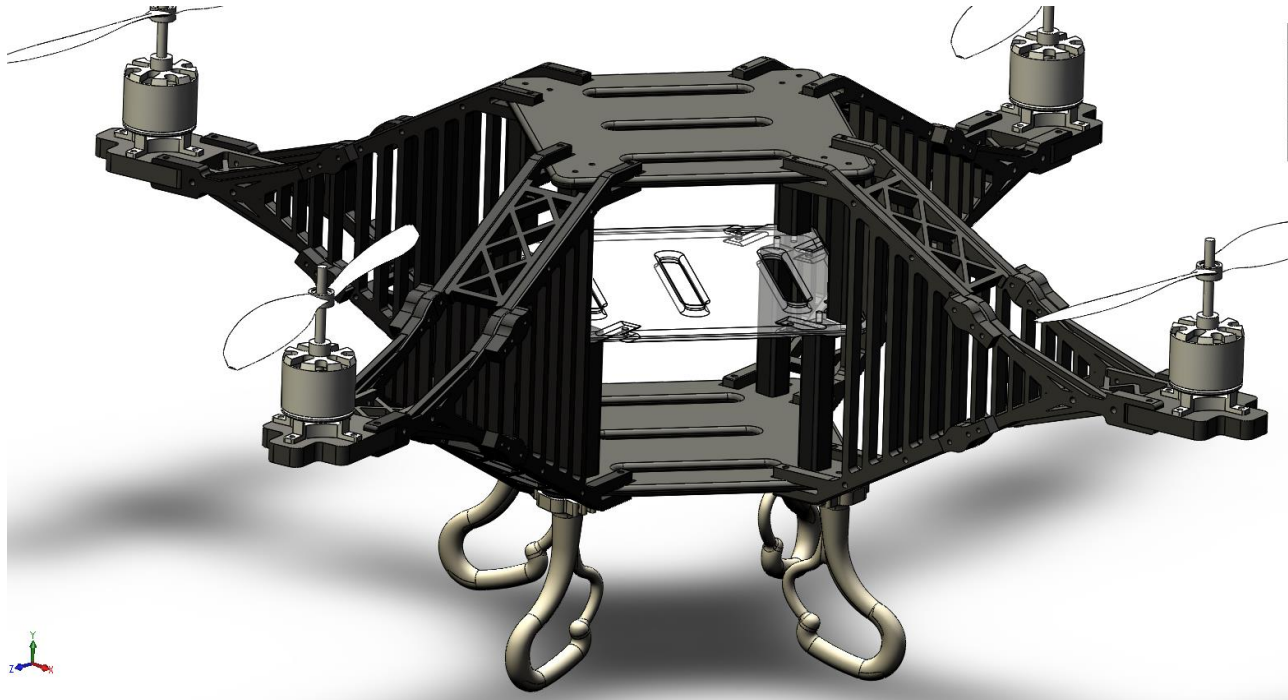


Slika 29 Naprezanja uslijed udarnog opterećenja od 100N

Ovi iznosi nisu točni, ali daju okvirnu sliku. Uslijed udarnog opterećenja od 100N, zbog izraženih dinamičkih naprezanja, dolazi do loma nožice. Ako se promatra samo statički slučaj, što bi bilo netočno, dobio bi se dojam da su uvjeti čvrstoće zadovoljeni.

3.3 Konačna konstrukcija

Konačni model konstrukcije prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 30 Konačni model

U sljedećoj tablici dane su konačne specifikacije ove letjelice:

Tablica 1 Generalne specifikacije kvadkoptera

Masa same konstrukcije	0.7 kg
Masa letjelice bez tereta	3.5kg
Kinematički moment inercije oko horizontalnih osi	$J \approx 89415119 \text{ mm}^2 \text{ g}$
Kinematički moment inercije oko vertikalne osi	$J \approx 155624595.283 \text{ mm}^2 \text{ g}$
Maksimalna dopuštena nosiva masa	7 kg
Maksimalna dopuštena brzina slijetanja	3 m/s
Maksimalna brzina	Nepoznato
Maksimalni domet	Nepoznato
Trajanje optimalnog leta	Teorijski 30min
Snaga motora	700W
Promjer propelera	28 cm
Promjer letjelice	60 cm

3.4 Projektiranje sustava upravljanja letjelicom

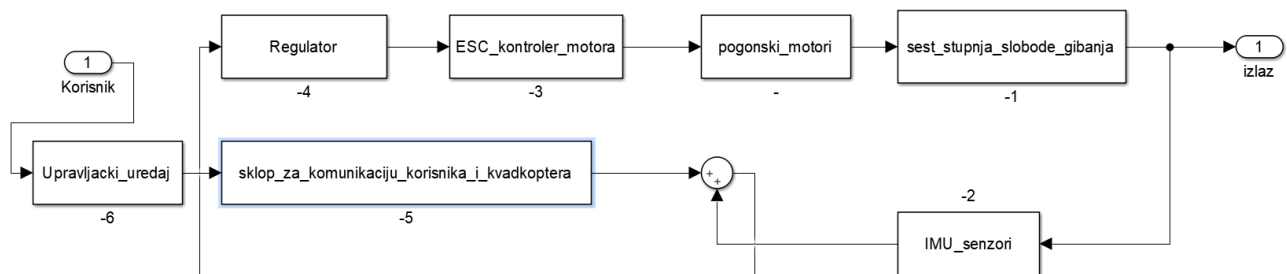
Prva stvar koju je bitno napomenuti, ono što se želi postići je upravljanje i regulacija, a ne čisto upravljanje. Dakle, treba izraditi regulator za letjelicu. Kvadkopter ima 6 stupnja slobode gibanja. Tri rotacije i tri translacije oko apsolutnog koordinatnog sustava (pogledaj 2.1). Uz to ima 4 motora. Posljedica toga je složena dinamika letjelice te složena izrada regulatora. Iz tog razloga, izrada regulatora nije obrađena u ovom radu.

Uz pretpostavku da je implementiran postojeći regulator, kako bi se kontroliralo ubrzanje, brzina i pozicija letjelice, korisnik mora imat mogućnost mijenjanja referentnih veličina regulatora.

Dakle, korisnik mora imat uređaj koji je sposoban vjerno predstavljat stupnjeve slobode gibanja kvadkoptera, a da je jednostavan za upotrebu. Pošto ovaj kvadkopter nije rađen na način da se kupi već gotov flight controller (kontroler leta, mikrokontroler s gotovim algoritmom upravljanja letjelicom) nego je sve „ručno izrađeno“, mora se izraditi i sama komunikacija između upravljačkog uređaja i glavnog mikrokontrolera letjelice odnosno regulatora.

Naime, tu se stvari dosta zakompliciraju. Zato će se postupak projektiranja i izrade objašnjavati korak po korak te će se polako proširivati njihov sadržaj.

Radi lakše vizualizacije upravljačkog sustava, napravljena je jednostavna odnosno primitivna shema cjelokupnog sustava na slici ispod.



Slika 31 Primitivna shema cjelokupnog sustava

Očito je da već i kod primitivne sheme postoji ne tako mali broj komponenata. Podsustav „Regulator“ ustvari predstavlja glavni mikrokontroler odnosno „kontroler leta“, u kojem se nalazi glavni algoritam.

3.4.1 Upravljački uređaji

Kao što sam podnaslov govori, sljedeća tema su upravljački uređaji. Ova letjelica je napravljena tako da se može kontrolirati ili pomoću mobitela ili preko HOTAS-a (hands on throttle and stick).



Slika 32 HOTAS

HOTAS je upravo onaj skup palica kojima pilot upravlja zrakoplovom. Uz to, koriste se i pedale za dodatni stupanj slobode gibanja. Palica (desno na slici 32) ima 2 stupnja slobode gibanja. To su takozvani Roll i Pitch pomaci. Roll pomak je rotacija oko x osi, a Pitch rotacija oko y osi. Pedale (engl. Rudder pedals) se koriste za upravljanje trećom rotacijom, tzv. Yaw odnosno Heading rotacijom.



Slika 33 Rudder pedals

Drugi dio HOTAS-a, gas (engl. Throttle) se koristi za mijenjanje nultog broja okretaja motora. Dakle, on samo pomiče referentnu točku snage motora kod lebdjenja, ali ne utječe direktno na sam regulator. Slike HOTAS-a i pedala su ovdje samo za lakše razumijevanje uređaja, ne predstavljaju i konkretni uređaj kojim se ovo kontrolira. Na tržištu postoji velik broj različitih HOTAS-a i pedala, od kojih se svaki može koristiti za upravljanje ovom letjelicom.

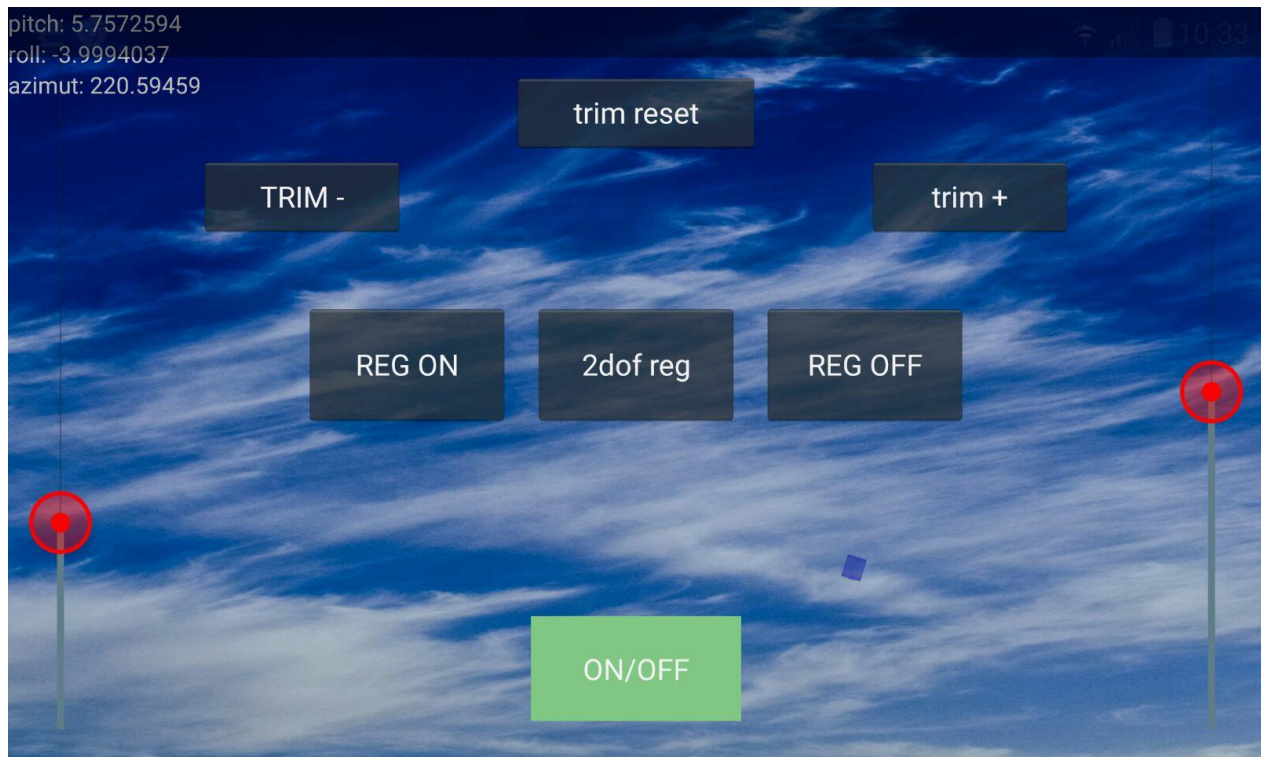
Nakon što se HOTAS i pedale spoje na računalo, mora se uspostaviti komunikacija između upravljačkog sklopa i kontrolora leta.

Komunikacija HOTAS-a i pedala postignuta je preko USB kabela. Informacije o poziciji svake osi tog upravljačkog uređaja dobivene su vrlo jednostavnim programom u Python jeziku, koristeći *Pygame*.

Sad kad je moguće dobiti informacije pozicije upravljačkog uređaja, te iste informacije treba prenesti do kontrolora leta. Ta komunikacije je ostvarena preko interneta.

Kako korištenje ove opreme nije praktično ako se upravljanje letjelicom ne odvija u zatvorenom prostoru, napravljena je aplikacija za mobitel. Ona koristi IMU senzore mobitela, skupa s par tipkala, kako bi se upravljalo letjelicom. Ta aplikacija, pod nazivom „Drone runner“ je intelektualno vlasništvo Ivana Bosnara.

Princip rada vrlo je jednostavan. Mobitel se, preko interneta, kad se aktivira aplikacija, spaja na server koji je već spomenut. Nakon svake promjene pozicije mobitela ili nakon promjene stanja tipkala, aplikacija kao klijent šalje buffer od 68 byte-a na server, što server prosljeđuje na ESP8266.



Slika 34 Drone runner, aplikacija za mobitel

3.4.2 Projektiranje komunikacije preko interneta

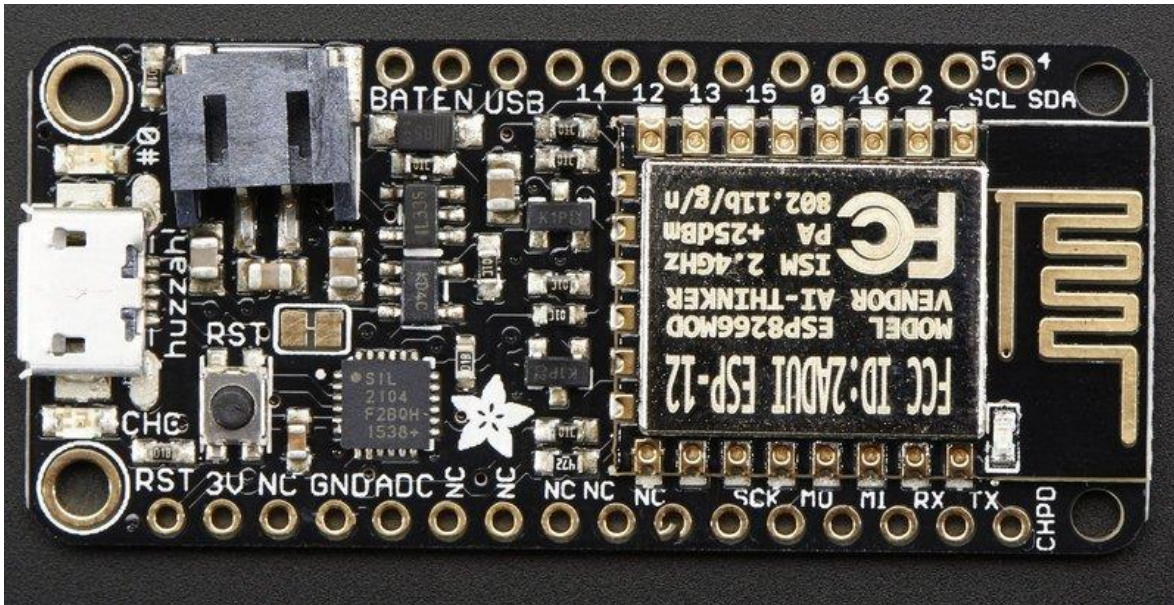
Korištenje komunikacije preko interneta jedna je od glavnih razlika naspram komercijalnih „dronova“. Svi komercijalni kvadrokopteri i ostale slične letjelice koriste radio komunikaciju. Time su ograničeni na domet radio prijarnika (maksimalni domet je oko 7km, ali su uređaji za to vrlo skupi). To nije jedino ograničenje. Problem je što ništa ne smije ometati radio valove na putu od korisnika do letjelica odnosno od predajnika do prijarnika. Drugim riječima, ne možete iz svog doma upravljati letjelicom koja se nalazi 2 km dalje od vas jer vaši zidovi najvjerojatnije neće propuštati radio signal.

Ti nedostaci su neutralizirani uporabom interneta kao medija za komunikaciju. Ali se pojavljuju novi problemi, a najveći je brzina prijenosa informacije. Taj problem će se kasnije dotaknut.

Dakle, sad treba napraviti programski algoritam za komunikaciju između računala i letjelice. Kao i kod svake druge komunikacije putem interneta, prvo se mora napraviti server. Taj server će biti računalo na koje je spojen upravljački sklop. Dakle, sad imamo komunikaciju između upravljačkog sklopa, računala i servera. Ne treba se spomenuti da je jedan od nužnih uvjeta povezanost računala s internetom. Zadatak servera je pripremanje informacije koje će bit poslana letjelicu. Sve informacije se „pakiraju“ u buffer od 64 byte-a. Prvih 32 byte je osigurano za listu „add“, koji sadrži 8 informacija od 4 byte-a. Ti podaci nose informaciju o tome koja os je

aktualna i koje tipkalo je promijenilo stanje. Drugih 32 byte-a je lista „*data*“. Ta lista nosi 8 podataka od 4 byte-a, čiji podaci daju trenutno stanje osi ili tipkala na koje „*add*“ ukazuje.

Sljedeći zadatak je ostvarenje mogućnosti da se kvadkopter spoji na internet. To je postignuto uporabom sljedeća dva uređaja.



Slika 35 ESP8266

ESP8266 je mikrokontroler koji ima mogućnost spajanja na Wi-Fi mrežu te kreiranje vlastite mreže. Ovisno o firmware-u, može se programirati u Lua jeziku, C, Arduino i Python. U ovom radu, ESP8266 je programiran Python jezikom. Naime, još uvijek nije ostvarena mogućnost spajanja na internet.

Kvadkopter ne nosi jednostavno na sebi Wi-Fi mrežu koja je spojena na internet. Kako bi se to postiglo, nužan je još jedan uređaj. U ovom slučaju, to je Alcatel prijenosni modem koji ostvaruje 4G vezu. Zašto ovaj uređaj, raspravljat će se kasnije kad se dotakne problem brzine internet veze.



Slika 36 Alcatel prijenosni modem

Na ovaj način je ostvarena mogućnost spajanja kvadrokoptera na internet. Sljedeći problem je programiranje ESP8266 mikrokontrolera kako bi se ostvarila stalna, uporna, stabilna, kvalitetna i sigurna komunikacija sa serverom. Ovaj problem je puno veći nego što se čini na prvi pogled. Naime, zbog prirode internet veze, moraju se koristiti svakakvi *trikovi* kako bi se osigurala stalna komunikacija. Ako slučajno dođe do prekida komunikacije, algoritam sam mora „shvatiti“ da se to dogodilo te se ponovo pokušat spojiti na server. Pošto se ova komunikacija bazira na programiranju tzv. *Socket-a*, problem otkrivanja pucanja komunikacije vrlo je složen. Konačno je riješen postavljanjem vremenskog ograničenja čekanja odgovora servera te čekanjem filtriranja samog port-a odnosno socket-a. Kada bi se načela i tema socket-a te same internet komunikacije, ovaj rad bi postao knjiga od nekoliko stotina stranica. Iz tog razloga neće se detaljnije raspravljati o tom problemu.

Izražena dodatna poteškoća koja se pojavila, osim usklađivanja komunikacija između 2 mikrokontrolera i između mikrokontrolera i interneta, je ograničenje radne memorije ESP-a. Priroda socket-a je ta da se on ne može odmah ugasiti i izbrisati iz radne memorije, već mora proći neko vrijeme. To vrijeme iznosi par sekundi. Zbog relativno brze veze komunikacije, tokom tih par sekundi bi se popunila radna memorija i mikrokontroler bi se zamrznuo. Primijenjeno rješenje je vrlo jednostavno. Ručno su se spremali podaci u liste te se kontrolirano brisali nakon točno određenog vremena, dok se druga lista popunjavala.

Kako bi se bolje objasnio sam problem, zamislite da imate varijablu a . Zatim napišete $a=2$. U redu, vaša varijabla ima vrijednost 2. Sljedeće što napišete je $a=3$. Sada vaša varijabla a nema vrijednost 2, nego 3. Logički, vrijednost $a=2$ bi se izbrisala iz radne memorije nakon što bi se varijabli a zadala nova vrijednost. Kod mikrokontrolera ESP8266 to nije bio slučaj. Zbog neobične prirode socket-a, svaka „zastarjela“ vrijednost ostala bi zapamćena u RAM-u te bi se s vremenom nakupljala i popunila RAM. Zato su korištene dvije različite liste koje se mijenjaju

nakon određenog broja razmjena informacija. Dok bi se jedna lista kontrolirano „čistila“, druga bi se punila.

Ovime smo riješili navedene i vrlo zanimljive probleme.

Sljedeći zadatak je ostvarit komunikaciju između ESP8266 mikrokontrolera (koji nosi buffer od 64byte-a s informacijama o upravljačkom sklopu) i kontrolora leta. Vrsta komunikacije je serijska komunikacija I²C. Ono što se može kasnije primijetiti u ovom radu je da su programirane razne vrste komunikacije, poput internet komunikacije, I²C, SPI, UART...

3.4.3 Projektiranje kontrolera leta

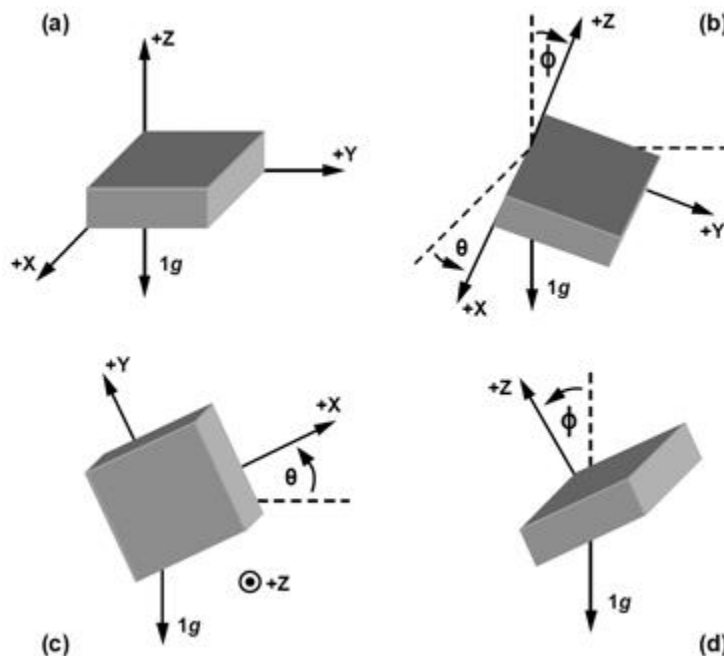
Glavni mikrokontroler, koji predstavlja „mozak“ ove letjelice, je ARM-ov STM32F405RG. To je 32-bitni mikrokontroler, brzine 168MHz-a sa flash memorijom od 1Mbyte-a i RAM-om od 128 + 64 Kbyte-a. Zbog novo razvijenog firmware-a, može se programirati u python jeziku. Poznat je pod nazivom „Micropython“ i „Pyboard“.

Ovaj mikrokontroler je odabran zbog brzine (168MHz-a), mogućnosti programiranja u Python jeziku te velikog broja I/O pinova i njihovih brojača (engl. Timer-a). Naime, vrlo moćan uređaj za relativno nisku cijenu.

Naime, upravljački algoritam nije malen. Iz razloga jer je Python interpreterski programski jezik, programski kod će zauzimati manje memorije i sporije se izvoditi. Dok, npr. kod C jezika to nije slučaj. C jezik je kompilatorski (engl. Compiler) jezik, što znači da će se cjelokupni programski kod analizirati odjednom i prevesti u strojni kod. Posljedica toga je brže izvođenje programskog koda, ali i veća potrošnja memorije.

Još jedna razlika između C jezika i Pythona je, u većini slučajeva, ta da je duljina Python programskog koda koji izvršava određenu funkciju daleko manja od C jezika koji izvršava tu istu funkciju. Odnosno, kod u Python-u od 50 linija često će biti jednak kodu u C-u od 100 linija.

Zbog stalnog utjecaja gravitacijskog ubrzanja Zemlje, lako je odrediti orijentaciju akcelerometra. Pretpostavi li se da senzor ne mijenja svoju brzinu, jedino izmjereno ubrzanje bit će g ubrzanje. Dok je senzor postavljen tako da je njegova vertikalna os paralelna s okomicom na površinu Zemlje, teorijski će izmjereno ubrzanje u smjeru horizontalnih osi biti 0, a u smjeru vertikalne osi jednako iznosu g ubrzanja. Ako se promijeni orijentacija senzora, kako znamo iznos gravitacijskog ubrzanja i njegov apsolutni smjer, lako se izračuna kut nagiba senzora preko dobivenih vrijednosti. Te dobivene vrijednosti bit će ništa drugo nego vektori gravitacijskog ubrzanja podijeljeni na osi senzora. Primjenom osnovne matematike, lako se izračunaju konačne vrijednosti kuta nagiba relativnog koordinatnog sustava.



Slika 38 Promjena položaja senzora

Ali ako dođe do promjene brzine odnosno dodatnog ubrzanja senzora, mjerenja će biti nevažeca.

Korištenjem samo žiroskopa ne možemo izračunati trenutnu poziciju već samo relativne kutne pomake u određenom vremenu. Teorijski, kad bi znali početni položaj žiroskopa, nakon kutnog pomaka znali bi i njegovu konačnu poziciju. Ali zbog nesavršenosti stvarnih senzora, to je nemoguće odnosno moguće je samo u kratkom vremenskom periodu, zbog bias-a senzora.

Magnetometar se koristi za funkciju kompasa. Poznavanjem trenutne pozicije na Zemlji i karakteristika Zemljinog magnetskog polja, može se, nakon mjerenja iznosa magnetskog polja u smjeru osi magnetometra, izračunati smjer sjevernog magnetskog polja. Naime, kako magnetometar ne može samo tako znati svoju poziciju na Zemlji, mora se provesti kalibracija senzora. Ako je kalibracija točno i precizno odrađena, senzor će raditi s maksimalnom točnošću.

Kombinacijom ta tri senzora, nakon filtriranja podataka (svaki fizički analogni el. senzor ima šum, veći ili manji), može se provesti fuzija podataka i konačno izračunat nagib odnosno položaj letjelice i orijentacija.

Korištenjem Kallmanovog filtera, jedan ciklus filtriranja odnosno fuzije traje oko 350ms. To je posljedica korištenja interpreterskog jezika, ne tako brzog mikrokontrolera i korištenja matrica u proračunu. Izmjereno vrijeme računanja inverza matrice dimenzija 3x3 pomoću micropythona iznosi malo više od 100ms. Kako bi Kallmanov filter dao dovoljnu točnost, njegova frekvencija osvježavanja (engl. Update-a) ne smije biti malena (ispod 20Hz kod dronova). Poželjno je da bude što veća, a to ovdje nije slučaj. Iz tog razloga, Kallmanov filter je izbačen iz upotrebe.

Filter koji se koristi je Madgwickov filter. Kad bi se objašnjavao način rada ovih filtera, ovaj rad bi postao knjiga. Pošto to nije nužno, taj dio će se preskočiti. U literaturi [6] se može saznati više o Madgwickovom filteru.

Glavna prednost Madgwickovog filtera naspram Kallmanovog je brzina izvođenja. Ona iznosi samo 2ms, što omogućuje visoku frekvenciju filtriranja i veliku točnost. S druge strane, Madgwickov filter ne daje onoliku točnost koliku bi dao Kallman s istom frekvencijom izvođenja ciklusa.

Konačno, s dovoljno kvalitetnim sensorima i kvalitetno podešenim koeficijentom β Madgwickovog filtera, može se postići zadovoljavajuća točnost očitavanja kutne pozicije letjelice.

Korišteni IMU senzor je ADIS 16364 od Analog Devices-a. To je modul dvaju troosnih senzora, akcelerometra i žiroskopa. Senzor je srednje kvalitete. Dakle precizniji je od dobro poznatih MPU9150 i MPU9250, ali i dalje nedovoljno precizan za primjenu kod raznih vozila.

Maksimalna točnost žiroskopa, nakon kalibracije i filtriranja, iznosi $0.008^\circ/\text{sec}$. Ujedno, uvjeti za takvu preciznost su kontrolirana vlažnost okoline, kontrolirana temperatura i vibracije senzora. Kako kod projektiranog kvadkoptera to nije slučaj, postignuta preciznost žiroskopa manjeg je iznosa, ali i dalje vrlo zadovoljavajućeg.

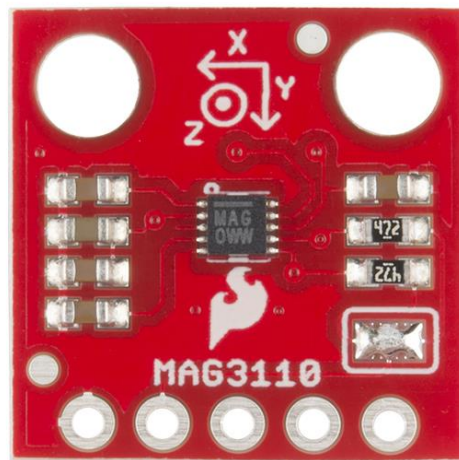
Preciznost akcelerometra je točnija od $0.01 \frac{m^2}{s}$, što je više nego dovoljno za uporabu kod projektirane letjelice.

Komunikacija glavnog mikrokontrolera s navedenim senzorom odvija se preko SPI protokola. Dakle komunikacija je vrlo brza, ali i zahtjevna za programirati i složiti.



Slika 39 ADIS 16364

Primjetno je da navedeni IMU senzor nema ugrađeni magnetometar. Korišteni magnetometar je MAG3110. Nakon kalibracije i filtriranja, postignuta preciznost je $\pm 0.3\%$, što zadovoljava potrebe kvadkoptera. Vrsta komunikacije ovog senzora je I²C. Taj tip komunikacije ne predstavlja vrlo brzu komunikaciju, ali nema gubljenja podataka te je jednostavna za programiranje.



Slika 40 MAG3110, magnetometar

Kako bi bilo moguće odrediti nadmorsku visinu letjelice, potrebno je mjeriti tlak i temperaturu okoline. Temperatura se mjeri pomoću termometra koji je ugrađen u korišteni IMU senzor, ADIS16364. Tlak se mjeri pomoću dobro poznatog elektroničkog senzora, BMP180.



Slika 41 BMP180, barometar

Preciznost mjerenja visinskog pomaka, pomoću barometra, iznosi $\pm 0.5\text{m}$. Zbog nedovoljne točnosti, utjecaj BMP180 senzora na regulator vrlo je malen, ali postoji. Vrsta komunikacije je I²C.

4. Realizacija projektiranog modela

Nakon spajanja svih električnih i procesorskih jedinica, 3D printanja konstrukcije te postavljanje svih jedinica na konstrukciju i unošenja programa, letjelica postaje stvarni fizički objekt. Slijedi testiranje kvadkoptera.

Prvi testovi provedeni su u radnoj prostoriji Udruge mehatroničara, koja je dio Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Pripreme za testiranje mogu se vidjeti na slici 42. Tokom prvih testiranja, skinuti su propeleri s motora zbog sigurnosnih razloga.

Osim uobičajenih problema koji su se otkrili testiranjem, poput gubitka kontakta žica, pojavilo se i nekoliko vrlo zanimljivih. Jedan od njih je raspored svih sadržajnih jedinica letjelice na samoj konstrukciji. Naime, ako se baterije, mikrokontroleri i ostalo ne postavi tako da centar mase nije u središnjoj osi konstrukcije, kvadkopter će prilikom polijetanja skrenuti na jednu stranu.



Slika 42 Realiziranje kvadrokoptera i testiranje

Potrebno je postaviti IMU senzore tako da se njihove osi poklapaju s osima konstrukcije. Prvi korišteni IMU senzori bili su MPU9150 i MPU9250. Ali, zbog vrlo loše preciznosti akcelerometra te velikih šumova žiroskopa tokom pojave vibracija na letjelici, ti senzori izlaze iz uporabe. Nakon njih je implementiran IMU senzor koji je već naveden, ADIS16364.

Jedan od vrlo zabrinjavajućih problema bio je posljedica loših IMU senzora te krivo podešenog Madgwickovog filtera. Zbog naglih, ali malih promjena konačnih vrijednosti Eulerovih kutova, tokom jednog testa kvadrokopter se bio prevrnuo. Došlo je do krivog očitavanja senzora uslijed vibracija i šuma žiroskopa, te je regulator krenuo ispravljati nepostojeću odnosno lažnu grešku. Poslan je signal motorima da naprave moment koji će ispraviti letjelicu. Kako je ona već bila u horizontalnom položaju, taj moment je prevrnuo letjelicu.

Nakon tog nemilog događaja, nabavljeni su kvalitetniji senzori. Uvedene su dodatne mjere sigurnosti preko programskog koda.

Podešavanje parametara regulatora nije obavljeno matematičkim metodama već dobro poznatom metodom pokušaja i promašaja.

Tokom testiranja dinamike letjelice odnosno regulatora, otkrivena su mnogobrojna korisna ponašanja.

Prema tome, ponašanje letjelice može biti ili tromo, ali vrlo stabilno, ili hitro sa smanjenom stabilnošću. Iz tih razloga, letjelica ima nekoliko različitih *modova* letenja. Jedan se koristi prilikom uzlijetanja i slijetanja, drugi se koristi za utrke, a treći za vrlo precizno letenje.

Dodatni uočeni problem, koji je narušavao stabilnost kvadkoptera, je brzina petlje programskog koda. Naime, kako se koristi Madgwickov filter, potrebna je što veća frekvencija osvježavanja filtera. Slično vrijedi i za Kallmanov filter. Kako bi se probao rasteretiti glavni mikrokontroler, s razlogom povećanja frekvencije osvježavanja filtera, uveden je još jedan mikrokontroler istog tipa, Pyboard.

Podijeljen je teret programskog koda između ta dva mikrokontrolera. Jedan mikrokontroler se bavi senzorima, a drugi upravljanjem i regulacijom.

Tokom provedenih testiranja, uočen je upravo suprotni efekt. Dobivena frekvencija osvježavanja filtera, odnosno općenito brzina izvođenja petlje, bila je manja. To je bila posljedica korištenja UART komunikacije. Sama komunikacija je toliko dugo trajala da je brzina petlje bila puno sporija.

Dakle, uvedeno multiprocesiranje radi povećanja frekvencije odrađivanja programske petlje, dovelo je do suprotnog efekta zbog vremena potrebnog da se izvrši UART komunikacija. Rješenje tog problema bilo bi korištenje SPI komunikacije, ali kako su ti pinovi na mikrokontroleru već zauzeti i ne mogu se zamijeniti, to nije moguće.

Još jedan primjetan problem, već spomenut u ovom radu, je pitanje brzine komunikacije putem interneta.

Nakon prvih pomaka upravljačkih uređaja, uočeno je kašnjenje signala čak i do dvije sekunde. Takvo kašnjenje se ne može tolerirati. Nije moguće stabilno upravljanje letjelicom. To je jednako tome kada bi regulator imao kašnjenje odziva od dvije sekunde. Dakle, sustav bi bio nestabilan i samim time vrlo opasan za svoju okolinu.

Problem nije bio samo u brzini komunikacije preko interneta, već i u brzini komunikacije između mikrokontrolera te u samom ESP-u.

Brzina internet veze riješena je korištenjem 4G komunikacije preko prijenosnog modema (slika 36).

Brzina komunikacije između mikrokontrolera riješena je uvođenjem dodatnog, trećeg, pina. Taj pin se koristi kao indikator „spremnosti“ za obavljanje komunikacije. Na taj način je osigurano maksimalno usklađivanje svih obavljanih komunikacija u kratkom periodu.

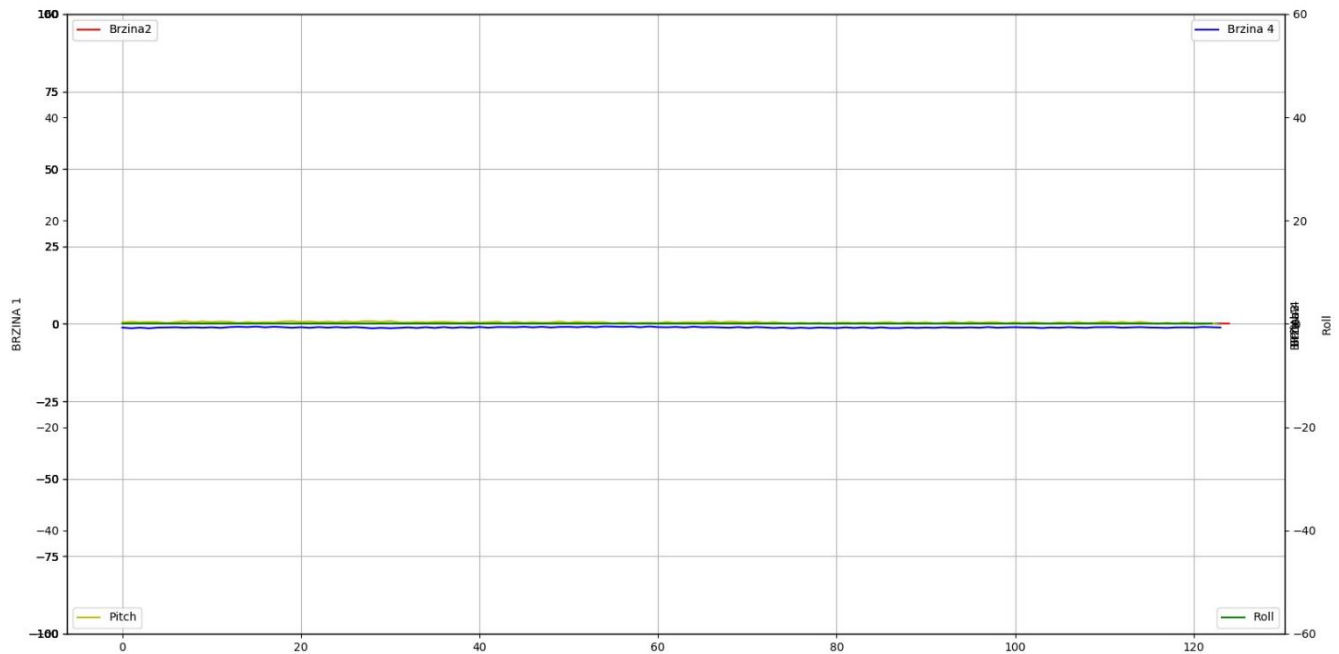
Problem ESP-a je riješen poboljšanjem njegovog firmware-a, a to su riješili ljudi koji su zaduženi za to.

Bitno je napomenuti da je ovaj problem, brzina internet veze, dovodio do potpunog gubitka komunikacije između servera i klijenta. Server ima određeno vrijeme čekanja klijenta. Ako se klijent ne bi pojavio, socket bi se zatvorio i ponovno otvorio. Isto tako, server nije tolerirao sporu komunikaciju klijenta, što je posljedica korištenog protokola. Jednostavno bi se Port napunio i više ne bi bilo moguće spajanje klijenta. Ti problemi su riješeni kontroliranim potpunim reboot-om servera, a i klijenta po potrebi.

4.1 Analiza dinamike letjelice

Kao što je već navedeno, dinamike letjelice uvelike ovisi o regulatoru, odnosno o pojačanjima regulatora (K_P , K_D i K_I). Isto tako, ovisi o preciznosti senzora koji se koriste kao nužna povratna veza za rad regulatora.

U ovom poglavlju analizirat će se odziv regulatora na pobudu.

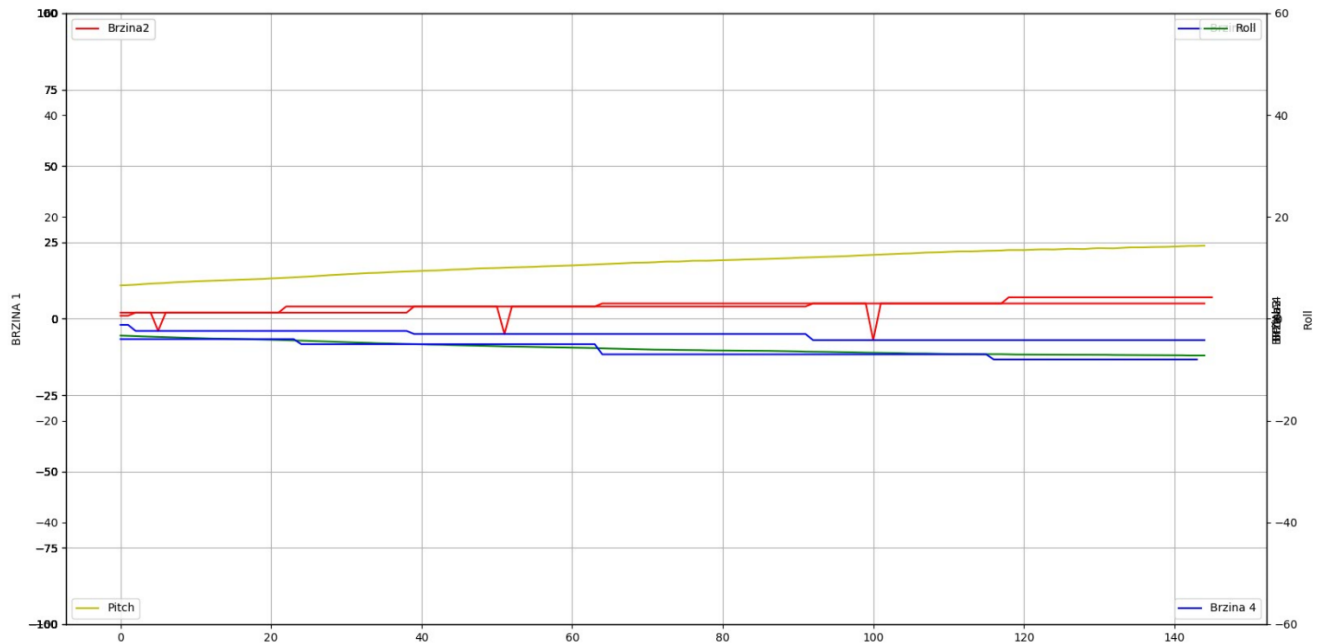


Slika 43 Odziv i pobuda tokom mirovanja

Prethodna slika prikazuje izmjerenu vrijednost Eulerovih kutova oko x i y (Roll i Pitch) osi te vrijednosti izlazne snage motora. Vidi se da je unutar 120 mjerenja, što odgovara otprilike periodu vremena od 3 sekunde, šum senzora vrlo malen, a snaga motora nepromijenjena.

Na ovom grafu, lijeva vertikalna os ima mjerne jedinice u stupnjevima [°], desna os na grafu pokazuje izlaznu snagu motora odnosno odziv regulatora. –60 je 0% snage, 60 je 100%. Slučajno se dogodilo da je masa kvadkoptera tolika da on lebdi kada motori rade na 50% snage. Naravno, to ovisi o naponu baterije. Donja, horizontalna os, predstavlja broj mjerenja. Period između 2 mjerenja iznosi oko 20ms.

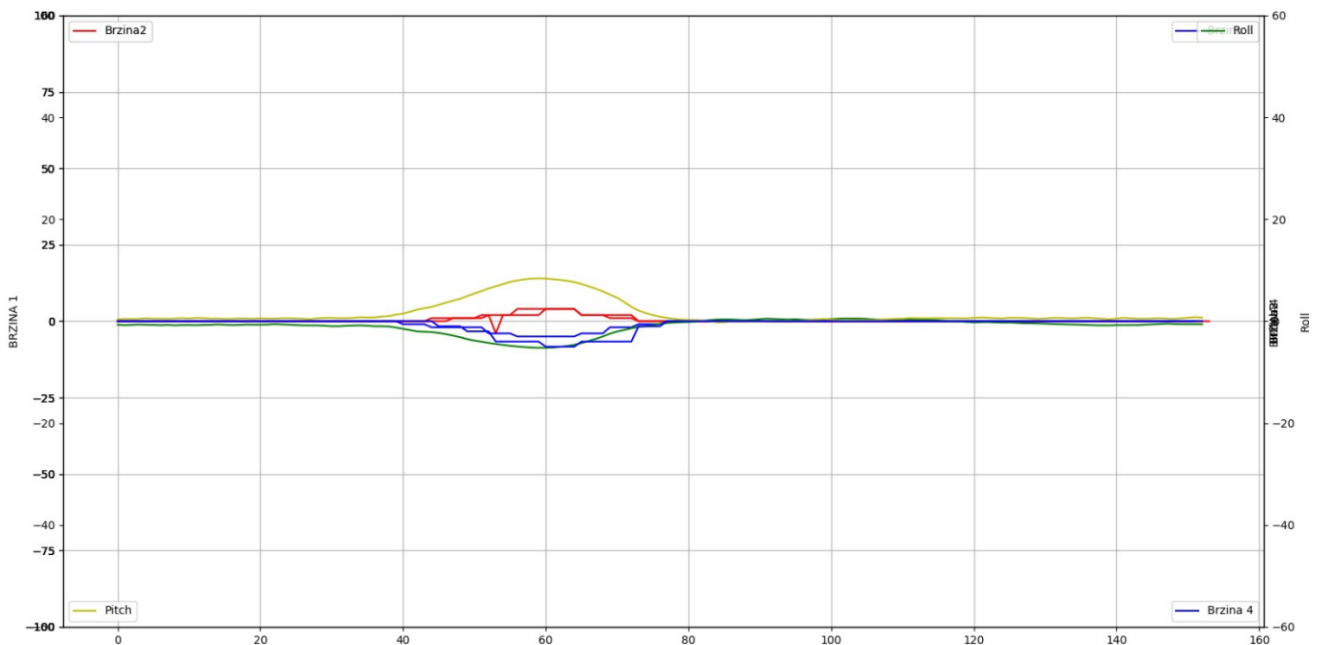
Referentna vrijednost, osim ako je drugačije navedeno, za sve kutove iznosi 0°.



Slika 44 Linearna pobuda

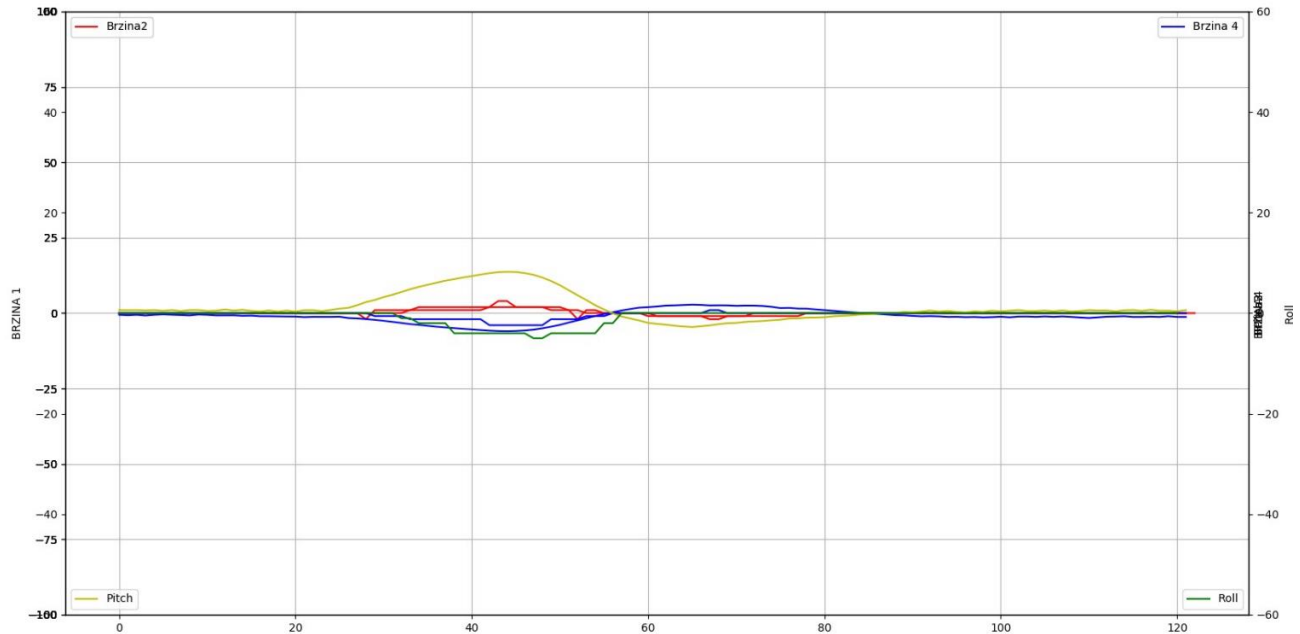
Zelena i žuta linija prikazuju nagib letjelice odnosno kutove Roll i Pitch. Crvene i plave linije predstavljaju izlaznu snagu motora. Nagle promjene kod crvene linije nisu nagle promjene vrijednosti izlazne snage motora već greška očitavanja.

Na slici 44 vidljivo je da je odziv regulatora dosta trom, s obzirom na pobudu. Drugim riječima, nema naglih promjena odziva.



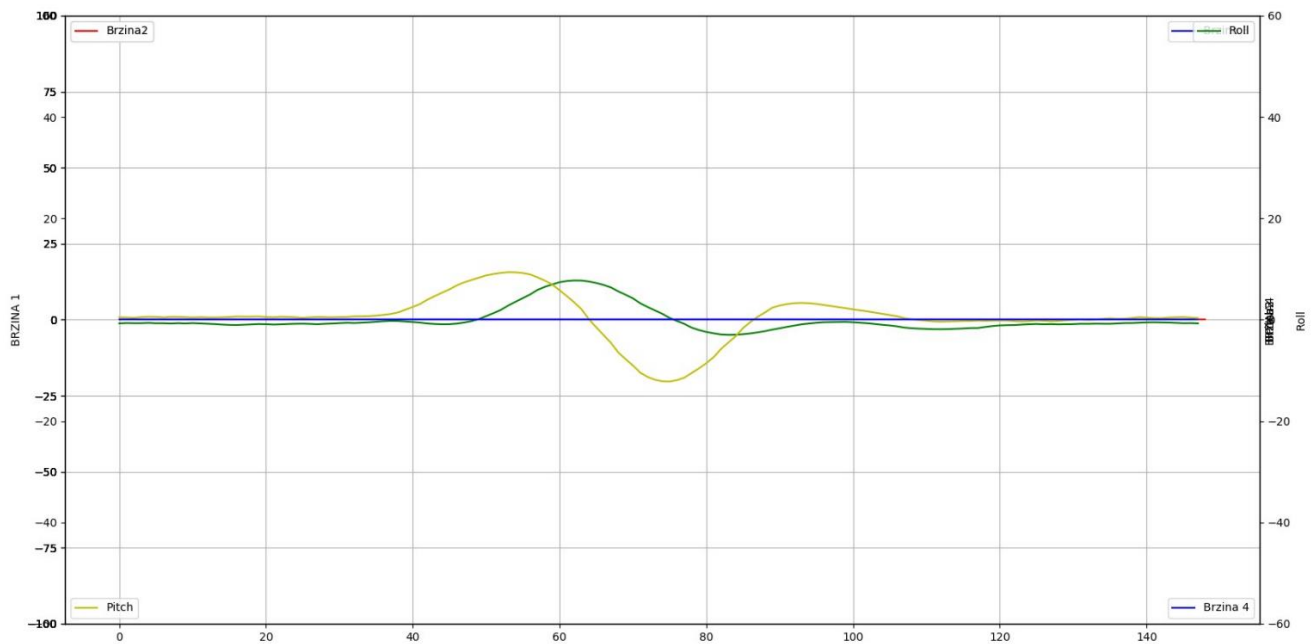
Slika 45 Nagla promjena orijentacije

Na slici 45 vidljivo je dosta slabo derivacijsko djelovanje regulatora, ali i vrlo izraženo integracijsko djelovanje. Kašnjenje odziva iznosi oko pola sekunde. Odabrano je takvo pojačanje (K_I) I regulatora kako bi letjelica ostala stabilna prilikom malih promjena nagiba, neočekivanih šumova senzora, udara vjetra itd.



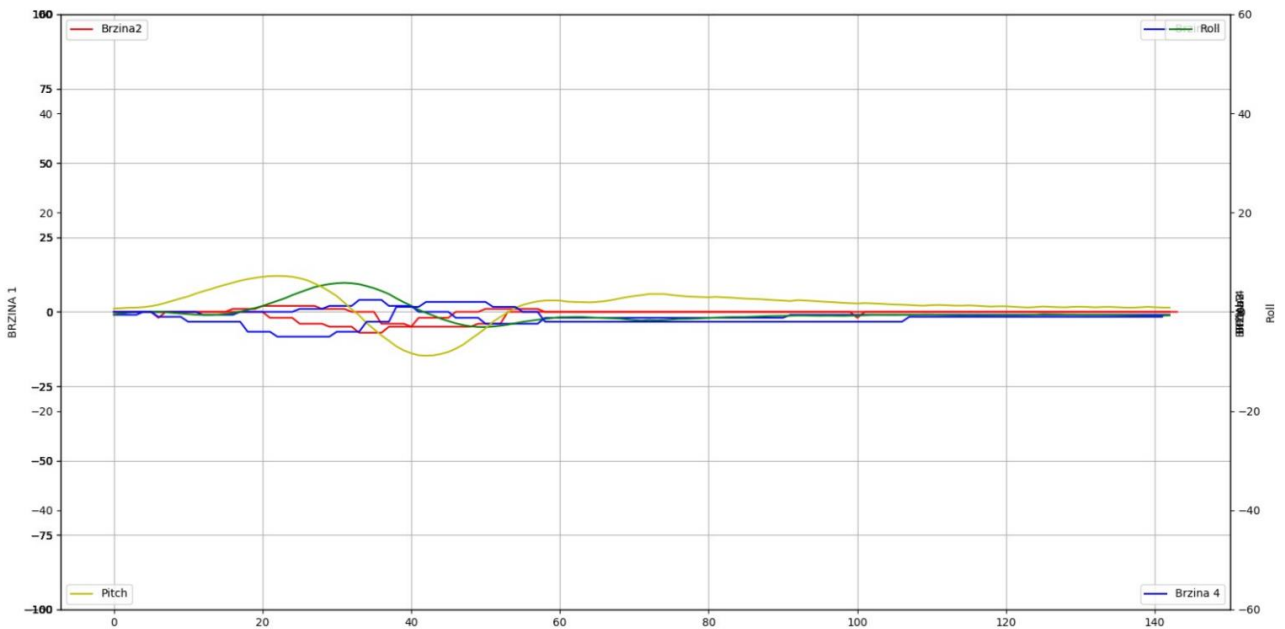
Slika 46 Odziv regulatora na kružno gibanje

Kod ovog slučaja isto je primjetno kašnjenje odziva za približno pola sekunde.



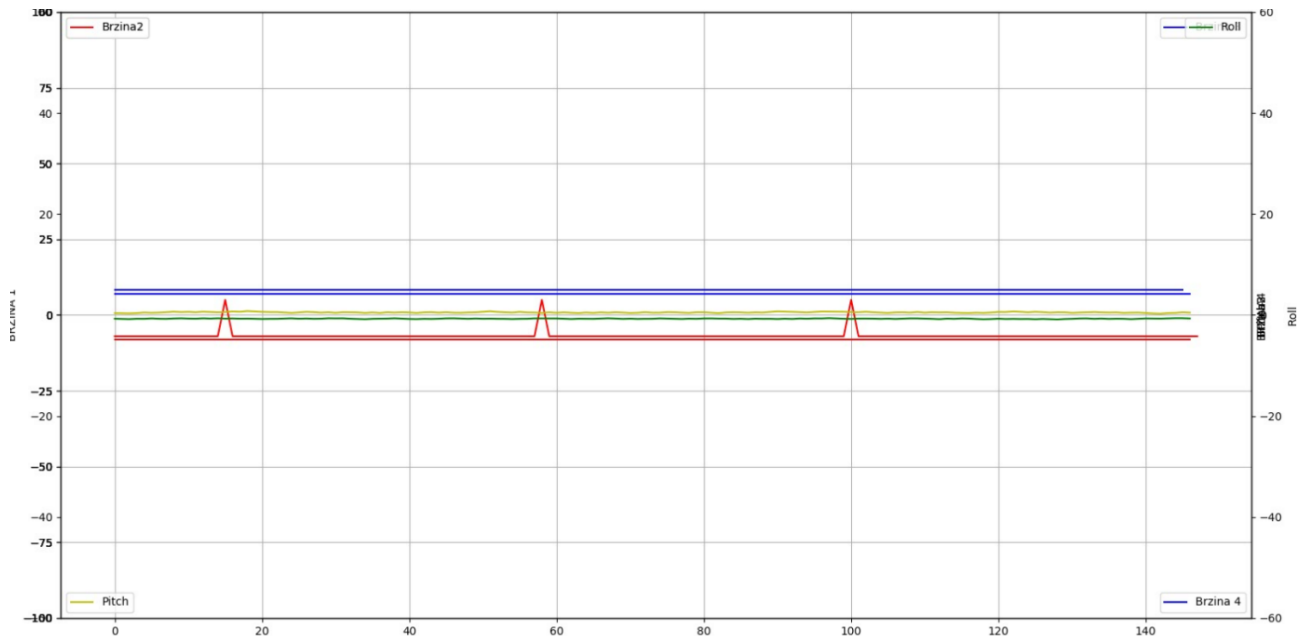
Slika 47 Promjena orijentacije letjelice prilikom isključenog regulatora

Prethodna slika prikazuje preciznost mjernih instrumenata. Regulator je isključen kako bi se bolje prikazale vrijednosti senzora. Očito je da nema primjetnih šumova ili nekih drugih smetnji. To je rezultat dobro podešenog Madgwickovog filtera i korištenja kvalitetnog senzora.



Slika 48 Odziv regulatora

Na slici iznad (slika 48), replicirana je orijentacija kvadkoptera sa slike 47, ali s uključenim regulatorom i promijenjenim pojačanjima. Ovdje je pojačanje K_i manje nego na prošlim grafovima. Primjetno je da je odziv regulatora puno brži i jači.



Slika 49 Promjena upravljačke veličine i odziv regulatora

Na slici 49 ne može se vidjeti iznos upravljačke veličine. Upravljački kutovi, odnosno referentne vrijednosti regulatora, u tom slučaju su iznosa 4° za kut oko x osi (Roll) i 3° za kut oko y osi (Pitch).

Ta orijentacija se odnosi na orijentaciju relativnog koordinatnog sustava s obzirom na apsolutni.

Očito je vrlo mirno i stabilno djelovanje regulatora.

5. Zaključak

Izrada kvadkopter letjelice podrazumijeva uporabu znanja iz nekoliko različitih grana znanosti. Te grane su:

- Elektrotehnika
- Mehanika
- Programiranje
- Informacijske tehnologije
- Automatizacija

Dakle, osoba koja želi projektirati i realizirati bespilotnu letjelicu, mora biti stručna u više područja. To nam daje djelomični odgovor na pitanje postavljeno u **3.1**, koje glasi „Vrijedi li to toliko? Ili je to posljedica nekonkurentnog tržišta?“. Naime, izradom bespilotnih letjelica bavi se cijeli tim stručnjaka, ako ne i nekoliko njih, što drastično povisuje cijenu ovakvih letjelica.

Izrada ovakve letjelice dugotrajan je i iterativan proces te zahtjeva ne samo opširno znanje (iz više područja), već i dubinsko znanje u svakome od tih područja znanosti. Najveći problemi su izrada regulatora te osiguravanje dovoljne procesorske moći, kao i kvalitete mjerenja, uz što niže cijene. Ne smije se zaboraviti na najveći problem, a to je pitanje sigurnosti ljudi i okoline. Uz vrlo jake motore, letjelica sa svojim oštrim propelerima, koji se vrte na 12 000 o/min, postaje vrlo opasna.

Rješenje nekih problema vrlo je jednostavno. Umjesto tima stručnjaka zaposlit jednu dovoljno obrazovanu iiskusnu osobu. Kao faktor sigurnosti može se izraditi sfera oko same letjelice, koji sprječava dodir propelera s okolinom. Zatim, potrebna je izrada vrlo preciznog regulatora s dovoljno kvalitetnom povratnom vezom. Ali, na cijenu senzora ne može se direktno utjecati.

Tokom samog rada, riješen je jedan od glavnih, ali i već spomenutih u ovom radu, problema postojećih kvadkoptera, a to je komunikacija. Očito je da je Internet komunikacija dovoljno brza i stabilna za kvalitetno upravljanje letjelicom, kao i dobivanje povratne informacije. Zatim, to je i jeftinije rješenje jer nema potrebe za kupovinom dodatnih radio upravljača. Najveća prednost leži u daljinskom upravljanju. Korisnik preko interneta može upravljati letjelicom koja se nalazi bilo gdje na Zemlji, a da ima interneta, dok je radio komunikacija ograničena na udaljenosti do svega nekoliko kilometara. Dodatno, što je veći doseg to je veća cijena radio prijavnika i predajnika.

Kako je potražnja sve veća, rast će i konkurencija na tržištu, posljedica čega će biti niže cijene ovakvih letjelica.

Konačno, očekuju se nove i drugačije primjene ovih letjelica, počinjući s medicinskom, građevinskom, prehrambenom i prijevoznom industrijom.

Literatura

- [1] *Dinamika letjelica*, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [2] Zdravko Virag, Mario Šavar, Ivo Džijan: *Mehanika Fluida*, Zagreb, 2014.
- [3] *Osnove aerodinamike*, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [4] Doris Novak, Tomislav Radišić: *Teorija leta helikoptera*, Zagreb, 2012.
- [5] *Aerodinamika, Poglavlje 8*, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [6] Sebastian O.H. Madgwick: *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*, 2010
- [7] *Model leta sa 6 stupnjeva slobode gibanja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Prilozi:

- I. DVD-R disc