

Analiza letnih značajki bespilotne letjelice Extra 330I

Meić-Sidić, Antun

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:331014>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Antun Meić Sidić

**ANALIZA LETNIH ZNAČAJKI BESPILOTNE LETJELICE
EXTRA 330L**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

Analiza letnih značajki bespilotne letjelice Extra 330l

Extra 330l Unmanned Aircraft Flight Performance Analysis

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Antun Meić Sidić

JMBAG: 0135230764

Zagreb, lipanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 10. ožujka 2020.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Performanse leta**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6271

Pristupnik: **Antun Meić-Sidić (0135230764)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Analiza letnih značajki bespilotne letjelice Extra 330I**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu potrebno je definirati predmet istraživanja, svrhu i cilj istraživanja, dati pregled dosadašnjih istraživanja razmatrane tematike, predložiti strukturu rada prema poglavljima te definirati očekivane rezultate istraživanja.

Opisati povijesni razvoj bespilotnih letjelica, predložiti klasifikaciju i objasniti princip rada bespilotnih letjelica.

Predložiti tehničko-tehnološke značajke letjelice Extra 330I, ukazati na specifičnosti u njezinom dizajnu, objasniti način podešavanja sustava te usporediti predmetnu letjelicu sa bespilotnim letjelicama sličnih karakteristika.

Izvesti konkretne zaključke o istraživanoj tematici i interpretirati rezultate istraživanja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

ANALIZA LETNIH ZNAČAJKI BESPILOTNE LETJELICE EXTRA 330L

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu dati će se povijesni pregled razvoja bespilotnih letjelica, njihova klasifikacija i namjena.

Kao studija slučaja uzeti će se primjer dizajniranja i izrade modela bespilotne letjelice Extra 330l te će biti opisani pogonski, upravljački i komunikacijski sustavi korišteni pri konstruiranju iste.

Analizirati će se letne značajke bespilotne letjelice Extra 330l te će se napraviti usporedna analiza s bespilotnim letjelicama sličnih letnih značajki.

KLJUČNE RIJEČI: bespilotna letjelica; performanse; dizajn; Extra 330l

EXTRA 330L UNMANNED AIRCRAFT FLIGHT PERFORMANCE ANALYSIS

SUMMARY

This master's thesis will provide a historical overview of the development of unmanned aerial vehicles, their classification, and purpose.

An example of designing and making a model of the Extra 330l unmanned aerial vehicle will be taken as a case study, and the propulsion, control, and communication systems used in its construction will be described.

The flight performance of the Extra 330l unmanned aerial vehicle will be analyzed, and a comparative analysis using unmanned aerial vehicles with similar flight performances will be done.

KEY WORDS: unmanned; aerial vehicle; model; performance;

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Andriji Vidoviću na podršci i povjerenju, te pruženoj prilici za mogućnost izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se članovima Modelarskog Aerokluba Velika Gorica na pomoći i nesmetanom korištenju prostora letjelišta za potrebe odvijanja letova

Veliko HVALA svima!

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OPĆENITO O BESPILOTNIM LETJELICAMA | 3 |
| 2.1. Povijesni pregled razvoja bespilotnih letjelica | 3 |
| 2.2. Klasifikacija bespilotnih letjelica | 10 |
| 2.3. Primjena bespilotnih letjelica | 13 |
| 2.4. Pregled regulative o bespilotnim letjelicama | 14 |
| 3. PRINCIP RADA BESPILOTNIH LETJELICA | 17 |
| 3.1. Principi upravljanja bespilotnim letjelicama | 19 |
| 3.2. Pregled sustava radio-upravljanja | 20 |
| 3.2.2. Servo-uređaji | 22 |
| 3.3. Baterijski sustav bespilotne letjelice | 23 |
| 3.4. Pogonski sustav bespilotne letjelice | 25 |
| 3.4.1. Klipni motori | 25 |
| 3.4.2. Mlazni pogon | 26 |
| 3.4.3. Električni pogon | 27 |
| 3.4.4. Karakteristike pogonskih sustava | 27 |
| 3.5. Dezorijentacija u upravljanju bespilotnom letjelicom | 28 |
| 4. DIZAJN MODELA ZRAKOPLOVA EXTRA 330L | 30 |
| 4.1. Konceptualni dizajn modela zrakoplova Extra 330l | 32 |
| 4.1.1. Konstrukcija V-n dijagrama modela zrakoplova Extra 330l | 33 |
| 4.1.2. Geometrija modela zrakoplova Extra 330l | 37 |
| 4.2. Odabir materijala i izgradnja modela zrakoplova Extra 330l | 40 |
| 4.2.1. Odabir materijala za model zrakoplova Extra 330l | 40 |
| 4.2.2. Izgradnja modela zrakoplova Extra 330l | 41 |
| 4.3. Ugradnja pogonskog sustava | 46 |
| 4.4. Ugradnja sustava daljinskog upravljanja i napajanja | 49 |
| 4.5. Lakiranje modela zrakoplova Extra 330l | 55 |
| 5. INICIJALNO PODEŠAVANJE SUSTAVA MODELA ZRAKOPLOVA | 57 |
| 5.1. Centar težišta modela zrakoplova | 57 |
| 5.2. Potisna os pogonskog sustava | 58 |
| 5.3. Kontrola i podešavanje otklona upravljačkih površina | 59 |

| | |
|--|----|
| 5.4. Podešavanje hoda snage pogonskog sustava | 62 |
| 6. ANALIZA I USPOREDBA LETNIH ZNAČAJKI MODELA ZRAKOPLOVA EXTRA 330L..... | 63 |
| 6.1. Ispitivanje modela zrakoplova Extra 330l na zemlji | 64 |
| 6.2. Ispitivanje modela zrakoplova Extra 330l u letu | 66 |
| 6.2.1. Ispitivanje letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l u standardnom letu | 67 |
| 6.2.2. Ispitivanje letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l u akrobatskom letu | 71 |
| 6.3. Analiza letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l..... | 72 |
| 6.4. Usporedna analiza sličnih bespilotnih letjelica | 74 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 79 |
| LITERATURA..... | 81 |
| POPIS KRATICA | 84 |
| POPIS SLIKA | 85 |
| POPIS TABLICA..... | 87 |
| POPIS GRAFIKONA..... | 88 |

1. UVOD

Bespilotne letjelice prema definiciji letjelice su teže od zraka sa fiksnim ili rotirajućim krilima, upravljane daljinsko ili autonomno bez ljudske posade. Razvijaju se u vojne ili civilne svrhe, a danas u eksponencijalnom rastu primjenu nalaze i u komercijalnim namjenama.

Razvoj i dizajn bespilotnih letjelica uključuje primjenu inovativnih rješenja sustava bespilotnih letjelica koje prije svega ovise o njezinoj namjeni. Razvojem kompozitnih materijala i tehnološkim napretkom omogućene su razne primjene bespilotnih letjelica.

U diplomskom radu opisan je povijesni pregled razvoja bespilotnih letjelica, njihova klasifikacija i namjena. Kao studija slučaja uzeti će se primjer konstruiranja akrobatskog modela bespilotne letjelice Extra 330l za sportsku namjenu natjecanja u akrobatskom letu. Biti će opisano razvojno rješenje bespilotne letjelice Extra 330l kao i svih sustava potrebnih za potpunu funkcionalnost. Analizirati će se letne značajke bespilotne letjelice Extra 330l te će se napraviti usporedna analiza s bespilotnim letjelicama sličnih letnih značajki.

Svrha istraživanja je razvoj bespilotne letjelice Extra 330l, definiranje svih sustava potrebnih za funkcionalnost letjelice s ciljem postizanja određenih letnih performansi za prisustvovanje na natjecanjima akrobatskog letenje kategorije F3M.

Cilj istraživanja je objasniti principe dizajniranja bespilotne letjelice Extra 330l, definirati rješenja po pitanju konstrukcije, pogona, upravljanja, odnosno svih sustava za potpunu funkcionalnost letjelice. Cilj je također prikazati rezultate analize letnih značajki letjelice Extra 330l te napraviti usporednu analizu letnih značajki i tehničkih karakteristika sličnih bespilotnih letjelica.

Diplomski rad je sadržajno koncipiran u sedam poglavlja:

- Uvod
- Općenito o bespilotnim letjelicama
- Princip rada bespilotnih letjelica
- Dizajn modela zrakoplova Extra 330l
- Inicijalno podešavanje sustava zrakoplova
- Analiza letnih značajki zrakoplova Extra 330l
- Zaključak

U uvodnom djelu definirani su predmet istraživanja, svrha i cilj istraživanja te je predočena struktura diplomskog rada.

Drugo poglavlje definira pojam bespilotne letjelice te je predočena podjela s obzirom na namjenu. U ovom poglavlju prikazan je povijesni pregled razvoja bespilotnih letjelica od najranijih početaka do danas. Opisana je klasifikacija i primjena bespilotnih letjelica, te je prikazan pregled regulative o upotrebi istih.

U trećem poglavlju opisan je princip rada bespilotnih letjelica i način na koji funkcioniraju. Opisani su principi upravljanja, te je detaljno opisan pregled sustava radio-upravljanja. Također su opisani baterijski sustavi napajanja kao i pogonski sustavi koji se koriste u bespilotnim letjelicama. Završno je opisan fenomen dezorijentacije prilikom upravljanja bespilotnom letjelicom.

Četvrto poglavlje detaljno opisuje dizajn modela zrakoplova Extra 330l, aspekte projektiranja te zahtjeve i razvojne faze. U ovom poglavlju opisuje se proces konceptualnog dizajna modela zrakoplova i potrebni proračuni za definiranje geometrije istog. Opisan je izbor materijala za izgradnju modela zrakoplova te sama tehnologija izrade. Detaljno su opisani svi pojedinačni sustavi koji su potrebni za funkcioniranje modela zrakoplova.

Peto poglavlje odnosi se na inicijalno podešavanje svih sustava modela zrakoplova. Opisane su glavne provjere i podešavanja sustava prije faze testiranja. Objašnjena su inicijalna podešavanja sustava upravljačkih površina i njihovo funkcioniranje, te kontrola i stavljanje u rad pogonskog sustava.

Šesto poglavlje opisuje performanse zrakoplova te daje detaljan uvid u mogućnosti i ograničenja uporabe. Detaljno su opisani inicijalni i testni letovi te ispitivanje rada pojedinih sustava na zemlji i u letu. Uz opisana ispitivanja letnih značajki, prikazana je analiza istih te usporedba tehničkih i letnih značajki sa sličnim modelima zrakoplova u svrhu evaluacije.

U posljednjem, zaključnom djelu, predstavljena je sinteza svih postignutih zaključnih razmatranja o razvoju, izradi modela zrakoplova te analizi letnih značajki promatrane bespilotne letjelice. Objašnjen je utjecaj razvojnih faza, odabira materijala i važnosti ispitivanja u svrhu potpunog uvida u performanse i mogućnosti testirane letjelice.

2. OPĆENITO O BESPILOTNIM LETJELICAMA

Bespilotne letjelice (engl. *Unmanned Aircraft Vehicle – UAV*) predstavljaju naprave odnosno zrakoplove namijenjene izvođenju letova autonomno ili daljinsko upravljani od operatera udaljenog od same letjelice. Pod sustavom daljinskog upravljanja podrazumijeva se izvođenje letova bespilotne letjelice pri kojima je pilot u neprestanom vizualnom kontaktu s bespilotnom letjelicom.

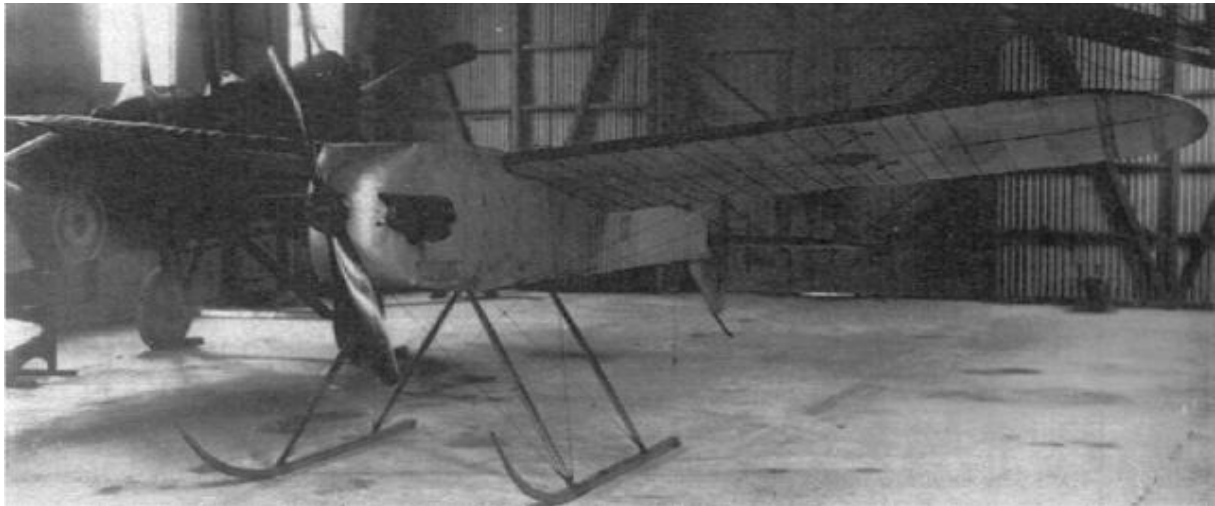
Primjena sustava bespilotnih letjelica (engl. *Unmanned Aircraft System – UAS*) može se promatrati kroz vojne operacije, civilne komercijalne i nekomercijalne namjene. Razvoj bespilotnih letjelica odrazio se i u komercijalnom te vojnom zrakoplovstvu kroz primjenu tehnologija i rješenja koja se odnose na dizajn istih. Bespilotne letjelice sektor su u zrakoplovstvu koji eksponencijalno raste pojavom naprednih tehnologija koje omogućavaju izradu letjelica sve manjih dimenzija. To potiče rast upotrebe bespilotnih letjelica, kako od strane osoba kojima je upravljanje bespilotnim letjelicama hobi, tako i kod profesionalnih operatera te predstavlja novi trend i potencijal u primjeni bespilotnih letjelica u gospodarstvu. [1]

2.1. Povijesni pregled razvoja bespilotnih letjelica

Razvoj bespilotnih sustava je zapravo započeo prvom radijskom kontrolom koju je osmislio izumitelj Nikola Tesla 1898. godine. Teslin izum bespilotnog modela broda prvi je primjer upravljanja napravom od strane operatera koji je vezu ostvarivao bežično. Patent Nikole Tesle se sastoji od modela broda koji je opremljen akumulatorom električne energije, elektromotorom koji služi za pogon broda, elektromagnetskim servomotorom koji je upravljao kormilom te radio prijammikom i antenama za primanje radiovalova poslanih od uređaja predajnika kojim upravlja operater. [1]

Demonstracijom daljinskog upravljanja broda Nikola Tesla inicirao je daljnji razvoj besposadnih naprava među kojima su i besposadne letjelice. Tijekom 1916. godine te kratko nakon prvog svjetskog rata dizajnirana je prva bespilotna letjelica pod nazivom "zračna meta" što joj je također bila i namjena (slika 1). Bespilotnu letjelicu dizajnirao je Henry Phillip Folland, engleski zrakoplovni inženjer te dizajner zrakoplova i Archibald Montgomery Low, engleski inovator koji je zaslužan za sustav radijskog upravljanja. Besposadna letjelica težila je 227 kilograma, izrađena od drvene konstrukcije sa upravljačkim površinama na

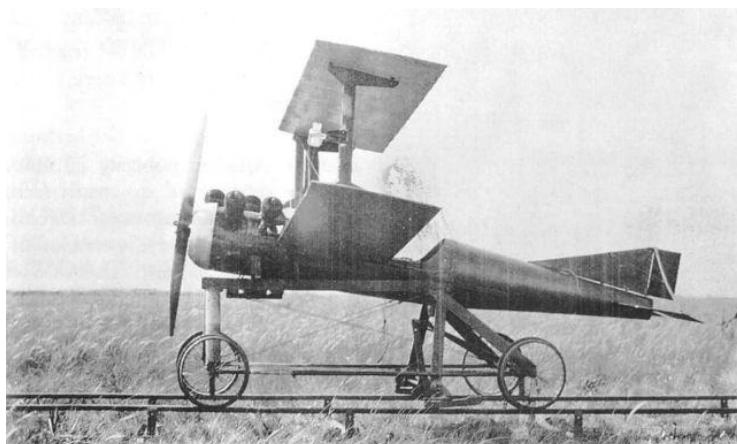
vertikalnom i horizontalnom stabilizatoru. Radio signalom poslanog od predajnika, preko antena sa vrhova krila elektromehaničkom jedinicom zakretana je jedna od potrebnih upravljačkih površina te je na taj način provođen radio-upravljeni let bespilotne letjelice sa zemlje ili iz zrakoplova u letu s posadom. [2]



Slika 1. Bespilotna letjelica "zračna meta"

Izvor: [2]

Nedugo zatim američka vojska proizvela je bespilotnu letjelicu "Kettering Bug" poznatiju kao zračni torpedo prikazana slikom 2. Letjelica je opremljena žiroskopskim sustavom upravljanja te elektromehaničkim sustavom kojim je zamišljeno odbacivanje krila nakon definiranog trajanja leta te se trup sa 82 kilograma eksploziva pretvara u "zračni torpedo".



Slika 2. Bespilotna letjelica "Kettering Bug"

Izvor: [3]

Nakon prvog svjetskog rata nastavlja se tehnološki razvoj bespilotnih letjelica. Američka vojska 1930. godine eksperimentira sa tehnologijom radio-upravljanja koja je implementirana u prenamijenjenu letjelicu Curtiss N2C-2 1937. godine (slika 3). [4]



Slika 3. Bespilotna letjelica Curtiss N2C-2

Izvor: [5]

Prva serijska proizvodnja dronova započela je s bespilotnom letjelicom Radioplane OQ-2 koja je daljinski upravljana od strane operatera na zemlji koja se koristila kao meta za uvježbavanje vojske. Radioplane OQ-2 (prikazan slikom 4) proizveden je u više od 9.000 primjeraka te je najviše korišten tijekom drugog svjetskog rata. [4]



Slika 4. Bespilotna letjelica Radioplane OQ-2

Izvor: [6]

Za masovnije korištenje bespilotnih letjelica zaslužan je izum Edwarda Sorensena koji je izgradnjom zemaljskih navigacijskih terminala omogućio let bespilotnih letjelica izvan vidljivog polja operatera. Izumi poput zemaljskih navigacijskih terminala pridonijeli su pojavi bespilotne letjelice Doodlebug V-1 prikazane slikom 5, koja je upotrebljavana od strane njemačke vojske. Riječ je o prvim bespilotnim letjelicama s pulsним mlaznicama koje su poznate i kao "krstareće rakete".

Tijekom Vijetnamskog rata bespilotne letjelice bile su opremljene kamerama što im je dalo potpuno novu svrhu. Istraživanje neprijateljskog teritorija iz zraka bio je veliki korak za uporabu bespilotnih letjelica u vojnim misijama.

Napredak vojnih bespilotnih letjelica 1960-ih godina može se vidjeti iz primjera bespilotne letjelice Ryan Firebee BQM-34A. Firebee letjelica (prikazana slikom 6) imala je glavnu svrhu simulirati taktičku prijetnje neprijateljskih zrakoplova i projektila za obuku i obranu te testiranje i ocjenjivanje sustava naoružanja. Dizajnirana je da postiže brzine do 0,97 Macha, imala je izdržljivost na veća opterećenja konstrukcije te visokopotisni pogonski sustav. Imala je ulogu realne prezentacije prijetnji te mogućnost ponovnog povratka u misiju.

[4]



Slika 5. Bespilotna letjelica Doodlebug V-1

Izvor: [7]



Slika 6. Беспилотна летjelica Ryan Firebee BQM-34A

Izvor: [8]

Početak 1970-ih razvijen je prvi bespilotni helikopter pod nazivom Dash QH-50 čija je svrha bila onesposobljavanje neprijateljskih brzonapadnih podmornica, te je ujedno i prvi tip bespilotnog helikoptera koji je bio u serijskoj proizvodnji. Imao je mogućnost nošenja opreme i naoružanja mase do 500 kilograma. QH-50 opremljen sonarom i tada vrlo naprednim sustavom upravljanja smatran je vrlo preciznom bespilotnom letjelicom vojne namjene koju je koristila i japanska vojska. [9]



Slika 7. Беспилотни helikopter Dash QH-50

Izvor: [9]

Američka vojska 1980. godine započinje Pioneer UAV program, s ciljem izgradnje jeftinijeg bespilotnog zrakoplova za vojne operacije izviđanja. Zajedničkom suradnjom SAD-a i Izraela 1986. godine nastaje izviđačka bespilotna letjelica RQ-2A Pioneer prikazana

slikom 8. RQ-2A ima dolet od 185 kilometara te omogućuje informacije u realnom vremenu o izviđanju, nadzoru, trenutnom stanju na terenu. Kompozitna konstrukcija i manja dimenzija letjelice bile su značajke koje su otežavale radarskim sustavima da otkriju ovu bespilotnu letjelicu u nadziranim područjima. [10]



Slika 8. Bespilotna letjelica RQ-2A

Izvor: [10]

Period između 1990-te i 2010-te godine bio je ključan za razvoj bespilotnih letjelica za vojne i civilne svrhe. Težilo se alternativnim izvorima energije za pogon i napajanje besposadnih letjelica kao i razvoju minijature kategorije bespilotnih letjelica. Među najpoznatijim izviđačkim bespilotnim letjelicama tih godina razvijen je RQ-1 Predator (prikazan na slici 9) koji je opremljen video kamerama, infracrvenim kamerama i kamerom za izradu kvalitetnih snimaka iz zraka. Koristi satelitski sustav koji omogućuje prijenos informacija u realnom vremenu neovisno o udaljenosti od baze. Također može biti opremljen raketnim naoružanjem ako to misija zahtijeva. [11]



Slika 9. Bepilotna letjelica RQ-1 Predator

Izvor: [11]

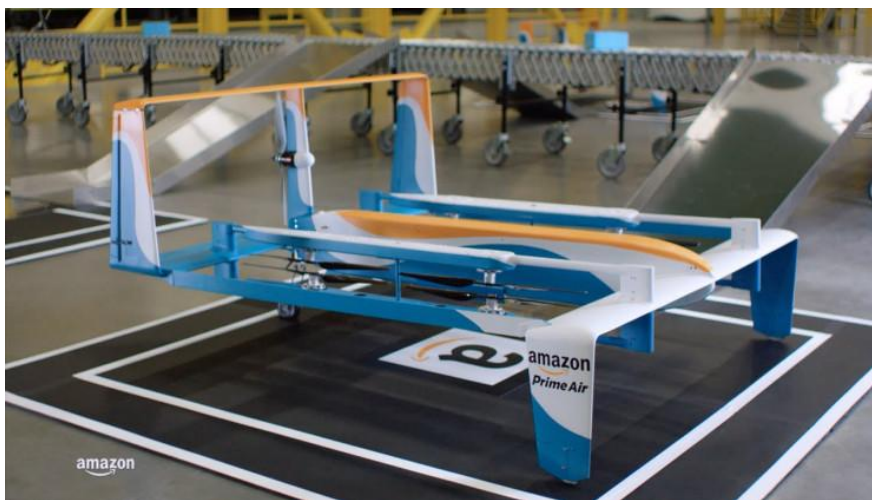
Za to vrijeme također su korištene manje bespilotne letjelice razvijene u svrhu nadzora sa manjih visina. Primjer takve letjelice je i Raven (slika 10) čija je masa ispod 2 kilograma. Lansira se iz ruke te je sposoban operirati unutar 10 kilometara te infracrvenim video materijalom ili slikama u stvarnom vremenu obavljati zadaće izviđanja. [12]



Slika 10. Bepilotna letjelica Raven

Izvor: [12]

Unazad desetak godina zabilježena je velika ekspanzija bespilotnih letjelica. Iako su se u začetima razvoja bespilotne letjelice primarno koristile u vojne svrhe ili hobi i natjecateljske svrhe, zadnjih godina bespilotne letjelice su se počele koristiti za širok spektar komercijalnih namjena. Primjena radio-upravljanih letjelica opremljenih kamerama i tehnologije pametnih telefona omogućuje razvoj djelatnosti koje se bave komercijalnom fotografijom i videografijom, a operativni troškovi su razvojem novih tehnologija svedeni na minimum. Razvoj mikrokontrolera, akcelerometra i žiroskopskih uređaja otvara nove mogućnosti upotrebe bespilotnih letjelica s 4 ili više rotora ili letjelica s fiksnim krilima (slika 11). [4]



Slika 11. Bespilotna letjelica s pet rotora

Izvor: [4]

Manja masa, dimenzije i laka upravljivost bespilotnih letjelica sa više rotora, omogućuje primjenu te vrste letjelica za potrebe nadzora od strane policijskih i vatrogasnih službi, međutim sve masovnija uporaba bespilotnih letjelica pokreće i pitanja o zaštiti privatnosti te fizičkoj sigurnosti.

2.2. Klasifikacija bespilotnih letjelica

Bespilotne letjelice često nazivane i besposadne letjelice predstavljaju tehnički sustav s fiksnim krilom ili s dva ili više rotora pomoću kojih se formira aerodinamički uzgon za let. Konstrukcijom, dizajnom i funkcijom može ih se usporediti sa raznim vrstama letjelica poput

aviona i helikoptera. Iz samog naziva ovog tipa letjelica jasno je da se upravljanje odvija izvan platforme letjelice odnosno upravljanje je daljinsko. Bepilotne letjelice mogu biti dizajnirane za jednokratnu ili višestruku upotrebu te mogu nositi teret ovisno o namjeni. Klasifikacija bepilotnih letjelica od samog početka razvoja radila se prema vrsti misije, istrajnosti leta, doletu, masi, maksimalnoj visini leta, tipu pogona, itd.

Bepilotne letjelice razlikuju se prema načinu upravljanja. Stoga se bepilotne letjelice mogu podijeliti prema vrsti upravljanja koja može biti ograničena na područje vidokruga ili neograničena što ovisi o sustavu daljinskog upravljanja koji se koristi za nadzor i upravljanje. U većini slučajeva pilot na zemlji upravlja bepilotnom letjelicom sustavom daljinskog upravljanja. U vojnim i komercijalnim operacijama ovakav način upravljanja koristi se za relativno kratke zadatke.

S ciljem smanjenja broja pilota i pratećeg osoblja te samim time i smanjenjem troškova operacija razvijen je unaprijed programirani sustav upravljanja bepilotnim letjelicama. Takav sustav samostalnog upravljanja ima sposobnost donošenja odluka za vrijeme samog leta i te prilagodbi potrebama same misije. Bepilotne letjelice dijele se na više ili manje autonomne s obzirom na razinu opremljenosti i unaprijed programiranim letom.

Prema načinu polijetanja i slijetanja bepilotne letjelice dijele se na one koje imaju mogućnost:

- vertikalnog uzlijetanja i slijetanja (bepilotne letjelice sa rotorima),
- horizontalnog uzlijetanja i slijetanja (bepilotne letjelice sa fiksnim krilima),
- nesamostalnog uzlijetanja (postizanje minimalne brzine leta bepilotne letjelice osigurava se pomoću ručnog ubrzanja ili posebnih katapulta).

Prema namjeni bepilotne letjelice podijeljene su na civilne i vojne, a civilne se dijele na komercijalne i nekomercijalne bepilotne letjelice.

Klasifikacija bepilotnih letjelica prema funkcionalnosti može se podijeliti na više zasebnih tipova:

- borbene bepilotne letjelice – obavljanje napada u visoko-rizičnim misijama,
- izviđačke bepilotne letjelice – obavljanje nadzora i izviđanja nedostupnih teritorija,

- bespilotne letjelice mete – simuliranje mete za kopneno i zračno naoružanje,
- logističke bespilotne letjelice – obavljanje dostave tereta,
- civilne i komercijalne bespilotne letjelice – komercijalna snimanja iz zraka, prikupljanje podataka, natjecateljske namjene i replike klasičnih zrakoplova,
- bespilotne letjelice za istraživanje i razvoj – razvoj tehnologije bespilotnih letjelica, razvojni modeli letjelica budućih namjena.

Klasifikacija bespilotnih letjelica prema masi, plafonu leta i doletu prikazana je u tablici 1. Najzastupljenije bespilotne letjelice su prema masi u lakšoj kategoriji, dok su letjelice većih masa većinom vojne namjene te ih je svega nekoliko primjera na svijetu poput RQ-4 Global Hawk-a koja ima masu preko šest tona. Maksimalna visina leta i maksimalni dolet od velike je važnosti za bespilotne letjelice vojne namjene prilikom izvršavanja zadanih misija i izviđanja određenih prostora. U tablici su prikazane karakteristike doleta i visina leta koje direktno ovise o veličini odnosno masi bespilotnih letjelica. Bespilotne letjelice težih kategorija sposobne su ostvariti veće visine leta te veće dolete zahvaljujući ugrađenoj opremi, sustavima za napajanje i pogonskim sustavima koji ne mogu biti smješteni u manjim i lakšim letjelicama. [13]

Tablica 1. Klasifikacija bespilotnih letjelica

| Kategorija | Masa (kg) | Plafon leta (m) | Dolet (km) |
|-----------------------|-----------|-----------------|------------|
| Mikro | <1 | 90 | <5 |
| Mini | <25 | <3000 | <25 |
| Kratkog dometa | <200 | <4500 | <75 |
| Srednjeg dometa | <750 | <7600 | <200 |
| Srednje visine leta | >1000 | <9100 | >1000 |
| Srednje visine leta + | >3000 | >9100 | >1000 |
| Visoke visine leta | >3000 | >13700 | >1000 |

Izvor: [13]

2.3. Primjena bespilotnih letjelica

Iz pregleda povijesnog razvoja može se zaključiti da je prva značajnija primjena bespilotnih letjelica bila u vojne svrhe. Vojska je zaslužna za razvoj tehnologije koja se prilagođavala potrebama vojnih operacija. Razvoj novih tehnologija za vojne svrhe omogućio je primjenu bespilotnih letjelica u mnogim drugim civilnim komercijalnim i osobnim primjenama.

Korištenje bespilotnih letjelica u razvojne svrhe od velike su važnosti za istraživanje u ranoj fazi proizvodnje zrakoplova. Prednost uporabe bespilotnih letjelica za ispitivanja i testiranja određenih sustava i elemenata je dobivanje točnih rezultata u realnim uvjetima uz relativno niske troškove.

Bespilotne letjelice se danas praktički koriste u svim granama gospodarske djelatnosti, a u nastavku su navedene samo neke od mogućih primjena.

Jedna od najranijih primjena bespilotnih letjelica bila je za nadziranje i inspekciju infrastrukture cjevovoda. Danas se ista tehnologija primjenjuje za nadziranje naftnih platformi te naftnih i plinskih postrojenja.

Bespilotne letjelice sve se više koriste u inspekcijama infrastrukture koje su visoko rizične ljude koji su do pojave bespilotnih letjelica morali osobno vršiti inspekciju. Bespilotne letjelice opremljene raznim mjernim uređajima u potpunosti zamjenjuju inspekcijske preglede kao što su pregledi solarnih panela, inspekcije krovova, inspekcije dalekovoda, vjetroelektrana, rudarske inspekcije, itd.

Danas bespilotne letjelice uvelike koriste poljoprivrednici za nadzor stoke, usjeva, vodostaja te za daljnje planiranje budućih nasada stvaranjem mape krajolika. Japanski poljoprivrednici među prvima su primijenili bespilotne letjelice za zaprašivanje usjeva što je znatno jeftinije od korištenja helikoptera ili poljoprivrednih zrakoplova.

Upotreba bespilotnih letjelica pružanjem pravovremenih informacija o područjima pogođenim prirodnim katastrofama znatno olakšava organizaciju i aktivnosti svih nadležnih službi. Na taj način daje se potpora iz zraka praćenjem trenutnog stanja situacije.

Sustavom bespilotnih letjelica obavlja se i fotogrametrijsko mjerenje područja, te kartiranje i najnepristupačnijih područja uz vrlo male troškove snimanja i minimalni rizik za operatore. [14]

Bespilotne letjelice opremljene uređajima za mjerenje kvalitete zraka koriste se u operacijama nadzora onečišćenja i pružaju analizu u realnom vremenu te na različitim nadmorskim visinama. [15]

Službe potrage i spašavanja primjenjuju bespilotne letjelice u svojim akcijama, skeniranjem velikih površina određenog područja u kratkom vremenu što omogućuje pravovremeno djelovanje u cilju spašavanja ljudskih života.

Programi znanstvenih istraživanja koji su preopasni za zrakoplove s posadom, provode se korištenjem bespilotnih letjelica. Primjer takvih istraživanja je praćenje uragana i prijenos podataka Nacionalnim centrima za uragane. Također se bespilotne letjelice koriste za praćenje i procjenu velikih požara i erupcija vulkana. [16]

Prilikom provedbe zakona mnoge policijske uprave primjenjuju bespilotne letjelice u nadzoru situacije iz zraka, suzbijanju kriminala, carinskom nadzoru te nadzoru državnih granica. Mnoge vatrogasne službe te službe hitne pomoći u suradnji s policijskim službama upravo za nadzor i detekciju koriste sustave bespilotnih letjelica. Bespilotne letjelice primjenu imaju i u filmskoj industriji te snimanja sportskih događanja diljem svijeta. [17]

Od 1930-ih godina avio-modelarstvo postiglo je veliku popularnost, iako radio-upravljanje nije bilo operativno dovoljno razvijeno, korištene su bespilotne letjelice kontrolirane pomoću upravljačkih čeličnih užadi i unaprijed podešene letjelice slobodnog leta. Šezdesetih godina prošloga stoljeća održana su natjecanja u akrobatskom letenju bespilotnih letjelica u konkurenciji. Avio-modelarstvo je danas najvažnija disciplina međunarodne organizacije svjetskog zračnog sporta (FAI - FÉDÉRATION AÉRONAUTIQUE INTERNATIONALE). Danas postoji velik broj kategorija avio-modelarstva bilo da se radi o avionima, jedrilicama, helikopterima i svemirskim letjelicama. [18]

2.4. Pregled regulative o bespilotnim letjelicama

Bespilotne letjelice posljednjih 15-ak godina doživljavaju ekspanziju što za rezultat ima širok dijapazon mogućih primjena u različitim civilnim komercijalnim i nekomercijalnim operacijama. Danas je gotovo svima dostupna tehnologija bespilotnih letjelica, kako komponenata od kojih se sastavljaju, tako i gotovih modela spremnih za upotrebu. Dostupnost, manevarske sposobnosti, tihi rad, upravljanje na daljinu ili unaprijed programirane, neke su od karakteristika bespilotne letjelice koje mogu predstavljati ozbiljan problem sigurnosti. Za podizanje razine sigurnosti i sprečavanje nezakonitih aktivnosti donesene su regulacije za operacije bespilotnim letjelicama.

Pravilnikom o sustavima bespilotnih zrakoplova propisani su opći, tehnički i operativni uvjeti za sigurno korištenje bespilotnih letjelica, sustava bespilotnih letjelica i bespilotnih modela zrakoplova. Također su propisani i uvjeti za operatere pilote bespilotnih letjelica koji su izravno uključeni u izvođenje letova.

Bespilotne letjelice operativne mase veće od 5 kilograma moraju biti označene negorivom identifikacijskom pločicom s podacima o operateru i bespilotnoj letjelici.

Pilot bespilotne letjelice dužan je osigurati izvođenje leta na način da ne predstavlja opasnost po život, zdravlje ili imovinu ljudi u slučaju udara ili gubitka kontrole nad bespilotnom letjelicom.

Misija europske agencije za zrakoplovnu sigurnost je postaviti što obuhvatniji sigurnosni regulatorni okvir koji uključuje i osnovne zakone vezane za sigurnost Europske unije. [19]

Prostor za obavljanje leta bespilotnih letjelica podijeljen je u tri kategorije - otvorena, posebna i certificirana kategorija, ovisno o razini potrebnog odobrenja za obavljanje letnih operacija. Za operacije u otvorenoj kategoriji nisu potrebna odobrenja ili dozvola pilota, ali su ograničene letne operacije vizualnim vidokrugom te visinom leta do 120 metara. Posebna kategorija uključuje operacije bespilotnim letjelicama koje premašuju ograničenja otvorene kategorije. Posebna kategorija uključuje bespilotne letjelice mase veće od 25 kilograma ili operacije bespilotnim letjelicama izvan vidnog polja. Prije odvijanja operacije u ovoj kategoriji operater mora izvršiti procjenu rizika te ispuniti tehničke zahtjeve za bespilotne letjelice i posjedovati potvrdu o osposobljenosti pilota. Certificirana kategorija predstavlja zonu visokog rizika, a uključuje operacije većih bespilotnih letjelica u kontroliranom zračnom prostoru. Pravila i regulacije u ovoj kategoriji za bespilotne letjelice vrijede kao i za zrakoplove s posadom. Bespilotne letjelice moraju posjedovati važeće certifikate o plovidbenosti, a piloti valjane dozvole dok upravljanje provodi nadležna kontrola zračne plovidbe.

U Republici Hrvatskoj o pravilima i postupcima za rad bespilotnih letjelica govori provedbena Uredba komisije (EU) 2019/947. Ovom se Uredbom utvrđuju detaljne odredbe za rad sustava bespilotnih zrakoplova, kao i za osoblje, uključujući udaljene pilote i organizacije uključene u rad tih sustava.

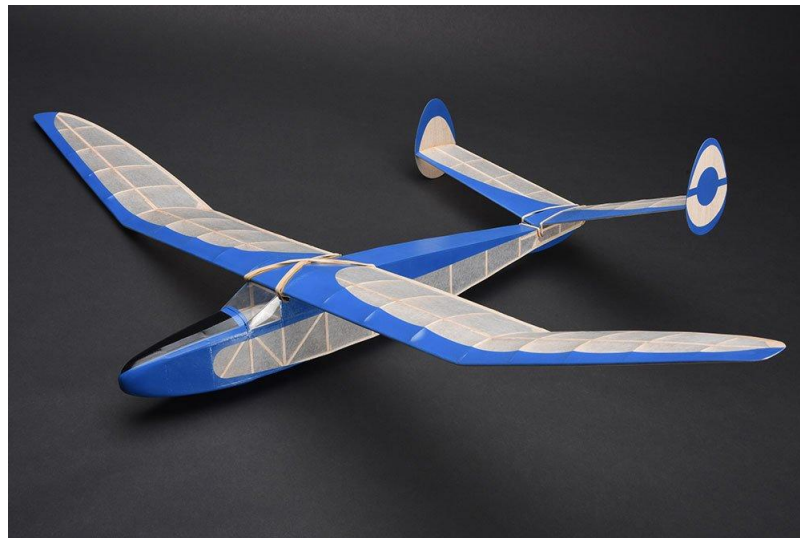
Operacije se provode u tri prethodno navedene kategorije te su podložne propisanim uvjetima. Uredbom su definirani postupci i pravila za rad bespilotnim letjelicama te postupci i pravila za osposobljenost pilota istih. Nadalje Uredba propisuje pravila i postupke vezane za plovidbenost bespilotnih letjelica kao i pravila za procjenjivanje operativnog rizika. Prilikom

prijedloga mjera za ublažavanje rizika na osnovi procjene rizika u posebnoj kategoriji nadležno tijelo ocjenjuje iste te s obzirom na skladnost sa svim primjenjivim pravilima izdaje odobrenje za rad podnositelju zahtjeva. Uredbom je također definirano certificiranje sustava bespilotnih letjelica kao i registracija operatora te radni uvjeti zemljopisnih područja za sustave bespilotnih letjelica. U okviru zrakoplovno-modelarskih klubova i udruga za operacije bespilotnim letjelicama nadležno tijelo može izdati odobrenje za rad. Svaka država članica imenuje jedno ili više nadležnih tijela zaduženih za zadaće te pružanja sigurnosnih informacija. [19]

3. PRINCIP RADA BESPILOTNIH LETJELICA

Bespilotne letjelice funkcioniraju prema jednoj od tri osnovne metode:

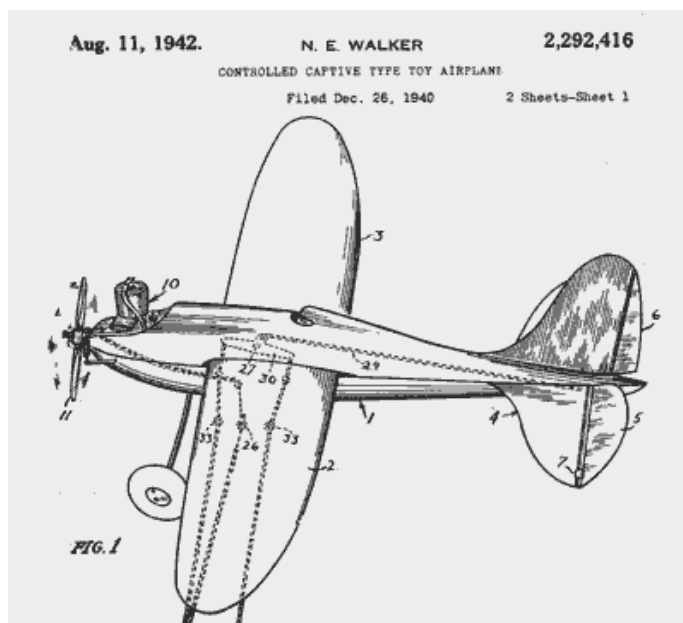
- Slobodno-leteće bespilotne letjelice (engl. *free flight*) nisu upravljane osim unaprijed postavljenim upravljačkim površinama za usmjeravanje letjelice. Za izvođenje samog leta ova vrsta bespilotnih letjelica mora imati visoki stupanj stabilnosti. Većina ovakvih letjelica manjih su dimenzija te su u izvedbi jedrilica bez pogona (slika 12).



Slika 12. Slobodno-leteće bespilotne letjelice

Izvor: [20]

- Kontrolirane bespilotne letjelice (engl. *control line*) predstavljaju letjelice koje su upravljane pomoću čeličnih užadi bilo da se drže rukom ili su fiksno vezane za središnje vezište (slika 13). Tako vezana letjelica leti u krugovima oko središnje točke. Jedno čelično užde služi za osiguranje, dok su ostala dva za kormilo visine i kontrolu snage motora. Ovakva vrsta letjelica može se koristiti za izvođenje određenih akrobacija te imaju mogućnost ostvarivanja velikih brzina koje dostižu i do 300 km/h.



Slika 13. Kontrolirana bespilotna letjelica

Izvor: [21]

- Radio-upravljanе bespilotne letjelice (engl. *radio controlled*) sadrže upravljačku jedinicu kojom se pomoću odašiljača šalju signali prijammiku u samoj letjelici. Ti primljeni signali u letjelici pokreću servomotore koji upravljaju upravljačkim površinama letjelice (slika 14). Moderniji primjeri bespilotnih letjelica koriste žiroskopske uređaje za automatsku stabilizaciju letjelice ili za samostalno upravljanje letjelice. Takva tehnologija korištena je u većini vojnih misija bespilotnim letjelicama, a danas sve više u bespilotnim letjelicama s više rotora.



Slika 14. Radio-upravljana bespilotna letjelica

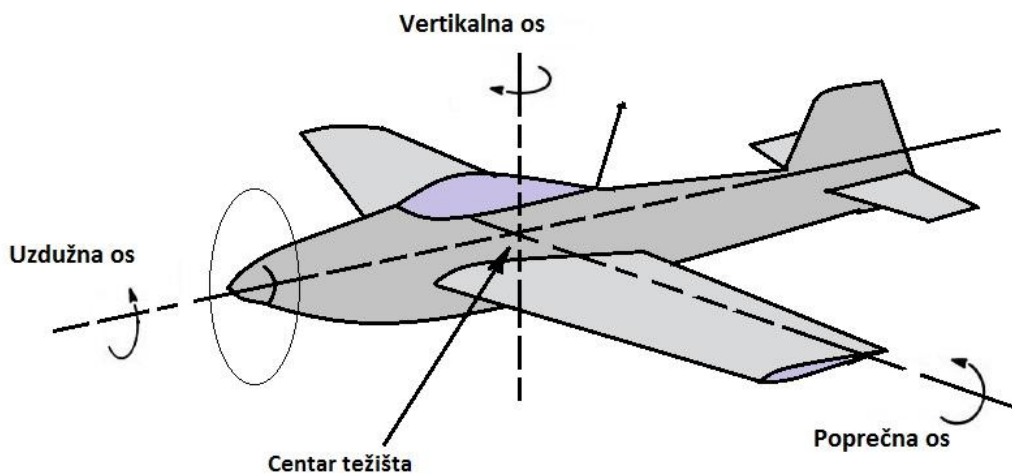
Izvor: [22]

3.1. Principi upravljanja bespilotnim letjelicama

Upravljanje bespilotnim letjelicama i sustavima bespilotnih letjelica obavlja se upravljačkim stanicama koje koristi udaljeni pilot, a pomoću koje upravlja promjenom brzine, visine, pravcem leta, itd. Manevarska kontrola i kontrola kretanja od velike je važnosti za sigurno letenje bespilotne letjelice. Učinkovitim rukovanjem ručica i prekidača na daljinskom upravljaču postiže se potrebna kontrola leta u zasebnim osima prema slici 15. Određeni pokret bespilotne letjelice posljedica je zasebnog pokreta kontrolne ručice na upravljaču te se željeno upravljanje postiže kombinacijom upotrebe više kontrolnih komandi istovremeno.

Upravljanje bespilotnom letjelicom obavlja se kroz četiri osnovne kontrole:

- okretanje oko uzdužne osi (engl. *roll*)
- okretanje oko poprečne osi (engl. *pitch*)
- okretanje oko okomite osi (engl. *yaw*)
- upravljanje snagom (engl. *throttle*)



Slika 15. Prikaz osi bespilotne letjelice

Izvor: [23]

Okretanje oko uzdužne osi predstavlja nagnjanje letjelice lijevo ili desno. Ovo okretanje kod letjelice s fiksnim krilom postiže se pomoću zakretanja krilaca na krajevima

krila dok se kod letjelica s jednim ili više rotora postiže promjenom osi potiska. Okretanje oko poprečne osi usmjerava letjelicu tako da se propinje ili ponire. Okretanje oko poprečne osi postiže se zakretanjem kormila dubine (visine) kod letjelica s fiksnim krilom odnosno promjeni osi potiska kod letjelica s rotorima. Okretanje oko okomite osi predstavlja manevar zakretanja letjelice u lijevo ili desno. Ovakva zakretanja postižu se zakretanjem kormila smjera (pravca) kod letjelica s fiksnim krilom odnosno repnim rotorom ili razlikom u potisku nasuprotnih rotora kod letjelica s jednim ili više rotora. Kontrola snage bespilotne letjelice tijekom leta stalno je u primjeni i također se obavlja pomicanjem ručice na upravljaču. Kretanjem letjelice u oko bilo koje od ove tri osi utječe se na promjenu uzgona i otpora čime se pilotu omogućuje upravljanje bespilotnom letjelicom u svim segmentima leta.

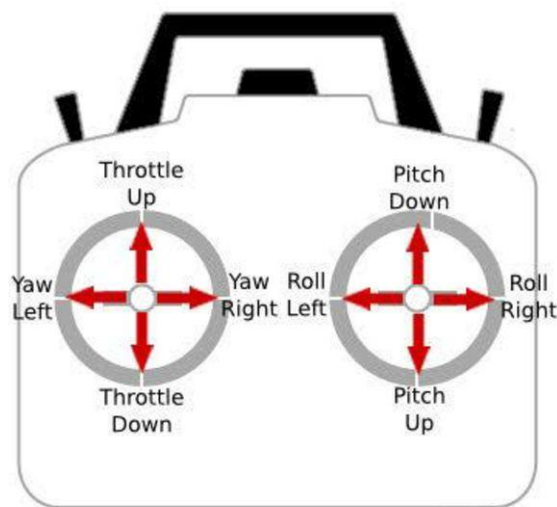
3.2. Pregled sustava radio-upravljanja

Sustavi radio-upravljanja danas se sastoje od niza sofisticiranih elektroničkih uređaja relativno malih dimenzija i mase što je od velike važnosti za korištenje u bespilotnim letjelicama.

Predajnik (upravljačka jedinica) predstavlja uređaj na kojemu se pomicanjem upravljačkih ručica i prekidača zadaje naredba bespilotnoj letjelici. Pilot pomoću predajnika ostvaruje radio-vezu s prijemnikom u bespilotnoj letjelici koji prima signal od odašiljača i šalje ga servo-uređajima. Prijemnik ima kao i predajnik zasebni kanal za pojedinu funkciju prema potrebi. Primjerice, 4-kanalni sustav dovoljan je za jednostavniju bespilotnu letjelicu koja ima osnovne upravljačke funkcije. Servo-uređaji smješteni su unutar bespilotne letjelice te je njihova funkcija zakretanje upravljačkih površina, promjena snage motora, uvlačenje stajnog trapa, itd. I predajnik i prijemnik trebaju odgovarajući stabilan izvor napajanja za nesmetan rad. Većina opreme za radio-upravljanje napajana je punjivim baterijama koje su ugrađene u sami predajnik i bespilotnu letjelicu. Sustavi radio-upravljanja također su opremljeni i mnogim drugim upravljačkim elementima poput žiroskopa, autopilota, telemetrijskih uređaja, itd.

3.2.1. Predajnici sustava radio-upravljanja

Predajnici (daljinski upravljači) opremljeni su sa dvije upravljačke ručice uz koje se nalaze ručice za podešavanje i mnoštvo prekidača za razne funkcije (slika 16). Predajnici danas omogućuju niz drugih mogućnosti uz ove glavne koje su primarne za obavljanje leta. Svaki sustav radio-upravljanja radi na zasebnoj frekvenciji te najnovija tehnologija omogućuje rad na dvije zasebne frekvencije istovremeno što omogućuje veću pouzdanost sustava.



Slika 16. Predajnik/daljinski upravljač

Izvor: [24]

Jedna od mogućnosti predajnika je programiranje rada funkcija. Programiranje podrazumijeva postavljanje smjera i maksimalnog hoda rada servo-uređaja, kao i osjetljivost komandi i promjenu krajnjih položaja zasebnih funkcija. Podešavanja krajnjih točaka servo-uređaja omogućuju da se hod zakreta uređaja u jednom smjeru podesi u različitom postotku u odnosu na drugi smjer. Kod eksponencijalnog podešavanja upravljanja omogućeno je da se promjeni omjer u kojem se servo-uređaj zakreće u odnosu na pomak upravljačke ručice. Na primjer, ako se pomakne upravljačka ručica u jednom smjeru, tada je moguće postaviti servo-uređaj da se manje zakreće oko neutralnog, a više oko krajnjeg položaja ili obrnuto. Današnji daljinski upravljači imaju mogućnost memoriranja svih postavki za određenu bespilotnu letjelicu te je na taj način moguće isti uređaj koristiti za više bespilotnih letjelica. Uz ove funkcije moguće je i miješanje dvaju kanala odnosno kombiniranje dvije funkcije da

istovremeno rade jednom naredbom. Na primjer, upravljanje kormilom može se kombinirati s upravljanjem krilaca tako da istovremeno djeluju.

3.2.2. Servo-uređaji

Servo-uređaji predstavljaju električne uređaje čija je namjena izvršavanje određenih naredbi kroz mehaničko zakretanje (slika 17). Za razliku od ranijih modela servo-uređaja, moderni uređaji su digitalno proporcionalni. To znači da zakret servo-uređaja radi proporcionalno kretanju upravljačke ručice na daljinskom upravljaču. Ukoliko se ručica malo pomakne i servo-uređaj se malo zakrene, odnosno ukoliko se maksimalno pomakne ručica i servo-uređaj će se maksimalno zakrenuti.

Prilikom optimizacije bespilotne letjelice potrebno je za svaku pojedinu komandu postaviti najprikladniji servo-uređaj. Postoje mnogo vrsta servo-uređaja za razne namjene, a prema tome i imaju različite performanse. Unutar servo-uređaja nalazi se elektromotor, sklop za povećanje okretnog momenta, potenciometar i upravljački sklop. Elektromotor ima veliku brzinu vrtnje i mali okretni moment te je razvijen sklop koji smanjuje brzinu vrtnje na oko 60 o/min i istovremeno povećava okretni moment.

Potenciometar se nalazi na izlaznom zupčaniku odnosno izlaznom vratilu tako da prilikom vrtnje stvara varijabilni napon povezan s apsolutnim kutom izlaznog vratila. U upravljačkom sklopu napon potenciometra uspoređuje se s naponom koji dolazi od strane signala. Ukoliko je potrebno, kontroler izvršava naredbu da se elektromotorom upravlja u bilo kojem smjeru sve dok se ta dva signala ne izjednače.

Servo-uređajem upravlja se slanjem niza impulsa kroz vodiče. Frekvencija impulsa je stalna te se na osnovu širine impulsa određuje kutni položaj servo-uređaja koji se obično mogu zakretati za 180 stupnjeva.



Slika 17. Prikaz servo-uređaja

Izvor: [25]

3.3. Baterijski sustav bespilotne letjelice

Usporedno s razvojem bespilotnih letjelica, javila se potreba za razvojem baterija manjih dimenzija u koje se može akumulirati velika količina energije. Baterijski sustav napajanja u bespilotnoj letjelici primarno služi kako bi omogućio rad svih elektroničkih uređaja ugrađenih u bespilotnu letjelicu. Ukoliko je izvedba bespilotne letjelice takva da se za pogon koriste elektromotori, tada je baterijski sustav bitan i kao izvor električne energije za pogonski sustav.

Do unazad desetak godina kao izvori električne energije bile su korištene baterije poput Ni-Cd (Nikal-kadmija) i NiMh (Nikal-metal-hidrid) baterija. Te vrste baterija u svojoj primjeni imale su nedostatke poput toksičnosti samog sastava, male izlazne energije, samopražnjenja, memorijskog efekta te velike mase koje su nadvladale pozitivne strane poput velikog broja ciklusa, pražnjenja jakom izlaznom strujom i dovoljno velikog kapaciteta. Generacija koja je naslijedila ove vrste baterija bila je Li-Ion (litij-ion) baterija s dvostruko većom gustoćom, a time i manjom masom i dimenzijama. Baterije koje su tehnološki naslijedile Litij-ionske baterije su Litij-polimerne (Li-Po) baterije. Primjer baterije i oznake vidljivi su na slici 18.

Velika prednost ove vrste baterije je što elektrolit čini polimer koji se može oblikovati u razne oblike što uvelike olakšava primjenu u bespilotnim letjelicama. [26]



Slika 18. Prikaz baterije

Izvor: [27]

Baterije su definirane sa tri glavna parametra, a to su kapacitet, napon/broj ćelija i brzina sigurnog pražnjenja:

- Napon/broj ćelija
Li-Po baterije imaju nominalni napon od 3,7 V. Sustavi bespilotnih letjelica rade s ulaznim naponom ne manjim od 4,8 V, stoga su za rad potrebne minimalno dvije ćelije serijski spojene kako bi se postigao nominalni napon od 7,4 V. Ukoliko se ova vrsta baterija koristi za pogon bespilotne letjelice, biti će potrebno povezati nekoliko baterija kako bi se dobio optimalan omjer izlaznog napona i kapaciteta.
- Kapacitet
Kapacitet baterije u osnovi je mjera snage baterije. Koristi se mjerna jedinica mAh (mili Amper sat) te ukazuje s kolikom se strujom baterija može isprazniti u jednom satu.
- Brzina pražnjenja
Brzina pražnjenja je mjera kojom se opisuje koliko brzo se baterija može isprazniti sigurno i bez oštećenja same baterije. Prema primjeru sa slike 18,

najveće trajno opterećenje iznosi $50 \text{ C} = 50 \times 5$ (kapacitet u amperima). Dobiveni broj iznosi 250 A, što je maksimalno kontinuirano opterećenje baterije iz primjera sa slike 18.

3.4. Pogonski sustav bespilotne letjelice

Vrsta pogonskog sustava izravno je povezana sa namjenom, zadacima i ciljevima projektirane bespilotne letjelice. Između velikog raspona dostupnih izvedbi pogonskih sustava za svaku bespilotnu letjelicu individualno se pristupa u odabiru istog.

U nastavku je dana klasifikacija pogonskih sustava koji se koriste u bespilotnim letjelicama:

- klipni motori,
- mlazni pogon i
- električni pogon.

3.4.1. Klipni motori

Klipni motori su motori s unutarnjim izgaranjem koji pomoću klipnog mehanizma ostvaruje okretni moment. Za pogonske sustave bespilotnih letjelica primjenjuje se nekoliko tipova klipnih motora:

- Dvotaktni motori hlađeni zrakom - ne zahtijevaju dodatne sustave, a podmazivanje je riješeno kroz gorivo. Rad na visokim temperaturama i podmazivanje putem goriva razlog je što ova vrsta motora ispušta više ispušnih plinova od ostalih vrsta motora. Ukoliko se ova vrsta pogona koristi za bespilotne letjelice koje operiraju na većim visinama potrebna je primjena ubrizgavanja goriva zbog manje količine kisika što dovodi do nepotpunog izgaranja i gubitka snage. Prednosti ove vrste motora su vrlo mala masa, visok omjer snage i mase, dok je glavni nedostatak velika razina buke u usporedbi s četverotaktnim i Wainkelovim motorima.

- Četverotaktni motor - bespilotne letjelice čija masa prelazi 50 kilograma uglavnom koristi pogonski sustav s četverotaktnim klipnim motorima. S obzirom da ova vrsta pogona zahtjeva više kompleksnih elemenata po pitanju podmazivanja, razvodnog mehanizma i sustava ubrizgavanja, ukupna masa ovih motora je znatno veća od dvotaktnog motora. Prednosti ove vrste pogona su manja potrošnja goriva u usporedbi s Wankelovim motorom, duži vijek trajanja motora, dok su nedostaci velika masa, te vrlo nizak omjer snage i mase u usporedbi s dvotaktnim motorima.
- Rotacijski motor - radijalne izvedbe i specifičnog je načina rada gdje je koljenasto vratilo fiksno, a cilindri se rotiraju oko njega kao cjelina za koju je pričvršćen propeler.
- Wankelov motor - primjer je četverotaktnog motora koji trokutastim klipom u ovalnom kućištu ostvaruje okretni moment. Zbog malih dimenzija ova vrsta motora pogodna je za ugradnju u bespilotnim letjelicama jer je potreban relativno mali prostor za smještaj cijelog pogonskog sustava. Prednosti ove vrste motora su visoki omjer snage i mase, jednostavnost izrade, pouzdan rad pri velikom broju okretaja, potpuno dinamičko uravnoteženje i jednostavnost sustava. Nedostaci ove vrste pogona su velika potrošnja goriva, relativno mali okretni moment i veći troškovi proizvodnje.

3.4.2. Mlazni pogon

U bespilotnim letjelicama primjenjuju se turbomlazni, turboelisni i turbomlazni vratilni pogoni kompaktnog dizajna, relativno male mase i s potiskom do 1.500 N. Ova vrsta mlaznih motora je s jednim vratilom i sastoji se od radijalnog kompresora, radijalnog i aksijalnog difuzora, prstenaste komore za sagorijevanje, aksijalne turbine i fiksne mlaznice. Postoje određene izvedenice ove vrste pogona, ali nisu u širokoj upotrebi. Ova vrsta pogona ima masu od svega 3 kilograma u najmanjoj varijanti, a u određenim izvedbama imaju ugrađen sustav generatora čija je izlazna snaga 750W. Turbomlazni pogon koristi se za široki spektar namjena bespilotnih letjelica, od akrobatskih letjelica pa sve do jedrilica i helikoptera. Danas je ova vrsta pogonskih sustava tehnološki razvijena u toj mjeri da je moguće prilagoditi sve elemente sustava ovisno o namjeni bespilotne letjelice. [28]

3.4.3. Električni pogon

Glavni elementi električnog pogona su propeler, motor, regulator i baterija. U prvom segmentu električnog pogonskog sustava bitno je naglasiti ovisnost snage i generiranog potiska. Prilikom promjene parametara propelera dolazi do promjene parametara i performansi pogonskog sustava, a kao posljedica i promjene potiska sustava. U drugom elementu sustava je segment napajanja koji mora osigurati dovoljnu količinu energije za sve elemente. Trenutni regulatori dio su sustava koji se odnosi na napajanje, a dizajnirani su da izvršavaju promjenu ulaznog signala upravljanja koji dolazi iz upravljačke jedinice u odgovarajuću vrijednost i frekvenciju napona kako bi se osigurao rad elektro-motora na stabilnoj zadanoj brzini vrtnje.

Električni motori konstruirani su tako da generiraju okretni moment proporcionalan naponu napajanja. Karakteristika konstrukcije ove vrste pogona je jednostavnost izvedbe uz minimalno rotacijskih elemenata što bitno olakšava rad pri većim brzinama vrtnje. Prednosti ove vrste motora su mala buka, ekološki prihvatljivi pogonski sustav, male dimenzije samog motora te dobar omjer snage i mase. Nedostaci elektro-motora su izravna ovisnost o stalnom opskrbiom električnom energijom, te stabilnost rada koja ovisi o naponu napajanja što direktno utječe na pouzdanost sustava. [29]

3.4.4. Karakteristike pogonskih sustava

Najvažnije karakteristike pogonskog sustava bespilotne letjelice su:

- jednostavnost dizajna – smanjenje mase konstruktivnih elemenata,
- kraći klipni mehanizam, jednostavnost prilikom smještaja,
- lagani i izdržljivi materijali – legure aluminija i magnezija,
- pogonski sustav s više cilindara za uravnoteženje rada,
- sposobnost za siguran rad u širokom rasponu temperatura,
- niska potrošnja goriva.

Uslijed manevara bespilotne letjelice prilikom leta pogonski sustav mora imati:

- pravilno dizajniran sustav stalnog podmazivanja svih vitalnih elemenata motora,
- pravilno dizajniran sustav napajanja koji osigurava stalni dovod goriva te zaštitu spremnika od prekomjernog kretanja goriva, odgovarajuće odzračivanje i osigurati sustav od izlivanja goriva tijekom leta,
- pravilno dizajniran sustav hlađenja koji osigurava dovoljno hlađenje i regulaciju hlađenja.

Prilagodavanje radu na različitim visinama:

- prilagodba smjese izgaranja za određene tlakove prema visinama,
- ugradnja sustava prednabijanja motora kako bi se nadomjestio gubitak snage s visinom.

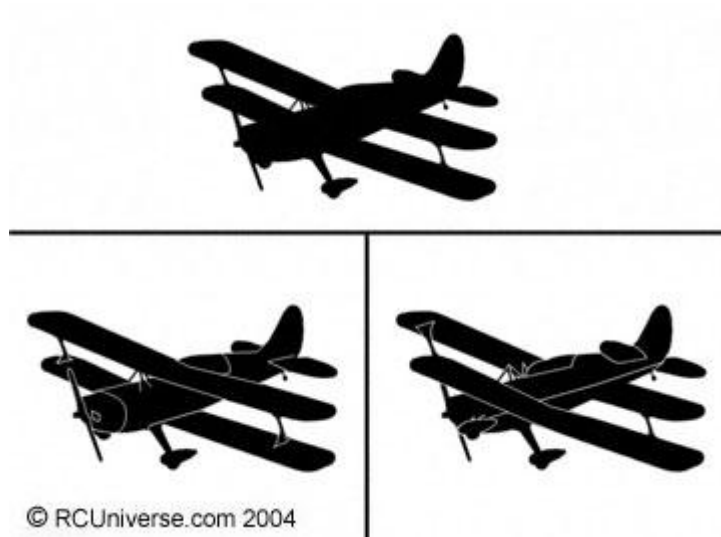
Za pouzdan i stalan rad kako bi se smanjio rizik od otkaza pogonskog sustava koriste se:

- dva sustava paljenja smjese po cilindru,
- dva neovisna sustava paljenja,
- sustavi hlađenja motornog ulja za podmazivanje,
- zračni filteri sa sustavima dogrijavanja protiv zaleđivanja,
- napredni kontrolno-mjerni sustavi koji omogućuju praćenje parametara rada motora i prema potrebi korekciju rada tijekom leta.

3.5. Dezorijentacija u upravljanju bespilotnom letjelicom

Iako mnogi tvrde da se problem dezorijentiranja ne može dogoditi, svaki iskusni pilot bespilotnih letjelica potvrdit će da je dezorijentacija itekako stvaran problem. Dezorijentacija predstavlja situaciju u kojoj bez obzira na udaljenost letjelica od pilota izgleda da letjelica ide u jednom smjeru, a zapravo ide u drugom. Svjesnost o situaciji uvijek je korisna pa je stoga

bitno pratiti putanju bespilotne letjelice čitavo vrijeme leta. Slika 19 prikazuje primjer situacije u kojoj se pilot može naći dezorijentiran.



Slika 19. Primjer preklapanja oblika

Izvor: [30]

4. DIZAJN MODELA ZRAKOPLOVA EXTRA 330L

Dizajniranje i simulacija akrobatskih modela zrakoplova je izazov s aspekta sposobnosti leta te vrste zrakoplova pri bilo kojem napadnom kutu i kutu bočnog klizanja (aerodinamičko područje unutar kojega letjelica može sigurno odraditi određene manevre).

Ovakve vrsta letjelica lete na minimalnim brzinama blizu područja sloma uzgona te dostižu velike sile opterećenja u normalnom i obrnutom letu. Većina akrobatskih letjelica dizajnirana je na principu heurističkog pristupa te je potreban sustavni pristup u multidisciplinarnom dizajnerskom okviru. Prema definiranom cilju ovaj rad predstavlja opsežnu studiju zahtjeva, mjernih podataka i inženjerskog pristupa za dizajniranje akrobatskog modela zrakoplova. Za konvencionalne bespilotne letjelice ciljevi dizajna mogu uključivati maksimalan dolet, brzinu krstarenja, plafon leta, maksimalnu nosivost i istrajnost. Općenito ciljevi akrobatske bespilotne letjelice su krajnja upravljivost prilikom izvođenja manevara, veliki omjer snage i mase, brzine uspinjanja, brzine rotacije oko određene osi, itd.

Prilikom dizajniranja bespilotnih letjelica akrobatskog tipa, a samim time i stvaranja iste, potrebno je zadovoljiti sve zahtjeve ,kako teorijske, tako i praktične. Neki od zahtjeva su dobar dizajn aerodinamičkog oblika koji podrazumijeva određene performanse i karakteristike tijekom raznih režima leta. Čvrstoća, odnosno konstrukcijska otpornost na razna dinamička opterećenja tijekom leta, mala masa konstrukcije te jednostavnost i pristupačnost prilikom montaže i demontaže za transport odnosno održavanje samo su neki od zahtjeva koje se stavljaju pred konstruktora zrakoplova.

Kako bi se izradio konačan model zrakoplova od prvog nacрта i ideje do izrade funkcionalnih zrakoplova, potrebno je proći i zadovoljiti sve uvjete kroz tri osnovne faze konstruiranja koje se odvijaju prema zadanom redosljedu.

Razvojne faze konstruiranja modela zrakoplova podijeljene su u tri osnovne faze:

- Konceptno konstruiranje
- Preliminarno konstruiranje
- Detaljno konstruiranje

Konceptno konstruiranje predstavlja osnovni korak prilikom dizajniranja modela zrakoplova te prikazuje i opisuje koncept. Prilikom odabranog koncepta modela zrakoplova potrebno je odlučiti koje sve tehnologije izrade će biti potrebne za izradu modela zrakoplova.

Preliminarno konstruiranje predstavlja sljedeći korak i provodi se izgradnjom modela zrakoplova kada su definirani osnovni parametri i konfiguracija iz koncepta zrakoplova. U ovoj fazi vrše se ispitivanja aerodinamičkih elemenata te ispitivanje oblika konfiguracije modela zrakoplova.

Detaljno konstruiranje, koje se još naziva i završno konstruiranje, predstavlja konačnu fazu dizajna modela zrakoplova. Detaljno i zasebno se promatraju i najmanji sklopovi modela zrakoplova te se vrše testni letovi na samom prototipu.

Zahtjevi za dizajn i izgradnju bespilotne letjelice definirani su prema F3M klasi radio-upravljanih velikih akrobatskih zrakoplova. F3M (radio-upravljeni veliki akrobatski modeli zrakoplova) predstavlja klasu natjecanja na svjetskoj razini koja proizlazi iz smjernica sportskog kodeksa od strane međunarodnog zrakoplovnog saveza (engl. *International Aeronautical Federation* - FAI) Definicija radio-upravljanog velikog akrobatskog zrakoplova podrazumijeva model zrakoplova, ali ne i helikopter, kojim se aerodinamički manevrira upravljačkim površinama za određivanje položaja, smjera i nadmorske visine od strane pilota na zemlji pomoću radio upravljanja. Model zrakoplova treba predstavljati smanjenu verziju akrobatskog zrakoplova pune veličine. Opće značajke radio-upravljanih akrobatskih zrakoplova moraju biti verificirane prema procedurama FAI sportskog kodeksa, poglavlja 4, za svaki model zrakoplova.

Propisane karakteristike radio-upravljanih akrobatskih modela zrakoplova su dane u nastavku:

- minimalni ukupni razmah krila za zrakoplove s jednim krilom iznosi 2,1 m,
- minimalni ukupni razmah krila za zrakoplove s dva krila iznosi 1,8 m,
- maksimalna masa polijetanja (s gorivom) iznosi 25 kg,
- dopušten je samo jedan pogonski propeler po zrakoplovu te jedan motor s unutarnjim izgaranjem ili više elektro-motora ukoliko se koristi električni pogon,
- oprema za radio-upravljanje mora biti tipa otvorene petlje (bez povratne veze od modela zrakoplova do pilota, osim informacija bitnih za sigurnost leta),
- zabranjena je svaka vrsta autopilota kao i predprogramiranje određenih naredbi,

- potrebno je priložiti dokaze da se osnovni obrisi modela zrakoplova približavaju obrisima zrakoplova u punoj veličini zrakoplova,
- maksimalna razina buke smije biti 94 dB izmjerena na 7 m od središnje osi modela zrakoplova.

Za potrebe izvođenja akrobatskih figura zadanog programa prema FAI-u model zrakoplova mora biti sposoban kontrolirano izvesti svaki manevar tijekom leta. Razine rotiranja oko određene osi trebaju biti visoke pri velikim i malim brzinama leta, također i brzina zaustavljanja nakon rotacije trebala bi biti u što kraćem vremenu. Akrobatski zrakoplovi prilikom izvođenja akrobacija izloženi su velikim otporima koje je potrebno nadomjestiti "viškom snage". [31]

4.1. Konceptualni dizajn modela zrakoplova Extra 330l

Prema F3M klasifikaciji, što je vidljivo i iz naslova diplomskog rada govori, odabran je akrobatski tip zrakoplova Extra 330l njemačkog proizvođača akrobatskih jednosjeda odnosno dvosjeda prema kojemu će biti dizajnirana i izgrađena replika bespilotne letjelice. Model zrakoplova Extra 330l konceptualno se dizajnira u mjerilu od 33% pune veličine zrakoplova. Prema tom mjerilu proizlaze i osnovne dimenzije modela zrakoplova:

- razmah krila – 2.600 mm
- duljina – 2.380 mm
- visina – 858 mm

Profili krila zrakoplova određuju letne karakteristike zrakoplova, te postoji nekoliko čimbenika koji u velikoj mjeri utječu na izvedbu aeroprofila. Ti su čimbenici Reynoldsov broj, zakrivljenost i maksimalna debljina profila. Ovi čimbenici direktno utječu na koeficijent uzgona i koeficijent opterećenja. Prema dosadašnjem iskustvu sa sličnim primjerima akrobatskih modela zrakoplova odabran je profil krila NACA 0012 koji ima maksimalnu debljinu 12% na 30% tetive. Isti profil krila odabran je i za repne površine vertikalnog i horizontalnog stabilizatora.

4.1.1. Konstrukcija V-n dijagrama modela zrakoplova Extra 330I

Kako bi se definirala konačna konfiguracija modela zrakoplova, mora biti poznato područje opterećenja tijekom manevriranja i izvođenja samog leta. U konceptnoj fazi nije moguće dobiti sve stvarne uvjete opterećenja, te je uobičajena praksa istražiti samo slučajeve koji se na osnovu iskustva pokazuju kao kritični. Dizajn modela zrakoplova je rezultat uzastopnih istraživanja i razmatranja te usporedbi sa različitim konfiguracijama. Isti princip se primjenjuje i za proučavanje područja opterećenja na modelu zrakoplova. Dijagram faktora opterećenja najčešće se sastoji od kombinacije osnovnog V-n dijagrama i V-n dijagrama za udare vjetra. Za model zrakoplova bitna su tri ograničenja unutar kojih se može proučavati područje sigurnog leta:

- aerodinamička granica zadana maksimalnim koeficijentom uzgona,
- strukturna granica zadana maksimalnim faktorom opterećenja i
- konstrukcijska granica najveće brzine leta.

Ta su tri ograničenja prikazana u dijagramu faktora opterećenja u kojem svaka točka predstavlja stanje opterećenja modela zrakoplova tijekom manevriranja odgovarajućom stvarnom brzinom zraka (TAS – *true airspeed*). Aerodinamičke granice predstavljaju granice u letu u odnosu na uvjete sloma uzgona, te je ta granica prikazana parabolom koja je definirana za pozitivne brzine modela zrakoplova. Koeficijent opterećenja računa se pomoću formule (1):

$$n = \frac{\frac{1}{2}\rho S C_{Lmax} V^2}{W} \quad (1)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

n – koeficijent opterećenja

ρ - gustoća zraka [kg/m^3]

C_{Lmax} - maksimalni koeficijent uzgona

V^2 - stvarna brzina zraka
 W – težina bespilotne letjelice

Koeficijent opterećenja koristiti će se za formiranje osnovnog područja dijagrama, odnosno za konstruiranje krivulje koja ograničava granice sloma uzgona i područje normalne uporabe modela zrakoplova kao i područje oštećenja konstrukcije. Konstrukcijska granica podrazumijeva ograničenja maksimalne brzine s obzirom na pojavu strukturalnih oštećenja ili dinamičkog lepršanja pojedinih elemenata modela zrakoplova (engl. *flutter*).

Tablica 2 prikazuje osnovne podatke bespilotne letjelice Extra 3301 neophodne za kreiranje dijagrama faktora opterećenja. Podaci su dobiveni iz izvornih projektnih specifikacija modela zrakoplova te odabrani na osnovu dosadašnjeg iskustva u razvoju bespilotnih akrobatskih letjelica poput profila krila te ostalih aerodinamičkih elemenata.

Tablica 2. Pretpostavljene i izračunate vrijednosti letnih uvjeta i modela zrakoplova Extra 3301

| | | |
|---|------------|---------|
| Gustoća zraka [kg/m³] | ρ | 1,225 |
| Najveća težina polijetanja [N] | W_{to} | 119,682 |
| Najveći koeficijent uzgona | C_{Lmax} | 1,38 |
| Površina krila [m²] | S | 1,157 |
| Razmah krila [m] | b | 2,6 |
| Vitkost krila | AR | 5,8426 |
| Srednja geometrijska tetiva [m] | c | 0,445 |
| Nosivost krila [N/m²] | W/S | 103.441 |
| Gravitacijsko ubrzanje [m/s²] | g | 9,81 |

Prva karakteristična brzina je brzina sloma uzgona uz faktor opterećenja $n = 1$, a računa se pomoću formule (2):

$$V_{st} = \sqrt{\frac{2nmg}{\rho S C_{Lmax}}} = 11,062 \text{ m/s} \quad (2)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

V_{st} - brzina sloma uzgona [m/s]
 n – koeficijent opterećenja
 m - masa letjelice [kg]
 g – gravitacijsko ubrzanje [m/s²]
 ρ - gustoća zraka [kg/m³]
 S – površina krila [m²]
 C_{Lmax} - maksimalni koeficijent uzgona

S obzirom na odabrani simetrični profil krila brzina sloma uzgona biti će ista za negativno i pozitivno opterećenje pri čemu vrijedi jednakost (3):

$$V_{st,neg} = V_{st,poz} \quad (3)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

$V_{st,neg}$ - brzina sloma uzgona u obrnutom letu
 $V_{st,poz}$ - brzina sloma uzgona u normalnom letu

Sljedeća karakteristična brzina je manevarska brzina koja predstavlja najveću brzinu pri kojoj se maksimalnim otklonom upravljačkih površina na modelu zrakoplova ne ugrožava sigurnost. Brzina se računa prema formuli (4) i iznosi:

$$V_A = V_{st}\sqrt{n_{max}} = 27,091 \text{ m/s} \quad (4)$$

Gdje oznake imaju sljedeće značenje:

V_A – manevarska brzina [m/s]
 V_{st} - brzina sloma uzgona [m/s]
 n_{max} - maksimalni koeficijent opterećenja

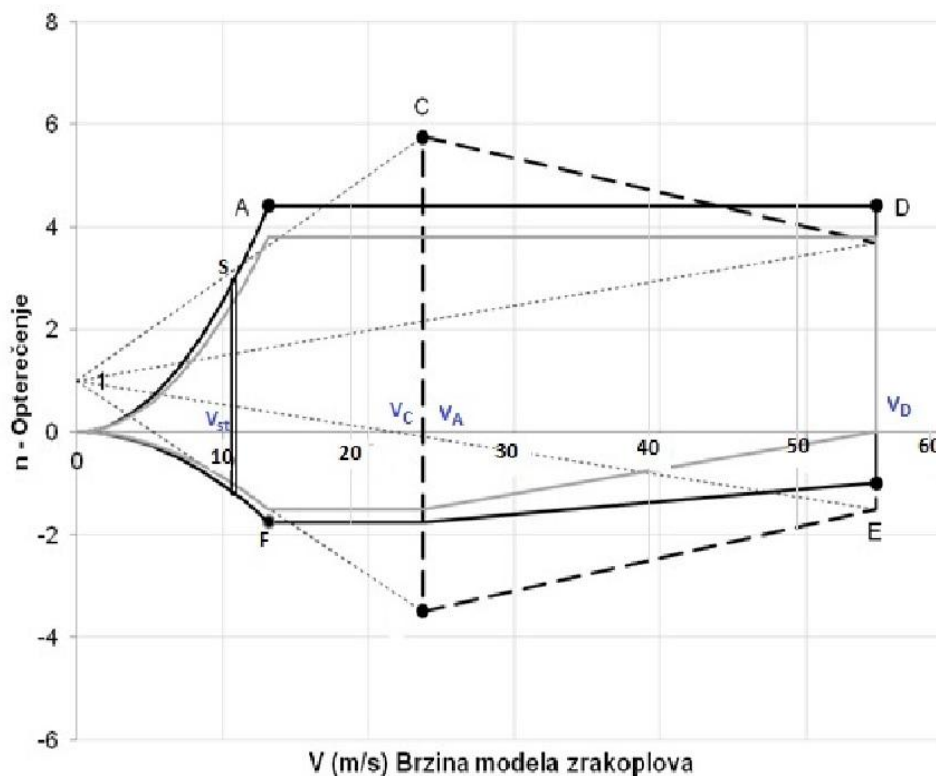
Sljedeće dvije karakteristične brzine su brzina krstarenja i brzina poniranja. Brzina krstarenja pretpostavljena je na osnovu dosadašnjih iskustva sa sličnim kategorijama modela zrakoplova:

$$V_c = 24,4 \text{ m/s}$$

Kao što je prethodno rečeno, brzine iznad brzine poniranja mogu rezultirati strukturnim oštećenjima usred destruktivnih pojava. Brzina poniranja obično je veća od maksimalne brzine, koja je puno veća od brzine krstarenja. Brzina poniranja iznosi:

$$V_D = 56,38 \text{ m/s}$$

Proračun udara vjetra pojednostavljen je u smislu uzimanja u obzir pojavu udara vjetra okomito na aerodinamičku brzinu koja izaziva kao posljedicu pojavu induciranog napadnog kuta, a time i pojavu povećanog uzgona te koeficijenta opterećenja. Na grafikonu 1 prikazan je linearni prirast koeficijenta opterećenja u ovisnosti o brzini leta.



Grafikon 1. V-n grafikon modela zrakoplova Extra 3301

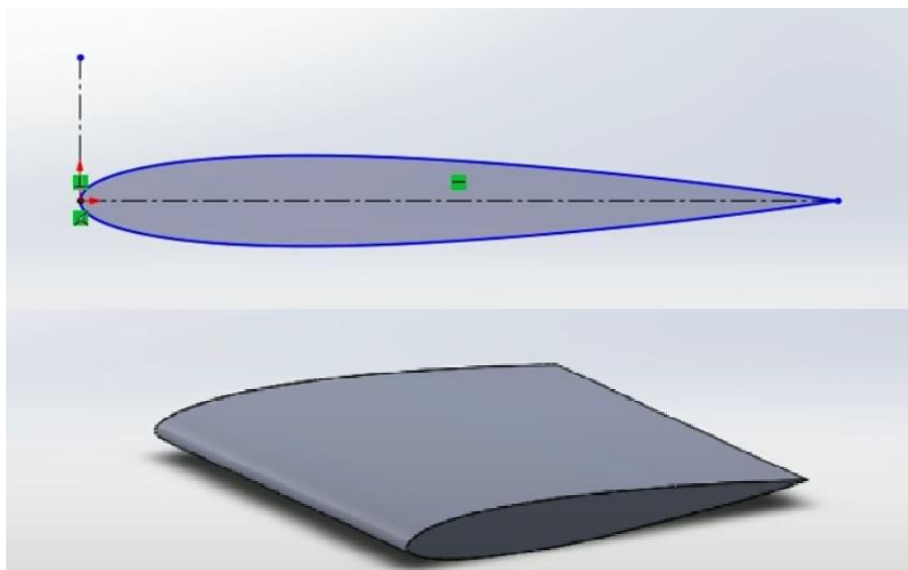
U V-n dijagramu prikazanom na grafikonu 1 ovojnica leta prikazuje granice unutar kojih neće doći do sloma uzgona ili oštećenja konstrukcije. Značenje linija može se vidjeti u nastavku teksta.

- Ovojnica leta sigurnih manevara
- - - - - V-n dijagram za udar vjetra
- Osnovni V – n dijagram

Karakteristični podaci koji se pojavljuju u ovom dijagramu koriste se u daljnjim fazama dizajna modela zrakoplova.

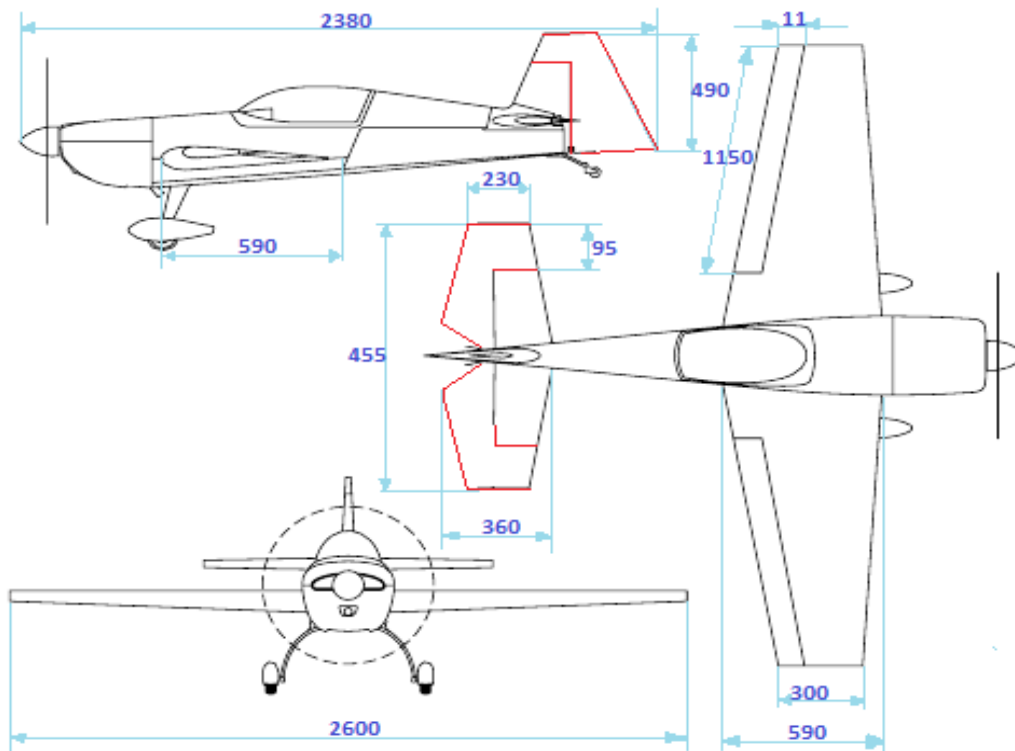
4.1.2. Geometrija modela zrakoplova Extra 330l

Generiranjem profila krila u programu Solidworks, dan je konceptni prikaz odabranog profila NACA 0012 (slika 20). Krilo modela zrakoplova Extra 330l trapeznog je oblika te se najveća debljina profila smanjuje linearno prema krajevima krila.



Slika 20. Prikaz profila krila NACA 0012

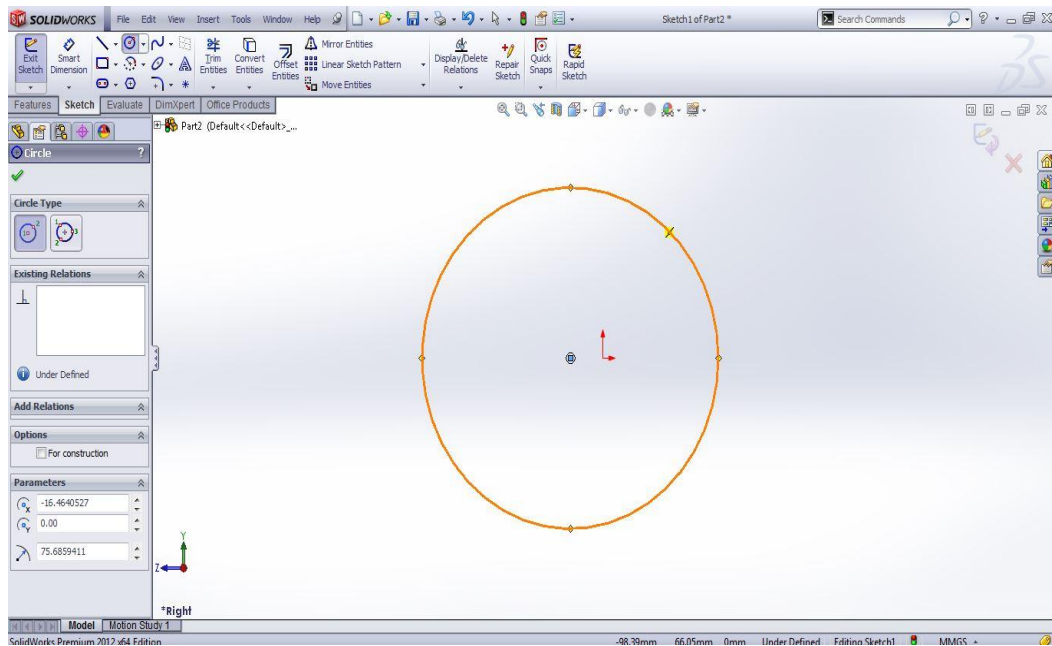
Nakon odabranog profila i geometrije krila, definirane su osnovne dimenzije pojedinih aerodinamičkih površina koje su ključne za daljnje generiranje 3d dizajna modela zrakoplova u računalnom programu. Na slici 21 crvenom linijom označene su površine koje su produžjene u odnosu na zrakoplov pune veličine kako bi se povećale manevarske sposobnosti pri brzinama blizu brzine sloma uzgona. Prikazane dimenzije izražene su u mjernoj jedinici milimetar (mm)



Slika 21. Prikaz dimenzija modela zrakoplova Extra 330I

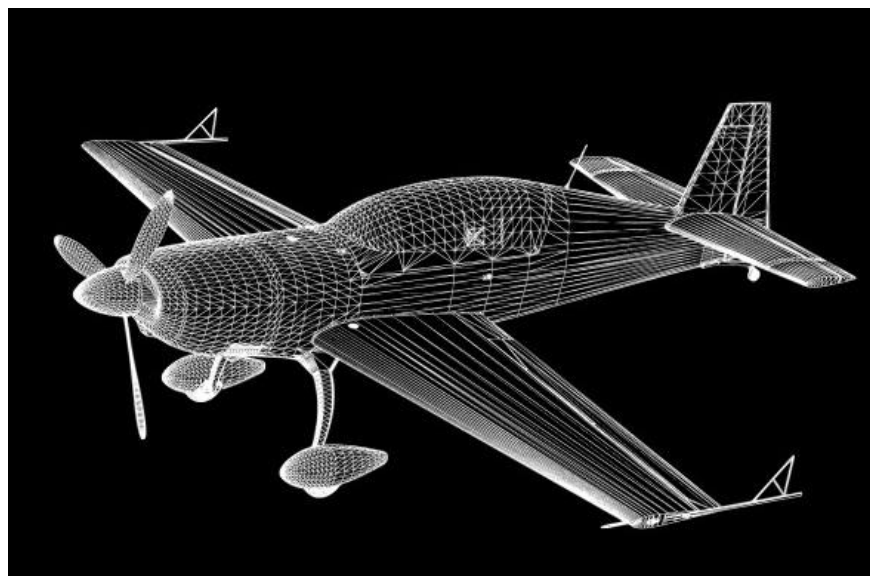
Sljedeća faza predstavlja crtanje 3D modela pomoću računalnog programa SolidWorks. Solid Works. Riječ je o programu za čvrsto modeliranje koji je razvila francuska tvrtka Dassault Systèmes. Uz ovaj računalni program moguće je modelirati željene objekte u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom formatu.

Program omogućuje kreiranje više zasebnih elemenata i njihovo povezivanje u cjelinu te kreiranje nacrtu svih pojedinih elemenata za daljnju izradu samih predmeta. Također je moguće kreiranje željene površine u vizualnom prikazu i prema potrebi definiranje materijala pojedinih elemenata. Sučelje SolidWorks programa sastoji se od dovoljno alata za modeliranje i najzahtjevnijih sklopova (slika 22). Za daljnju izradu proizvoda sa suvremenim strojevima ovaj program vrlo jednostavno izrađuje vektorsku pripremu koja je iznimno bitna za točnu izradu.

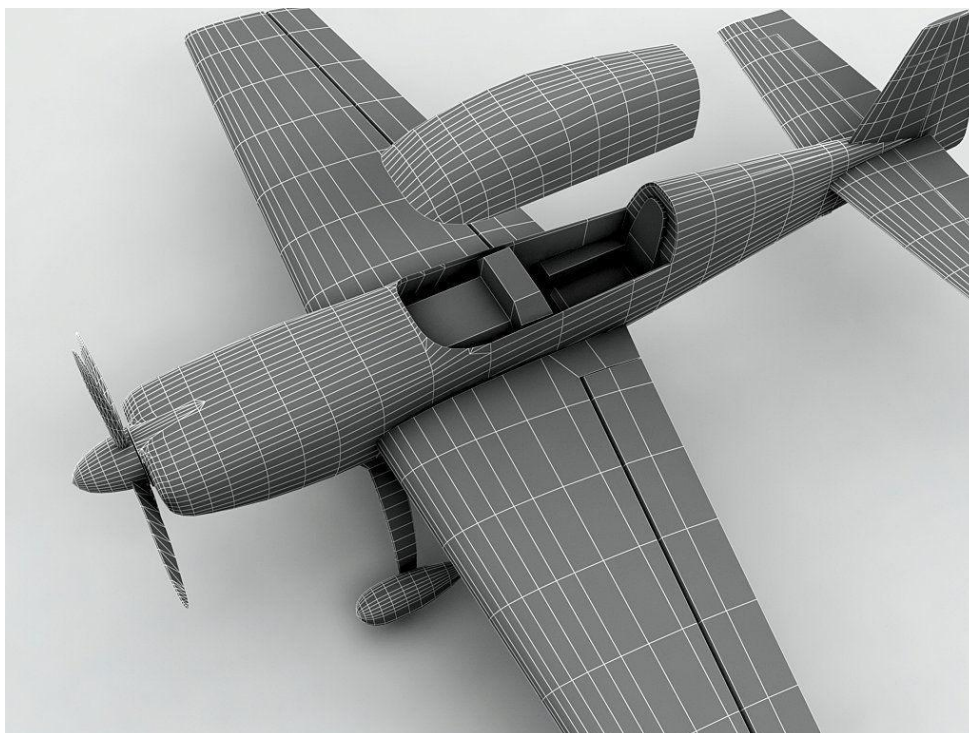


Slika 22. Prikaz radnog sučelja programa SolidWorks

Prema konceptnim dimenzijama modela zrakoplova u tri dimenzije generiran je 3D model zrakoplova Extra 330l (slika 23). Generirani model osnova je za daljnje projektiranje pojedinih elemenata i smještaj u sami model zrakoplova poput pokrova kabine kako je prikazano na primjeru prikazanog slikom 24. Također, završna verzija nakon odrade svih elemenata biti će korištena kao osnova u fazi izrade modela zrakoplova Extra 330l.



Slika 23. Prikaz generiranog 3D modela zrakoplova Extra 330l



Slika 24. Prikaz projektiranja pojedinog elementa modela zrakoplova

4.2 Odabir materijala i izgradnja modela zrakoplova Extra 330l

4.2.1. Odabir materijala za model zrakoplova Extra 330l

Odabir materijala za izgradnju modela zrakoplova Extra 330l temelji se na postavljenim zahtjevima za odabir materijala konstrukcije. Zahtjevi su definirani kroz visoku čvrstoću, krutost uz što manju masu cjelokupne konstrukcije. Prema definiranim zahtjevima odabrani su polimerni kompoziti kao primarni materijal za izradu koji imaju svojstva visoke specifične čvrstoće i visoki specifični modul elastičnosti. Ovisno o materijalu ojačanja u kompozitu, samoj vrsti pletiva te plošnoj masi, raznim kombinacijama moguće je izraditi vrlo kompleksne elemente modela zrakoplova. Tehnologija obrade i spajanja kompozitnih materijala u velikoj je mjeri zastupljena u konstruiranju ovog tipa modela zrakoplova.

U samoj izgradnji uz kompozitne materijale biti će korišteno drvo poput balse i aviošperploče za izgradnju elemenata koji prema potrebnim karakteristikama materijala mogu biti izgrađeni od istih. Za pojedine elemente poput glavne nosive ramenjače krila i horizontalnog stabilizatora biti će korištene duralumin tankostijene cijevi.

Izgradnja modela zrakoplova sastoji se od stiroporne jezgre sa umetnutim poprečnim profilima od drveta za pojedine elementa kako bi se formirao oblik elemenata prema unaprijed definiranim dimenzijama. Tako oblikovani elementi trupa i krila pripremaju se za lakiranje kako bi se dobila što bolja površina za izradu kalupa. Tako dotjerani elementi premazuju se sredstvom za odvajanje slojeva kako bi nakon izgradnje kalupa bilo moguće razdvojiti kalup i model u svrhu izvlačenja što kvalitetnijeg kalupa za izradu proizvoda.

4.2.2. Izgradnja modela zrakoplova Extra 330I

Svi elementi modela zrakoplova proizvode se u negativnim kalupima pomoću vakuumske tehnologije izrade kompozitnih elemenata.

Trup zrakoplova izgrađuje se u dvije polutke u negativnim kalupima te je predviđeno naknadno spajanje u cjelinu (slika 25). Prilikom izrade samog trupa modela zrakoplova ugrađuju se dodatna ojačanja konstrukcije za naknadno povezivanje elemenata te se izrađuje priprema za ugradnju nosača stajnog trapa, pogonskog sustava, itd. Proizvod će predstavljati trup izrazito male mase otporan na dinamička opterećenja tijekom svih faza leta. Prednji dio trupa formira se iz jednog elementa te će osiguravati adekvatan prihvat predviđenog pogonskog sustava. Prema dosadašnjem iskustvu na određenim dijelovima trupa izrađuju se dodatna ojačanja ugljičnim i aramidnim vlaknima. Trup modela zrakoplova u samoj izradi presvučen je depron pjenastim slojem kako bi se apsorbirale vibracije pogonskog sustava.



Slika 25. Izrađen trup modela zrakoplova Extra 3301

Stajni trap modela zrakoplova je izgrađen u potpunosti od kompozita, ukupne širine od 700 mm i visine 280 mm. Debljina profila elementa stajnog trapa iznosi 10 mm čitavom duljinom i širine 60 mm na samom trupu modela zrakoplova, dok se na krajnjoj duljini širina reducira na 30 mm. Presjek elementa stajnog trapa izrađuje se u obliku aeroprofila kako bi se otpor u letu sveo na minimum.

U trup zrakoplova ugrađuje se prethodno konstruirana konstrukcija za prihvat elemenata stajnog trapa, dizajnirana kako bi podnijela sva dinamička opterećenja koja se javljaju prilikom polijetanja i slijetanja modela zrakoplova. Ugrađen stajni trap prikazan je slikom 26.



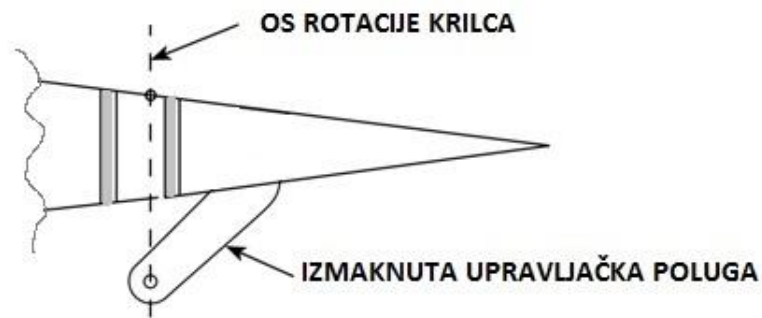
Slika 26. Prikaz stajnog trapa modela zrakoplova Extra 3301

Izrada krila modela zrakoplova provodi se u nekoliko segmenata podijeljenih prema redoslijedu izrade zasebnih elemenata koji u cjelini čine krilo modela zrakoplova. Obje oplatne polovice krila izrađuju se u negativnim kalupima u potpunosti tehnologijom vakuumiranja koristeći dva sloja staklenog pletiva (plošne mase 50 g/m^2) sa ispunom od depron pjene između slojeva u debljini od 2 mm. Obje oplata povezuju se rebrima koja su dodatno ojačana poprečnim uzdužnicama krila te ugrađenim vodilicama (tubama) za povezivanje krila aluminijskom nosivom ramenjačom (slika 27).



Slika 27. Prikaz procesa izgradnje krila modela zrakoplova Extra 3301

U fazi izrade samog krila ugrađuju se podkonstrukcije za ugradnju servo-uređaja koje su povezane sa nosivim rebrima kako bi se omogućio adekvatno hvatište. Krilca se izrađuju tehnikom kao i krila te se u spojnom kalupu povezuju sa krilom pomoću spojnog abrajz tkanja koje se laminira u samu strukturu krila i krilca. Abrajz tkanje omogućuje funkcionalno zakretanje krilaca dok istovremeno podnosi razna strukturna opterećenja koja se javljaju tijekom manevara u letu. Spoj krilca s krilom konstruiran je tako da os rotacije nije postavljena u središnjoj liniji krilca što rezultira djelomično izvlačenje i uvlačenje krilca tijekom zakretanja što mijenja geometriju i površinu krilca (slika 28).



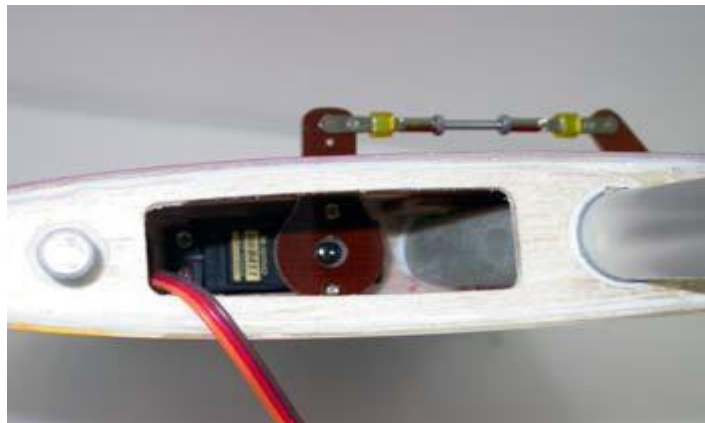
Slika 28. Prikaz pozicije osi zakretanja krilaca

Horizontalni stabilizator i vertikalna upravljačka površina također se izrađuju u negativnim kalupima dizajnirani tako da omogućuju zakretanje upravljačkih površina i do 50°. S obzirom na relativno laganu konstrukciju repnih površina u samim elementima horizontalnog stabilizatora konstruirane su pozicije za ugradnju servo-uređaja. Kako je vidljivo na slici 29, upravljačka površina vertikalnog stabilizatora pričvršćuje se čeličnom šarkom u tri pozicije u središnjoj osi.



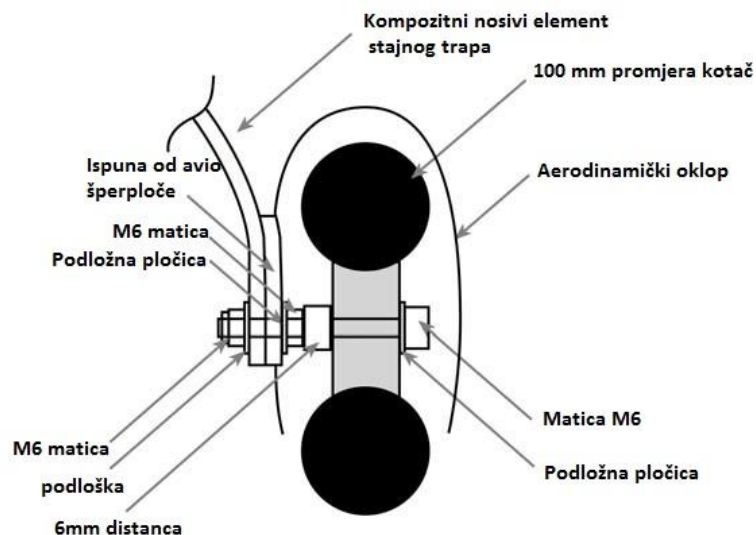
Slika 29. Prikaz prihvata upravljačke površine vertikalnog stabilizatora

Horizontalni stabilizator opremljen je sa jednim servo-uređajem na svakoj strani. Servo-uređaj je standardne veličine te se ugrađuje u predviđenu poziciju u rebro konstrukcije samog horizontalnog stabilizatora kako je prikazano na slici 30. Ugrađena upravljačka poluga pozicionirana u osi poluge servo-uređaja iste je dužine kao i poluga servo-uređaja



Slika 30. Prikaz ugradnje servo-uređaja u horizontalnom stabilizatoru

Ugradnja kotača stajnog trapa i aerodinamičkog oklopa za smanjenje otpora vrši se na izgrađene elemente stajnog trapa. Odabir tipa kotača prema iskustvu za ovu veličinu modela zrakoplova je 100 mm u promjeru, a upotrebljava se gumeni kotač ispunjen zrakom. Kotač se sastoji gume i aluminijskog naplatka s ugrađenim ležajevima za bolje podnošenje opterećenja prilikom rotacije. Detaljan opis i pojedinosti elemenata stajnog trapa prikazane su na slici 31.



Slika 31. Presjek konstrukcije podvozja

Repni stajni trap konstruiran je od kompozitnog materijala uz karakteristiku male mase s obzirom da se nalazi na najudaljenijoj točki od centra težišta modela zrakoplova. U gradnja kompozitnog nosača stajnog trapa izvodi se spajanjem vijcima u prethodno pripremljeno hvatište za isti. Repni kotač promjera 30 mm ugrađuje se na čeličnu osovinu te konstrukcijski nije vezan za kormilo već ostaje slobodan po pitanju zakretanja.

4.3. Ugradnja pogonskog sustava

Za pogonski sustav odabran je motor DA 100 (*Desert Aircraft*) profesionalne klase akrobatskih karakteristika koje ispunjavaju sve zahtjeve modela zrakoplova Extra 330l. DA 100 motor je dvocilindrični dvotaktni motor opremljen membranskim rasplinjačem. Motor razvija akrobatsku krivulju raspodjele snage ovisno o broju okretaja koljenastog vratila, ima relativno male vibracije, te je opremljen elektroničkim paljenjem smjese goriva i zraka s automatskom prilagodbom vremena paljenja. U tablici 3 su prikazane specifikacije odabranog motora za pogonski sustav.

Tablica 3. Tehničke specifikacije motora DA 100

| | |
|------------------------------|------------|
| Radni obujam [ccm] | 100 |
| Izlazna snaga [ks] | 9,8 |
| Masa [kg] | 2,53 |
| Promjer cilindra [mm] | 42,6 |
| Hod klipa [mm] | 35 |
| Potrošnja goriva [l] | 0,0739 |

Izvor: [32]

Za ugradnju pogonskog sustava bitno je pripremiti sve potrebne zahvate na trupu zrakoplova kako bi se ispravno instalirao sami motor te ispušni sustav i popratna električna instalacija. Na trupu ispod površine za prihvat nosača motora su konstruirani otvori za daljnju ugradnju djela ispušnog sustava u trup zrakoplova. Površina za ugradnju nosača motora projektirana je sa kosinom od $2,5^\circ$ u desnu stranu u odnosu na uzdužnu os trupa modela zrakoplova. Ovakvo postavljanje osi motora u stranu izvodi se zbog momenta formiranog od rotacije elise u desnu stranu. Prema horizontalnoj osi motor se ugrađuje paralelno sa osi krila, s obzirom da se radi o akrobatskom zrakoplovu sa simetričnim profilom krila nije potrebna korekcija kuta u toj osi. Na slici 32 prikazan je ugrađen motor na trupu modela zrakoplova.



Slika 32. Prikaz ugradnje pogonskog sustava

Ugradnja ispušnog sustava podrazumijeva predugradnju konstrukcije za elastično pričvršćivanje rezonantnih ispušnih lonaca u trupu modela zrakoplova. Ispušni sustav opremljen je sustavom za ubrizgavanje tekućine za dimni efekt u letu. Za spojne elemente ispušnih cijevi koriste se temperaturno otporne teflonske cijevi koje dopuštaju određenu fleksibilnost kompletnog ispušnog sustava izloženog vibracijama. Slika 33 prikazuje smještaj ispušnog sustava u trupu modela zrakoplova.



Slika 33. Prikaz ugradnje ispušnog sustava

Tip i karakteristike elise pogonskog sustava prema uputstvu tvrtke Desert Aircraft i testom vučne sile na ispitnom stolu, u fazi izrade modela zrakoplova ugrađena je kompozitna elisa proizvođača Mejzlik 28/10 (slika 34). Dimenzije elisa izražene su u inčima, a definiraju promjer i korak elise. Oznaka 28/10 predstavlja promjer elise od 28" i korak od 10" koji je formiran jednim okretom elise u idealnom fluidu. Prema podacima sa ispitivanja na testnom postolju, pri broju okretaja motora od 6.326 o/min ostvarena vučna sila iznosila je 210,915 N.



Slika 34. Elisa pogonskog sustava Mejzlik 28/10

Izvor: [33]

Ugradnja sustava goriva u model zrakoplova podrazumijeva konzolnu konstrukciju s ugrađenim spremnicima konstruiranu prema prostoru u trupu zrakoplova što bliže točki težišta (slika 35). Konzolna konstrukcija izrađena je od avio-šperploče debljine 3 mm laminirana u šest slojeva, dodatno ojačana tkanjem od ugljičnih vlakana i epoksidnom smolom. Na konzolnu konstrukciju ugrađuju se dva rezervoara za gorivo i ulje dimnog efekta. Konzolna konstrukcija modularnog je tipa i mora ispuniti zahtjeve za čvrstoćom prilikom izvođenja raznih manevara u letu. Spremnik za gorivo zapremine je jedne litre što je dovoljno za formalni dio zadanog akrobatskog leta uz količinu rezerve ukoliko se stvori potreba. Sami spremnik za gorivo konstruiran je sa primarnim i sekundarnim dovodom goriva kako bi se osigurala dovoljna količina goriva za rad pogonskog sustava u bilo kojem položaju modela zrakoplova i pri bilo kojem manevru tijekom leta. Uz to sustav je opremljen dvostrukim sustavom odzračivanja rezervoara te nepovratnim ventilima i ventilima za nadopunu količine goriva.



Slika 35. Konzola sa spremnicima za gorivo i ulje

4.4. Ugradnja sustava daljinskog upravljanja i napajanja

Nakon ugradnje naprijed nabrojanih sustava koji su bitni za pozicioniranje i kreiranje sustava upravljanja kreira se raspored smještaja elektroničkih uređaja i baterijskog sustava napajanja. Tijekom izgradnje modela zrakoplova čitavo vrijeme se pozornost usmjerava na centar težišta što kao za rezultat ima određivanje pozicije pojedinih uređaja koji se slijedno ugrađuju u model zrakoplova. Iako su svi elektronički uređaji relativno male mase itekako je bitan njihov smještaj unutar trupa zrakoplova. Prema definiranoj poziciji centra težišta,

definiraju se pozicije elemenata sustava daljinskog upravljanja prema kojima se izgrađuje nosivi element sa pozicijama za ugradnju istih. Konstrukcija nosivog elementa sastoji se od avio-šperploče debljine 6 mm kao osnova, ojačana tkanjem ugljičnih vlakana i epoksidnom smolom.

Sustav daljinskog upravljanja u modelu zrakoplova sastoji se od:

- prijemnika Hitec Optima 9 (slika 36), koji je dizajniran za veće bespilotne letjelice i s dvije višenamjenske antene za dodatnu sigurnost rada sustava. Optima 9 opremljen je osnovnom telemetrijskom funkcijom upozorenja pilota o niskom naponu sustava. Frekvencijsko područje rada prijemnika je 2,4 GHz, ima mogućnost kontrole putem 9 zasebnih kanala, relativno je malih dimenzija i mase ispod 30 grama

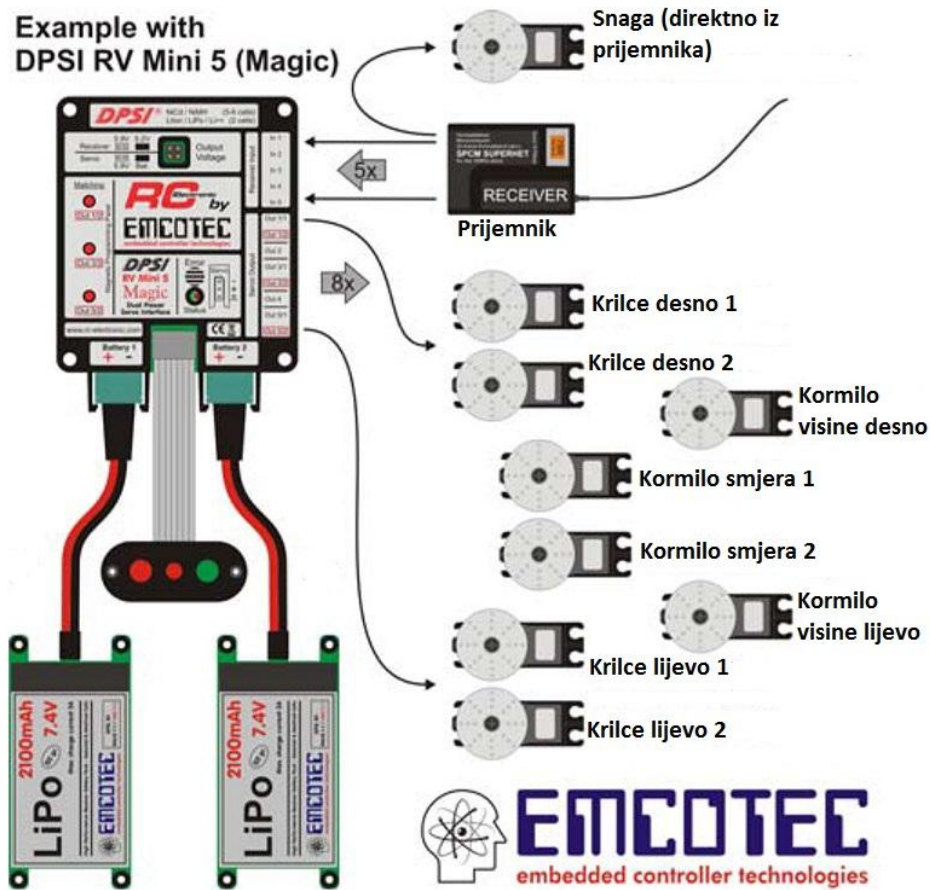


Slika 36. Prijemnik Hitec Optima 9

Izvor: [40]

- Za sustav distribucije električne energije odabran je DPSI Emcotec RV Mini 5 Magic koji ima regulirano, dvostruko redundantno napajanje sa zaštitom od preopterećenja za svaki servo-uređaj i opcionalno podudaranje servo-uređaja za unaprijed dodijeljene kanale. Dodatna prednost ovog uređaja je otpornost na moguće smetnje uzrokovane osjetljivim vodičima servo-uređaja većih duljina. Sustav je opremljen i inteligentnim praćenjem napona s integriranim statusom baterija kao i strujnom zaštitom pada napona korištenjem servo-uređaja velike snage. Sustav je opremljen s odgovarajućim magnetskim prekidačem koji je otporan na razne utjecaje poput vibracija, frekvencijskih smetnji, mehaničkih otkaza i sl. Emcotec RV Mini 5 prikazan je na slici

37. Prikazan je i shematski prikaz raspodjele napajanja i kanala prema servo-uređajima, odnosno konfiguracija servo-uređaja.

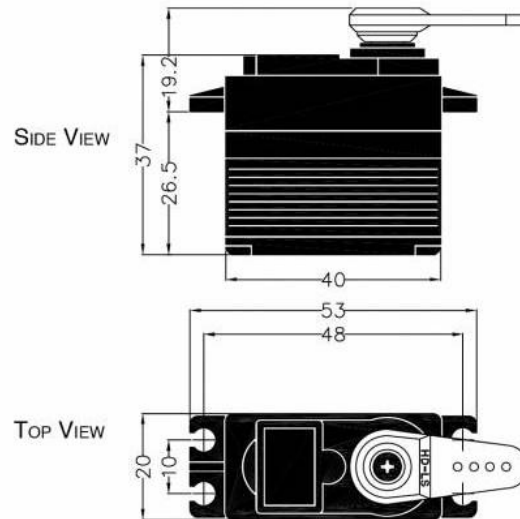


Slika 37. Prikaz DPSI Emcotec RV Mini 5 i raspodjele servo-uređaja

Izvor: [41]

- Servo-uređaji potrebni za funkcioniranje modela zrakoplova Extra 330l odabrani su s obzirom na dosadašnje iskustvo i proračunatim potrebnim karakteristikama za model zrakoplova. Prema konfiguraciji sa prethodne slike za krilca, kormila visine i kormilo smjera odabrani su servo-uređaji istog tipa, Hitec 7955tg (slika 38). Ovaj model servo-uređaja dizajniran je za najzahtjevnije aplikacije, uz zaštitu od preopterećenja. Prednost ovog uređaja je što ima programibilni digitalni krug upravljanja najnovije generacije što uvelike olakšava upravljanje letjelicom. Uz snažna kaljena čelična vratila i zupčanike od titana, transmisija ovih servo-uređaja ima iznimnu otpornost na trošenje uz produkciju velikog okretnog momenta. Uz malu masu od 65 grama, ti servo-uređaji ostvaruju okretni moment od 24 kg/cm što je dovoljno za upravljačke

površine modela zrakoplova Extra 330l ukoliko se koriste dva servo-uređaja za svaku površinu. Za upravljanje snagom pogonskog sustava odabran je servo-uređaj Hitec HS-5625MG sa dovoljnom operativnom snagom uz velike brzine rada.



Slika 38. Servo-uređaj Hitec HS – 7955 tg

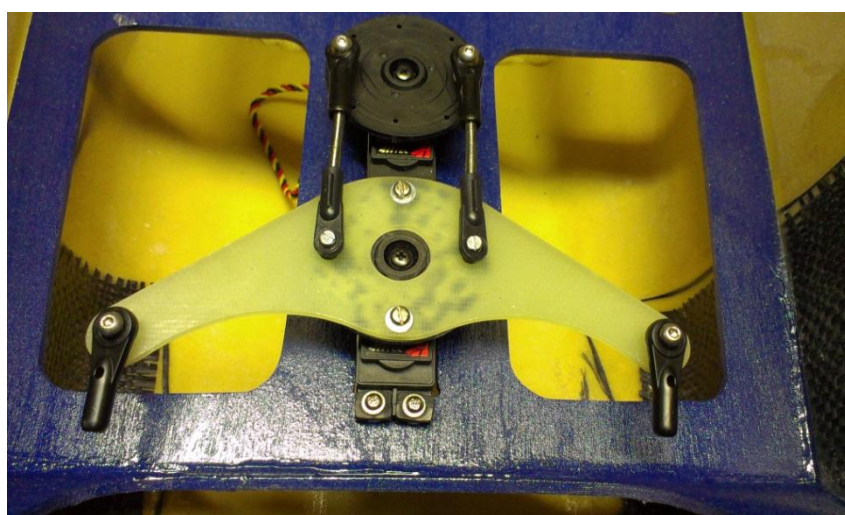
Izvor:[42]

- Za baterije sustava napajanja prema zahtjevima konfiguracije elektroničkih uređaja odabrane su Litium Polimerne baterije kapaciteta 2.150 mAh konfiguracije od dvije ćelije ukupnog nazivnog napona od 7,4 V (slika 39). Masa odabrane baterije iznosi 112 grama, te se koriste ukupno tri ovakve baterije što ukupno iznosi 336 grama. Dvije baterije koriste se za napajanje sustava upravljanja dok je jedna dio pogonskog sustava i ima funkciju napajanja elektronskog paljenja smjese goriva i zraka.



Slika 39. Prikaz ugrađene Li-Po baterije Rhino 2150

Servo-uređaji kormila smjera ugrađeni su u konzolu koja je ujedno i nosač ostalih elemenata sustava upravljanja. Servo-uređaji su serijski povezani čeličnim polugama s kugličnim dosjedima za povećanje ukupnog okretnog momenta (slika 40). Glavni servo-uređaj zakreće polugu dizajniranu tako da po dimenziji hvatišta čeličnih užadi odgovara upravljačkim polugama na samom kormilu smjera. Tako izvedena konfiguracija upravljanja upravljačkom površinom omogućuje križanje užadi kako bi se ostvario učinkovitiji rad servo-uređaja, odnosno da je u bilo kojem položaju zategnutost užadi na adekvatnoj razini.



Slika 40. Prikaz ugradnje servo-uređaja za kormilo smjera

Nakon odabrane konfiguracije elektroničkih elemenata sustava upravljanja, te naknadnim proračunom centra težišta modela zrakoplova moguće je izvršiti ugradnju istih.

Smještaj elemenata upravljačkog sustava bitan je sa aspekta raspodjele topline unutar trupa modela zrakoplova, odnosno bitno je osigurati uvjete rada elektronskih uređaja sa više gledišta. Prema dosadašnjem iskustvu područje temperaturnog opterećenja kritično je u prednjem djelu trupa, stoga je smještaj iza centra težišta pogodan i s tog gledišta kako bi se osigurao nesmetan rad svih uređaja. Na slici 41 prikazan je raspored ugradnje uređaja sustava upravljanja u trupu modela zrakoplova.



Slika 41. Prikaz ugradnje elemenata sustava upravljanja

Za stanicu za radio-upravljanje odabrana je Hitec Aurora 9X (slika 42) koja zadovoljava sve potrebe upravljanja modelom zrakoplova Extra 330l. Aurora 9X radi na području frekvencija od 2,4 GHz, s tehnologijom trostrukog protokola radioveze, upravljanjem putem 9 kanala i mogućnošću mnogih programibilnih funkcija. Ta stanica zadovoljava sve funkcionalne segmente podešavanja i upravljanja modelom zrakoplova.



Slika 42. Radio-upravljač Hitec Aurora 9X

Izvor: [34]

4.5. Lakiranje modela zrakoplova Extra 330l

Završna faza izrade modela zrakoplova Extra 330l odnosi se na završno lakiranje modela zrakoplova kako bi se dao konačan izgled konceptnog dizajna i ostvarila zaštita strukture kompozita od UV zračenja, vlage i eventualnih kemijskih oštećenja. Grafički dizajn modela zrakoplova odražuje se kao replika akrobatskog zrakoplova pune veličine. Lakiranje se izvodi nanošenjem vezivnog sloja te lakiranjem dvokomponentnim lakovima koji omogućuju visoku UV i kemijsku zaštitu.

Slika 43 prikazuje završen model zrakoplova Extra 330l. Svi zasebni elementi konstrukcije spojeni su u cjelinu te čine umanjenu repliku zrakoplova u stvarnoj veličini.



Slika 43. Model zrakoplova Extra 330l sa zrakoplovom stvarne veličine

5. INICIJALNO PODEŠAVANJE SUSTAVA MODELA ZRAKOPLOVA

Kako bi model zrakoplova bio spreman za prvi let, potrebno je izvršiti inicijalno podešavanje svih sustava detaljno i u skladu sa zrakoplovnim zakonitostima. Prilikom izvođenja određenih manevara u letu poželjno je da su svi elementi unutar modela zrakoplova ispravno pričvršćeni. Potrebno je izvršiti pregled svih vodiča elektroničkih uređaja i cjevovoda gorivnog sustava, te prema potrebi adekvatno ih pričvrstiti. Potrebno je pregledati sve rastavljive spojeve kako bi se osigurala dovoljna sigurnost konstrukcije modela zrakoplova.

Predpoletne provjere i podešavanja najčešće se u odnosu na:

- centar težišta modela zrakoplova,
- potisnu os pogonskog sustava i
- kontrolu i podešavanje otklona upravljačkih površina.

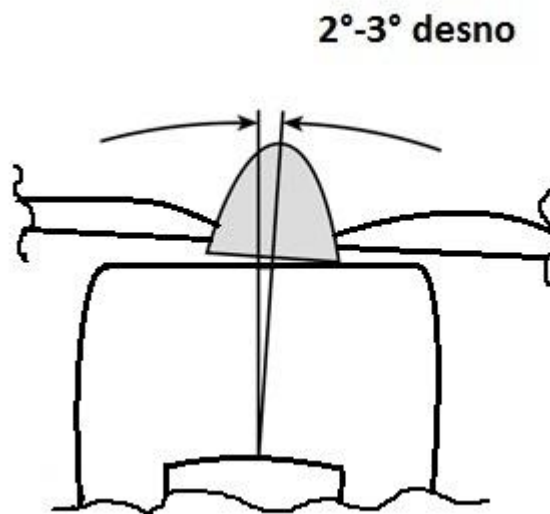
5.1. Centar težišta modela zrakoplova

Centar težišta modela zrakoplova provjerava se procedurom koja vrijedi za sve modele zrakoplova, a to je pronalaskom uravnoteženja po poprečnoj osi obično negdje na prvoj trećini krila, no nije uvijek tako s obzirom da postoje razne kategorije i izvedbe zrakoplova. Prema konceptualnom dizajnu pretpostavljena točka centra težišta nalazi se 100 mm od prednjeg brida krila prema kraju na rubu krila. Izmjerena točka centra težišta nalazi se na udaljenosti od 110 mm od prednjeg brida krila. S obzirom da se spremnik goriva nalazi ispred centra težišta, težina goriva pridonijeti će pomicanju centra težišta prema naprijed što može olakšati upravljanje u letu modela zrakoplova.

Također je bitno uravnoteženje po uzdužnoj osi modela zrakoplova, te prema potrebi dodavanjem utega male mase na krajevima krila napraviti korekciju kako bi centar težišta bio u propisanoj osi. Izmjeren centar težišta po uzdužnoj osi odgovara ispravnoj vrijednosti položaja.

Potisna os pogonskog sustava, kako je prethodno navedeno u fazi izgradnje modela zrakoplova, inicijalno se postavlja tako da se potisak prema dolje postavi na 0° s obzirom da se radio o simetričnom aeroprofilu krila, dok se prema uzdužnoj osi postavlja 2° - 3° udesno (slika 44).

Izmjerene vrijednosti kuteva potiska odgovaraju prema kutevima propisanih za ovakav tip modela zrakoplova.



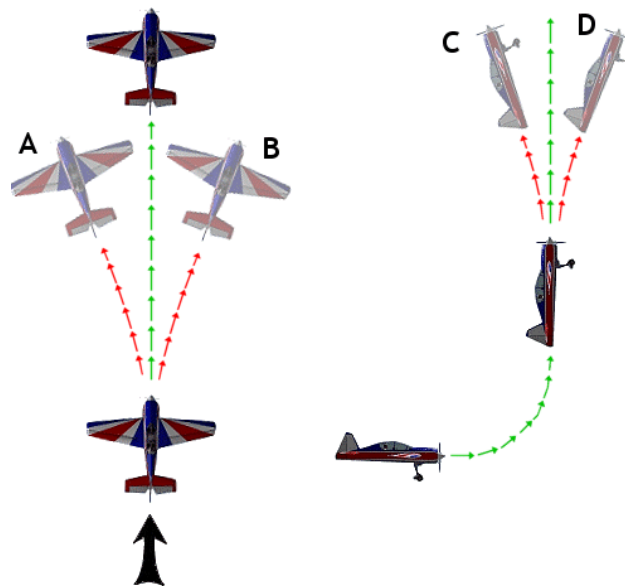
Slika 44. Prikaz osi pogonskog sustava

5.2. Potisna os pogonskog sustava

Kontrola i podešavanje potisne osi pogonskog mogu biti od velikog značaja za poboljšanje letnih karakteristika modela zrakoplova uz minimalne korekcije. Postavljanje osi pogonskog sustava češće je u desnu stranu iz razloga što većina modela zrakoplova ima karakteristiku pogonskog sustava da se elisa okreće u desnu stranu što rezultira rotaciju modela zrakoplova zbog spiralne struje formirane od potiska elise. Na ovaj način se poništava taj neželjeni moment, a on ovisi o vrsti modela zrakoplova odnosno o pogonskom sustavu.

Podešavanje potisne osi prema dolje obično se koristi za smanjenje tendencije uspona zrakoplova, no to je izraženo kod zrakoplova s visokom pozicijom postavljenog krila što u

ovom slučaju nije potreba. Detaljna provjera ispravno postavljene osi potiska ispituje se u letu te se naknadno podešava ukoliko za to postoji potreba (slika 45).



Slika 45. Prikaz ispitivanja osi potiska pogonskog sustava u letu

Izvor: [35]

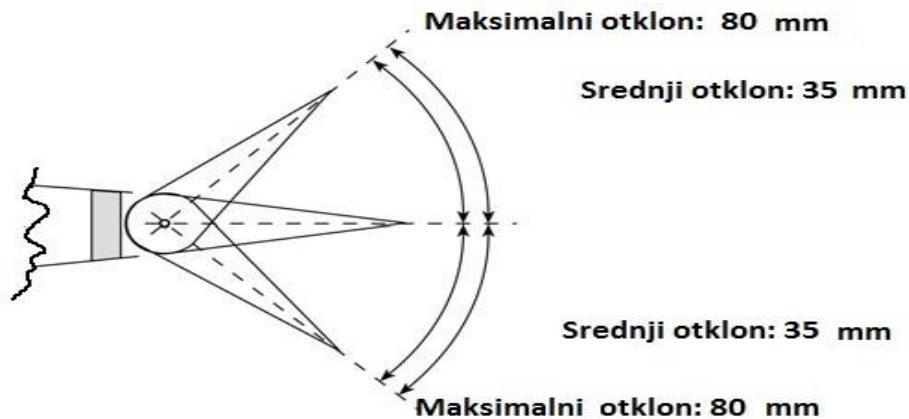
Postupak ispitivanja osi potiska u letu izvodi se na način da se zrakoplov postavi u vertikalni položaj iz pravocrtnog horizontalnog leta, zatim se zadrži vertikalna putanja i bez korekcije se prati u kojem smjeru iz vertikalne osi će zrakoplov imati tendenciju promjene smjera. Ukoliko zrakoplov nastavlja kretanje po vertikalnoj osi to govori da su kutevi potiska ispravno postavljeni.

5.3. Kontrola i podešavanje otklona upravljačkih površina

- **Kormilo visine**

Inicijalno se fizički podešava u nulti položaj, zatim se pomoću radio stanice Hitec Aurora 9X programira maksimalni položaj otklona desne upravljačke površine horizontalnog stabilizatora od 55° (približno 80 mm) kako je označeno na slici 46. Nakon što su formirani maksimalni otkloni programira se funkcija dvostupanjskih otklona, te kao druga opcija rada servo-uređaja postavljaju se smanjeni otkloni u obje

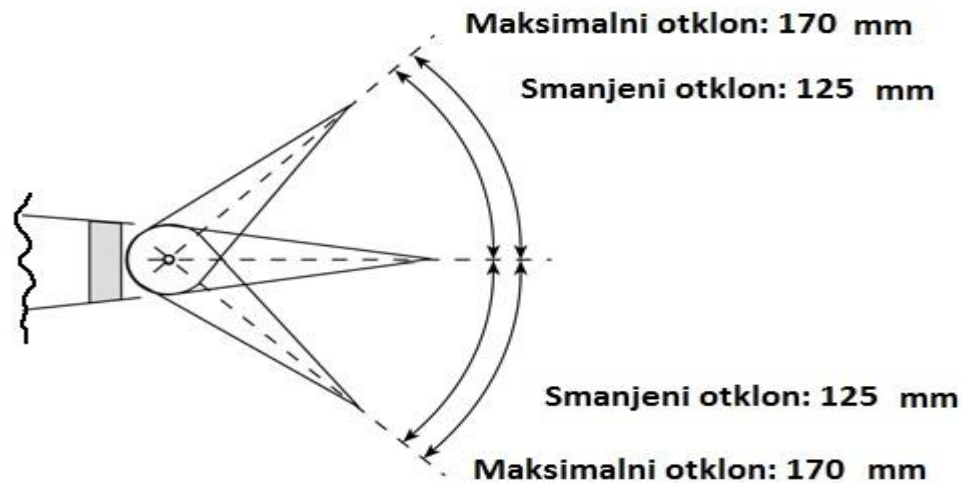
strane s otklonom izlazne ivice od 35 mm. Prema dosadašnjem iskustvu postavlja se 20% eksponencije na rad upravljačke površine u opciji smanjenih otklona. Nakon podešenog rada servo-uređaja, pomoću uređaja Emcotec Mini 5 preslikava se programirani rad servo-uređaja na servo-uređaj lijeve upravljačke površine. Ta dva servo-uređaja sada funkcioniraju kao jedan kanal te se kontroliraju maksimalni otkloni lijeve i desne upravljačke površine.



Slika 46. Prikaz otklona kormila visine

- **Kormilo smjera**

Inicijalno se postavljaju upravljačke poluge i kormilo smjera u nulti položaj, zatim se pomoću radio stanice podesi hod servo-uređaja na maksimalni hod otklona kormila smjera približno 170 mm u obje strane. Kada je postavljen maksimalni otklon, programira se opcija smanjenog otklona koji se postavlja za otklon od približno 100 mm u obje strane (slika 47). Na smanjeni otklon programira se 25% eksponencije na rad upravljačke površine s obzirom na pretpostavku velike osjetljivosti rada kormila smjera zbog povećane površine samog kormila. Nakon podešenog rada servo-uređaja pomoću uređaja Emcotec Mini 5, preslikava se programirani rad servo-uređaja na serijski povezan servo-uređaj. Tom opcijom ta dva servo-uređaja funkcioniraju kao jedan kanal a osiguran je identičan rad servo-uređaja u svim točkama zakretanja.

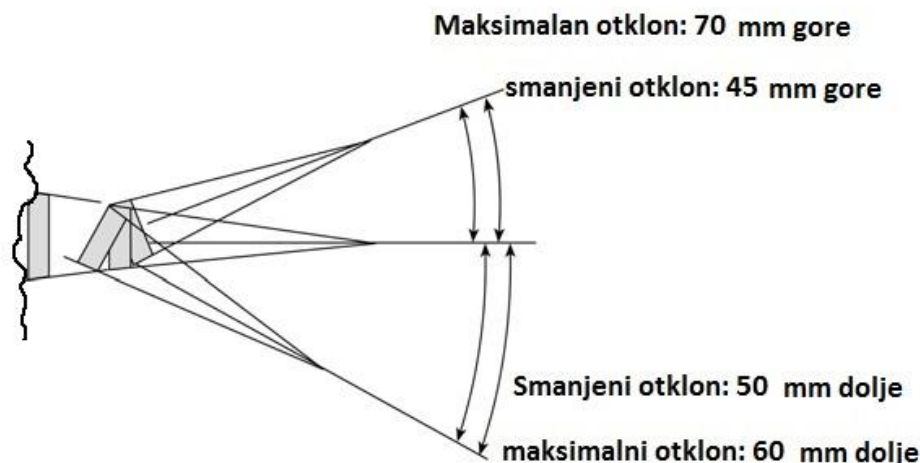


Slika 47. Prikaz otklona kormila smjera

- **Krilca**

Inicijalno se postavljaju poluge servo-uređaja i krilca u nulti položaj, zatim se pomoću radio stanice podešava maksimalni otklon prema gore na 70 mm, odnosno prema dolje 60 mm mjereno od kraja izlazne ivice krilca. U slučaju podešavanja otklona krilca programira se eksponencijalni rad upravljačke površine u iznosu od 30%. Nakon maksimalnih otklona programiraju se smanjeni otkloni od 45 mm prema gore odnosno 50 mm prema dolje (slika 48). To je posljedica obrnutog diferencijalnog rada upravljačke površine uzrokovana izmještenom osi zakretanja krilca iz središnje osi.

Diferencijal zakretanja krilca predstavlja razliku u otklanjanju između gornjeg i donjeg položaja koji se izražava kroz zakretanje modela zrakoplova. Nakon podešenog rada servo-uređaja pomoću uređaja Emcotec Mini 5, preslikava se programirani rad servo-uređaja na paralelni servo-uređaj na krilu, te se rad tih dvaju servo-uređaja formira preko jednog kanala. Ista procedura odrađuje se i na drugom krilu, te se vrši kontrola otklona lijevog i desnog krilca.



Slika 48. Prikaz otklona kriľca

5.4. Podeřavanje hoda snage pogonskog sustava

Inicijalno se polořaj poluge na rasplinjaču postavlja u središnji polořaj s obzirom da je i servo-uređaj u srednjem nultom polořaju. Nakon fizičkog postavljanja, pomoću radio stanice programira se maksimalni hod pune snage do fizičke granice zakretanja na rasplinjaču. Nakon polořaja pune snage ista procedura odvija se i za minimalnu snagu. Tako programirani hod upravljanja snagom pogonskog sustava potrebno je testirati i u radu motora. Zatim, ukoliko je potrebno korigira se polořaj minimalne snage kako bi se održao minimalni radni broj okretaja motora kako bi se osigurao pouzdan rad pogonskog sustava.

Prije polijetanja poželjno je provjeriti maksimalni broj okretaja motora, mjerenjem pomoću uređaja za mjerenje broja okretaja motora beskontaktno na način da se mjeri rotacija krakova elise. Podeřavanjem smjese goriva i zraka na rasplinjaču izmjenjuju se i karakteristike rada motora. Prvo se podeřava igla za količinu goriva pri malim brojevima okretaja i postavlja se na oko 1 ½ otvorenosti, zatim se postavlja maksimalni polořaj snage motora putem upravljača i uz mjerenje broja okretaja podeřava se idealna smjesa goriva i zraka iglom za rad u visokim brojevima okretaja na rasplinjaču. Najveći broj okretaja motora dobiven je uz otvorenost igle za količinu goriva od 1 ¼.

6. ANALIZA I USPOREDBA LETNIH ZNAČAJKI MODELA ZRAKOPLOVA EXTRA 330L

Kako bi bilo moguće analizirati letne značajke bespilotne letjelice Extra 330l potrebno je ispitivanje kako na zemlji tako i na letu, te upravo ta ispitivanja predstavljaju važan korak u stvaranju letjelice. Ispitivanjem se potvrđuju svi proračuni koji su bili izvršeni u fazama dizajniranja modela zrakoplova odnosno ukoliko je potrebno ukazuje se na eventualne korekcije kako bi se poboljšale letne karakteristike.

Ispitivanje na zemlji podrazumijeva ispitivanje podvozje modela zrakoplova, sile potiska, ispitivanje pouzdanosti pogonskog sustava u svim položajima, ispitivanje rada upravljačkog sustava i ispitivanje temperaturnog opterećenja elemenata pojedinih sustava unutar trupa modela zrakoplova.

Ispitivanje u letu ujedno podrazumijeva i prvi let bespilotne letjelice, letove ispitivanja stabilnosti, letove ispitivanja upravljivosti, ispitivanje uspinjanja, letove širenja ovojnice leta, ispitivanje procedura polijetanja i slijetanja te ispitivanje akrobatskih performansi modela zrakoplova.

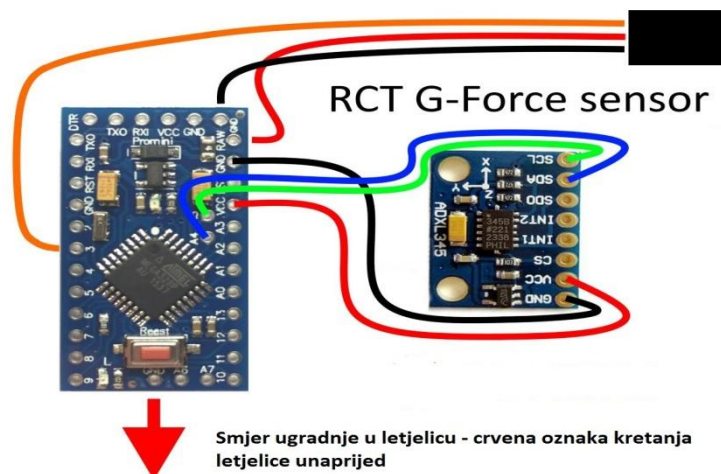
Kako bi bilo moguće pratiti određene parametre u letu letjelica će biti opremljena GPS (GPS – *Global Position System*) uređajem SkyRC GPS Speed Meter, koji osim mjerenja brzine kretanja letjelice daje informacije o visini, položaju u prostoru u trajanju od 150 minuta. Masa samog uređaja iznosi 40 g što neće previše utjecati na letne karakteristike letjelice (slika 49).



Slika 49. GPS uređaj SkyRC GPS Speed Meter

Izvor: [36]

Uz GPS uređaj potrebna je i ugradnja mjernog uređaja G – sile Jeti G-force sensor u tri osi u rasponu od +/-16 G (slika 50). Uređaj je potrebno ugraditi u ispravnom smjeru u letjelicu kako bi izmjereni podaci odgovarali stvarnim vrijednostima. Povezivanjem uređaja s upravljačkim sustavom u svakom trenutku leta je moguće na ekranu upravljačke radio-stanice vidjeti podatak o izmjerenoj vrijednosti.



Slika 50. Uređaj Jeti G-force sensor

Izvor: [37]

6.1. Ispitivanje modela zrakoplova Extra 330l na zemlji

Ispitivanje podvozja modela zrakoplova ispituje na uzletno-sletnoj stazi travnate površine namijenjene za polijetanje i slijetanje bespilotnih letjelica i ultralakih zrakoplova (slika 51). Ispitivanje stabilnosti i upravljivosti podvozja u procesima protrčavanja i zatrčavanja modela zrakoplova rezultira iznimnom upravljivošću repnim kormilom bez obzira na travnatu površinu. Veličina projektiranih kotača dovoljna je za postizanje brzine za polijetanje i osiguranje upravljivosti modela zrakoplova na travnatoj vrsti podloge. Travnata podloga s obzirom na svoju karakteristiku površine koja nije ravna tvrda površina rezultira efektom usporavanja kretanja modela zrakoplova po podlozi. S obzirom da izgrađeni model zrakoplova nema sustav za zaustavljanje kako je i projektirano, efekt travnate podloge pridonijeti će zaustavljanju i ublažavanju kontakta podvozja s podlogom u fazi slijetanja.

Pogonski sustav ostvaruje dovoljnu vučnu silu da nadjača sve otpore u kretanju modela zrakoplova po uzletno sletnoj stazi i manevarskim površinama.



Slika 51. Ispitivanje podvozja modela zrakoplova Extra 330l

Sljedeće ispitivanje odnosi se na provjeru rada pogonskog sustava ovisno o položaju u odnosu na nultu os kretanja. Ispitivanje se provodi na način da se zbog lakšeg prihvata ispituje samo djelomično sastavljeni model zrakoplova (bez krila i horizontalnog stabilizatora). Ispituje se rad pogonskog sustava u tri razine snage (minimalna, srednja i maksimalna) u minimalno 10 različitih položaja. Na taj način moguće je utvrditi ispravnost rada cjelokupnog pogonskog sustava (sustav dovoda goriva, rad rasplinjača, odziv promjene snage i vibracije). Nakon provedenog ispitivanja, rezultati ispitivanja su ispravan i pouzdan rad pogonskog sustava bez obzira na položaj u kojem se model zrakoplova nalazi. Sustav dovoda goriva ispunjava sve predviđene zahtjeve te osigurava dovoljnu količinu goriva u svakom trenutku. Prije polijetanja provodi se kontrola potiska i maksimalnog broja okretaja pogonskog sustava. S obzirom da nisu atmosferski uvjeti isti kao u trenutku inicijalnog podešavanja moguća su odstupanja od prethodnog mjerenja, te je prema potrebi nužno odraditi ponovno podešavanje prema trenutnim atmosferskim uvjetima. Nakon provedenog ispitivanja dobiveni su podaci vučne sile od 211,9 N i maksimalnog broja okretaja od 6.342 o/min što je i nešto više od prethodno izmjerenih podataka te nije potrebno raditi korekciju.

Ispitivanje temperaturnog opterećenja sustava obavlja se mjerenjem temperatura u određenim pozicijama unutar trupa i temperatura određenih elemenata. Simuliranjem uvjeta minimalne brzine leta i režima rada pogonskog sustava u opterećenom režimu rada,

ispitivanje temperaturnog opterećenja izvodi se pri vanjskoj temperaturi zraka od 27°C. Nakon 10 minuta u opterećenom režimu rada, temperaturna opterećenja pogonskog sustava je u normalnim granicama. Izmjerene temperature kreću se od 130°C do 167°C ovisno o rasponu broja okretaja. Prema ispitivanju na zemlji može se utvrditi da su difuzori i kanali za protok struje zraka za hlađenje cilindra motora izgrađeni na način da zadovoljavaju potrebe pogonskog sustava.

Ispitivanje rada upravljačkog sustava slično je onom koje se provodi prije svakog leta modela zrakoplova. Provjera ispravnosti upravljačke radio-stanice, servo-uređaja te rada svake upravljačke površine, ispitivanje radio-veze s prijemnikom i ispitivanje baterijskog sustava napajanja pod opterećenjem. Nakon izvršenog ispitivanja može se utvrditi ispravnost radio-veze upravljača i prijemnika, ispravnost svih servo-uređaja, ispravno zakretanje i pravilno djelovanje svih upravljačkih površina. Ispitivanje baterijskog napajanja pod opterećenjem može se također utvrditi da sustav omogućuje dovoljnu snagu i kapacitet električne energije za rad sustava upravljanja.

6.2. Ispitivanje modela zrakoplova Extra 330l u letu

Ispitivanje modela zrakoplova Extra 330l u letu trebalo bi rezultirati realnim podacima koji opisuju letne značajke ove bespilotne letjelice, kako bi se te značajke usporedile sa onima iz konceptualne faze dizajna, odnosno prema potrebi izvršila poboljšanja na letjelici. Na osnovu tih letnih značajki moguća je usporedba sa bespilotnim letjelicama sličnih tehničkih karakteristika.

Ispitivanje se provodi u nekoliko zasebnih faza, kako je prethodno navedeno, ovisno o vrsti ispitivanja koje se može izvesti unutar jednog leta modelom zrakoplova.

Prvi let modela zrakoplova Extra 330l provoditi će se u uvjetima bez vjetra u prvom djelu dana kako bi se izbjegla termička strujanja i vjetrovi. U takvim uvjetima moguće je provesti podešavanje upravljačkih površina prema potrebi i izvršiti razna ispitivanja koja rezultiraju u tom slučaju stvarnim karakteristikama u letu.

Za provođenje prvog leta odabrano je sportsko letjelište Buševac koje sadrži adekvatnu travnatu površinu za sigurno polijetanje i slijetanje modela zrakoplova. Nakon tehničkog pregleda samog modela zrakoplova, može se započeti sa procedurom pokretanja pogonskog sustava. Pokretanje se izvodi ručnim zakretanjem elise snažno i brzo sa

sigurnosnom opremom. Za vrijeme pokretanja model zrakoplova mora biti osiguran od mogućeg kretanja unaprijed prilikom pokretanja pogonskog sustava. Nakon što je pogonski sustav pokrenut i provedene su sve preduzetne radnje (zagrijavanje pogonskog sustava, pregled sustava upravljanja i dr.) može se započeti sa prvom fazom leta – polijetanjem. Pozicioniranjem modela zrakoplova u osi središnjice uzletno sletne staze započinje faza polijetanja postepenim dodavanjem snage i minimalnim pomakom ručice kormila visine u trenutku zatrčavanja kada je modelu zrakoplova podignut repni kotač. Postepenim uspinjanjem i održavanjem modela zrakoplova na vizualnoj udaljenosti dostiže se adekvatna visina leta za provođenje nultog podešavanja položaja upravljačkih ručica. Podešavanje se izvodi pri krstarećoj brzini sve dok se ne postigne pravocrtni let sa nultim položajima upravljačkih ručica. Nakon osnovnih manevara testira se upravljivost i stabilnost pri manjim brzinama kako bi se započelo sa fazom slijetanja. Pozicioniranjem modela zrakoplova približno u osi uzletno sletne staze postepeno se izvodi smanjenje visine i brzine kako bi se približio površini za slijetanje. Nakon približavanja i smanjivanja brzine skoro do brzine sloma uzgona izvršava se slijetanje modela zrakoplova s kontroliranim zaustavljanjem unutar površine uzletno sletne staze. Tako izvršen prvi let osnova je za odrađivanje svih idućih letova ispitivanja i operacija modela zrakoplova.

6.2.1. Ispitivanje letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l u standardnom letu

Ispitivanje uspinjanja provodi se sa nekoliko različitih brzina leta pravocrtno i u zaokretima. S obzirom da se radi o akrobatskom tipu modela zrakoplova dovoljno vučne sile omogućuje uspinjanje u vertikalnoj osi i preko visine vizualnog dometa. Za povećanje visine od 200 m, uspinjanjem pod kutem od 45° uz maksimalnu snagu, prosječnom brzinom od 47 m/s potrebno je 6 sekundi, dok je za istu visinu u vertikalnom uspinjanju prosječnom brzinom od 39,4 m/s potrebno 5 sekundi. Pad brzine u odnosu na povećanje visine zanemarive je vrijednosti s obzirom da u rasponu visina od 300 m model zrakoplova je sposoban održavati relativno veliku brzinu ne puno manju od maksimalne. Izvođenjem zaokreta u uspinjanju dolazi do većeg pada brzine s porastom visine ukoliko se radi o zaokretima manjeg radijusa iz razloga što se zakretanjem upravljačkih površina javljaju aerodinamički otpori koji dodatno smanjuju brzinu.

Ispitivanje manevara pri malim brzinama provodi se na sigurnoj visini kroz procedure zaokreta te ujedno zadržavanja iste visine, što u slučaju ovog modela zrakoplova postaje

rizično ukoliko se izvode zaokreti vrlo malih radijusa ($r < 5\text{m}$). Klizanje i slom uzgona pojave su koje se javljaju ukoliko se smanji radijus zaokreta. Model zrakoplova u potpunosti je upravljiv u ovakvim uvjetima leta, ali do 50% otklanjanja upravljačkih površina odnosno do pojave naglog smanjenja brzine. Sa povećanjem snage do 20% moguće je održavati model zrakoplova u prevučenom letu te ujedno i imati potpunu upravljivost u zaokretima malih radijusa. S obzirom na djelovanje struje potiska horizontalni i vertikalni stabilizator i pri iznimno malim brzinama leta imaju potpuno djelovanje što je i bio cilj u fazi projektiranja povećanjem upravljačkih površina.

Ispitivanje jedrenja provodi se u zasebnom letu kako bi se ispitalo ponašanje modela zrakoplova u slučaju otkaza pogonskog sustava. U jednom od ispitnih letova, dostiže se visina od 200 m, zatim se u pravocrtnom letu pri krstarećoj brzini ugasi pogonski sustav. Ostatak leta model zrakoplova leti poput jedrilice bez pogona, odnosno koristeći visinu za održavanje dovoljne brzine leta sve do slijetanja. S obzirom da se u kod ovog modela zrakoplova ne može u letu ponovno pokrenuti pogonski sustav, potrebno je iskustvo pilota kako bi se akrobatski model u funkciji jedrilice doveo u fazu sigurnog slijetanja na uzletno-sletnu stazu. U ovoj varijanti leta i najmanja greška može dovesti do potpunog uništenja modela zrakoplova, stoga je potrebno dobro isplanirati svaki manevar, procijeniti brzine leta te potreban kut jedrenja. Prema odrađenom ispitivanju može se utvrditi prosječna brzina jedrenja od 16 m/s, uz koju model zrakoplova prilikom zaokreta za 90° izgubi 2 m visine odnosno, a za zaokret od 180° izgubiti će 3-4 m visine. Prilikom jedrenja većom brzinom približno 22 m/s potreban je veći gubitak visine da bi se održavala na toj vrijednosti, no manevarske sposobnosti su tada znatno veće, odnosno manja je opasnost od klizanja i sloma uzgona.

Testiranje modela zrakoplova na slom uzgona izvodi se kako bi se utvrdila brzina sloma uzgona odnosno visina potrebna da model zrakoplova ponovno ostvari uzgon i upravljivost. Ispitivanjem se utvrđuje brzina sloma uzgona od 11 m/s što je približno kao što je procijenjeno preliminarnim ispitivanjima. Visina potrebna za formiranje uzgona i povratka u horizontalni let iznosi do 20 m sa minimalnom snagom pogonskog sustava. U situaciji sloma uzgona model zrakoplova ima tendenciju poniranja nosa kako je i pretpostavljeno u konceptualnoj fazi.

Ispitivanje stabilnosti modela zrakoplova na jednom od testnih letova izvodi se oko sve tri osi, nakon što je provedeno potpuno podešavanje, odnosno kada je moguće maknuti ruke sa upravljačkih komandi, a da model zrakoplova pri tome nastavlja let zadanom putanjom.

Uzdužna stabilnost ispituje se po uzdužnoj osi u letu, komandom podizanja nosa modela zrakoplova, te naknadnim praćenjem putanje od trenutka prestanka komande. Model zrakoplova nastavlja let u pravcu kako je postavljen nakon djelovanja upravljačkom površinom horizontalnog stabilizatora.

Poprečna stabilnost predstavlja stabilnost rotiranja oko uzdužne osi zrakoplova te se svako daljnje rotiranje smatra nestabilnim. Prati se rotacije modela zrakoplova nakon popuštanja ostvarene naredbe krilcima, a sama promjena u smislu rotiranja bila je minimalna.

Ispitivanje stabilnosti smjera vrši se na način da se u pravocrtnom letu otkloni kormilo smjera. Nakon što se model zrakoplova zakrene za određen kut po popuštanju komande zrakoplov nastavlja let zadanom putanjom. Svaka naknadna promjena po pitanju zakretanja oko vertikalne osi zrakoplova smatra se nestabilnom po smjeru kretanja.

Prema ispitanim manevrima oko pojedinih osi stabilnosti utvrdila se stabilnost modela zrakoplova bez ikakvih pojava rotacija ili zakretanja oko bilo koje osi. S obzirom da se radi o akrobatskom tipu zrakoplova poželjna je što veća stabilnost kako bi se omogućilo izvođenje akrobatskih manevara.

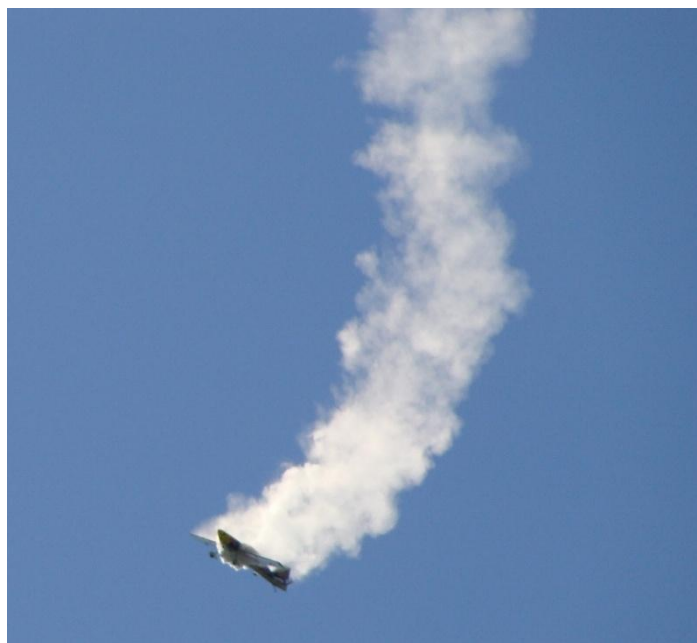
Strukturno ispitivanje izvodi se kako bi se potvrdila otpornost konstrukcije na razinu opterećenja koju model zrakoplova podnosi prilikom izvođenja manevra i vibracije strukture modela zrakoplova pri većim brzinama i opterećenjima. Ispitivanje vibracija strukture izvodi se u pravocrtnom letu pod punom snagom, odnosno kako bi se povećala maksimalna brzina u blagom poniranju. Razina opterećenja u ispitnom letu izmjerena je u vrijednosti od 8 G i -6 G, što je prema pretpostavljenom opterećenju približno za prvu testnu fazu. Iako su ovo inicijalna ispitivanja, nakon detaljne kontrole strukture ista će biti testirana i na veća opterećenja s obzirom da je model zrakoplova projektiran za puno veća opterećenja. Prilikom ispitivanja vibracija nisu primijećene nikakve neželjene vibracije što je i planirano u projektnoj fazi.

Izvršeno je ispitivanje ponašanja modela zrakoplova u spiralnoj rotaciji pri brzini sloma uzgona (kovit) klasičnim ulaskom u manevar. Nakon rotacije od 720° puštanjem kormila smjera i usmjeravanjem nosa zrakoplova prema dolje, ostvareno je ubrzanje dostatno za formiranje uzgona i potpunu kontrolu letjelice. Karakteristika modela zrakoplova nakon određenog broja izvođenja manevra je kontrolirano rotiranje koje se zaustavlja prema potrebi u bilo kojem trenutku i bez dodavanja snage pogonskog sustava.

Ispitivanje polijetanja i slijetanja se provodilo kroz nekoliko uzastopnih polijetanja i slijetanja, a izmjerene vrijednosti mogu se koristiti kao konačne prosječne karakteristike ovog modela zrakoplova za ove faze leta. Polijetanje modela zrakoplova Extra 330l moguće je

izvršiti sa 50% snage, zatrčavanjem u duljini od 50 m i ostvarivanjem poletne brzine od 13 m/s. Sljedeće ispitano polijetanje izvršeno je pod punom snagom što rezultira polijetanjem modela zrakoplova nakon svega 4,5 m i ostvarenoj brzini od 8,3 m/s s kojom se nastavlja let modela zrakoplova. Prilikom ispitivanja slijetanja u prvoj varijanti slijetanja iz prevučenog leta s 5-7% snage pri brzini od 7 m/s izvršeno je slijetanje te sigurno zaustavljanje nakon 11 m duljine zaustavnog puta. U drugoj varijanti izvršena su slijetanja s velikim poniranjem i smanjenjem visine uz efekt usporavanja sporom vrtnjom elise kao jedinog pomagala u usporeju. Slijetanje je izvršeno pri brzini od 12 m/s pri duljini zaustavnog puta od 35 m. Polijetanje i slijetanje pri vrlo malim brzinama rizično je i nije preporučljivo po pitanju održavanja stabilnosti. To se prije svega odnosi na slijetanje jer se model zrakoplova kreće pod velikim napadnim kutom gdje nagla pojava strujanja poput turbulencije može prouzročiti trenutni gubitak kontrole.

Ispitivanje istrajnosti modela zrakoplova Extra 330l u uvjetima bez vjetra. U spremniku za gorivo nalazi se 1 litra. Istrajnost se ispitivala za dva profila leta: krstareći let i let s akrobacijama zadanog programa (slika 52). U prvom slučaju izmjerena istrajnost iznosi 34 minute uz prosječno korištenje snage od 38%, dok u drugom slučaju uz prosječno korištenje snage od 87% istrajnost iznosila 17 minuta.



Slika 52. Model zrakoplova Extra 330l u akrobatskom letu

6.2.2. Ispitivanje letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l u akrobatskom letu

Ispitivanje modela zrakoplova kroz nekoliko različitih akrobacija nakon izvršenih prethodnih ispitivanja donosi rezultate koji su bitni za definiranje strukturne otpornosti, krajnjih granica zrakoplova, izvođenje kompletnog spektra akrobacija kroz zadane programe u natjecateljskoj klasi i eventualno podešavanje funkcija i položaja rada upravljačkih površina.

Među prvim akrobacijama ispituje se izvođenje manevra zaokreta od 180° pod maksimalnim opterećenjem te se mjeri vrijeme okreta i izlazna brzina. Nakon niza izvođenja zaokreta optimalne karakteristike manevra su pri ulaznoj brzini od 37,7 m/s, maksimalnom opterećenju od 9 G i izlaznoj brzini od 31 m/s. Radijus zaokreta iznosi oko 7 m, dok se vrijeme izvođenja zaokreta procjenjuje na ispod jedne sekunde.

Ispitivanje brzine izvođenja valjka odnosno rotacije modela zrakoplova oko svoje uzdužne osi odvija se u horizontalnom letu pod punom snagom, nakon maksimalne komande rotacije procijenjena je rotacija od 900° unutar jedne sekunde. Iduće ispitivanje trebalo bi se odnositi na akrobaciju s maksimalnim strukturnim opterećenjem. Manevar započinje vertikalnim poniranjem te postepenom rotacijom oko uzdužne osi ukupne rotacije od 1.440° pri brzini od 57 m/s. Zatim model zrakoplova prelazi u negativnom dinamičkom valjku do 180° rotacije u negativni plošni kovit. Brzina kretanja po vertikalnoj osi smanjila se ispod 3 m/s pri čemu je izmjereno opterećenje iznosilo 14,3 G što je ujedno i maksimalno ostvareno opterećenje modela zrakoplova.

Ispitivanje akrobacije leta na nož izvodi se iz pravocrtnog leta rotacijom modela zrakoplova u jednu stranu za 90° i održavanja tog položaja nasuprotnim otklanjanjem kormila smjera i prilagodbom snage pogonskog sustava. Kako bi se model zrakoplova zadržao u zadanom položaju potrebno je kormilom visine do 10% održavati smjer i po potrebi dati korekciju krilcima do 5% kako bi se izbjegla rotacija. Let na nož izvodi se pri minimalnim brzinama od 10 m/s pa sve do 48 m/s, pri čemu se kut trupa odnosno postotak otklona kormila repa mijenja u ovisnosti o brzini.

Posljednje ispitivanje odnosi se na akrobaciju lebdenja iznad površine zemlje, što je ujedno i jedna od najzahtjevnijih akrobacija. Lebđenje predstavlja akrobaciju koja prikazuje izravan omjer potiska i težine modela zrakoplova. Promatrani model zrakoplova, kako je vidljivo na slici 53, se u lebdenju održava sa 60% snage, te je sposoban u bilo kojem trenutku dodavanjem maksimalne snage u vertikalnoj osi povećavati visinu. U ovom položaju model zrakoplova ponaša se identično kao štap na prstu te je potrebna precizna i stalna korekcija po

uzdužnoj osi zrakoplova koja u ovom slučaju predstavlja vertikalnu os. Održavanje u vertikalnom položaju izvodi se svim upravljačkim površinama, a najviše kormilom smjera i visine.



Slika 53. Lebdenje modelom zrakoplova Extra 330l

6.3. Analiza letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l

Nakon inicijalnog konceptnog dizajna, izgradnje modela zrakoplova te obavljenim uspješnim ispitivanjima performansi promatranog modela zrakoplova Extra 330l, moguće je evaluirati letne značajke. Rezultatima ispitivanja potvrđuju se procjene i pretpostavke konceptne faze modela zrakoplova, te se može reći da izgrađeni model zrakoplova odgovara zamišljenom dizajnu i zahtjevima koji su formirani u početku.

Analizom pojedinih letnih značajki opisuju se mogućnosti i limiti modela zrakoplova te ih je moguće uspoređivati s značajkama sličnih letjelica. Razvoj izuzetno laganih krilnih elemenata omogućuje velike brzine rotacije odnosno zaustavljanje rotacije oko uzdužne osi u bilo kojem trenutku bez pojave inertnosti.

Izuzetna stabilnost modela zrakoplova čini ovu letjelicu vrlo sigurnom za let prilikom izvođenja manevara. Obrnuti let se izvodi bez previše korekcije kormila visine kako bi se

zadržala ravna putanja. Manevar sloma uzgona model zrakoplova izvodi na način da zadržava pravac kretanja uz predvidljivi vrlo mali nagib krila.

Performanse jedrenja modela zrakoplova mogu se usporediti sa zrakoplovom visokog krila, uz iznimnu kontrolu i stabilnost. S obzirom na performanse pogonskog sustava moguće je izvoditi relativno brzo uspinjanje uz odlično zadržavanje zadanog pravca.

Modelu zrakoplova dovoljna je prosječna duljina uzletno-sletne staze od 150 m za sigurno polijetanje i slijetanje. Faze polijetanja i slijetanja izvode se sa minimalnim korekcijama kormilom smjera, s dovoljno snage za polijetanje unutar 10-ak metara, te sposobnosti prevučenog leta za slijetanje u tri točke.

Akrobacije poput valjka, dinamičnog valjka, leta na nož, negativnog kovita i sličnih, model Extra 330l izvodi s potpunom kontrolom te strukturno podnosi sva opterećenja koja se javljaju pri izvođenju manevara. Maksimalno opterećenje strukture zahvaljujući kompozitnoj tehnologiji izrade ne predstavlja opasnost od oštećenja modela zrakoplova u letu.

Predimenzioniranim pogonskim sustavom omogućeno je lebdenje čije značajke znatno pridonose letu na minimalnim brzinama te izvođenju manevara pri istima. Uz takve pogonske karakteristike moguće je u negativnom kovitu, dodavanjem snage postepeno uspinjati zrakoplov u vertikalnom smjeru u spiralnoj rotaciji uz maksimalne otklone upravljačkih površina.

Povećane upravljačke površine horizontalnog i vertikalnog stabilizatora uvelike olakšavaju upravljanje pri iznimno malim brzinama, odnosno pri brzinama sloma uzgona. Međutim uz određen postotak ekspanzije u radu komandi prilikom velikih otklona upravljačkih površina osigurava se precizno upravljanje i pri velikim brzinama leta. Prema svim letnim značajkama može se utvrditi da model zrakoplova Extra 330l odgovara zahtjevima F3M kategorije te je sposoban izvesti sve akrobacije zadanog programa uz odgovarajuću preciznost i točnost. U tablici 4 prikazane su letne značajke modela zrakoplova Extra 330l, na osnovu kojih će biti napravljena usporedba sa bespilotnim letjelicama sličnih karakteristika.

Tablica 4. Letne značajke modela zrakoplova Extra 330l

| | |
|--|------------------|
| Profil krila | NACA 0012 |
| Razmah krila [m] | 2,600 |
| Duljina [m] | 2,380 |
| Visina [m] | 0,858 |
| Površina krila [m^2] | 1,157 |
| Najveća težina [N] | 119,682 |
| Nosivost krila [N/m^2] | 103,441 |
| Najveći koeficijent uzgona | 1,38 |
| Maksimalna brzina [m/s] | 56,38 |
| Brzina sloma uzgona [m/s] | 11,06 |
| Vučna sila [N] | 216 |
| Brzina uspinjanja pod 45° [m/s] | 47 |
| Brzina uspinjanja vertikalno [m/s] | 39,4 |
| Maksimalno opterećenje u letu [G] | 14,3 |
| Najkraća duljina polijetanja [m] | 4,5 |
| Najkraća duljina slijetanja [m] | 11 |
| Istrajnost u krstarenju [min] | 34 |
| Istrajnost u akrobatskom letu [min] | 17 |
| Vitkost krila | 5,8426 |
| Omjer pogonske sile i težine | 1,8 |

6.4. Usporedna analiza sličnih bespilotnih letjelica

U tablici 5 prikazana je usporedba tehničkih karakteristika i letnih značajki modela zrakoplova Extra 330l i dvaju sličnih akrobatskih modela zrakoplova. Model zrakoplova Super Decathlon prikazan je na slici 54, a model zrakoplova Pitts S12 prikazan je na slici 55. Usporedni modeli zrakoplova sličnih su pogonskih karakteristika, no iako su istog akrobatskog tipa, imaju dosta razlika u konstrukcijskom dizajnu, a time i različite letne značajke.



Slika 54. Model zrakoplova Super Decathlon

Izvor: [38]



Slika 55. Model zrakoplova Pitts S12

Izvor: [39]

Tablica 5. Tehnički podaci i letne značajke promatranih modela zrakoplova

| Tehničke/letne karakteristike | Extra 330I | Pitts S12 | Super Decathlon |
|-----------------------------------|------------|----------------------|----------------------|
| Mjerilo veličine [%] | 33 | 33 | 36 |
| Razmah krila [m] | 2,600 | 2,260 | 3,505 |
| Duljina [m] | 2,380 | 2,184 | 2,439 |
| Površina krila [m^2] | 1,157 | 1,606 | 2,049 |
| Maksimalna težina [N] | 119,682 | 127 | 172 – 191 |
| Pogonski sustav | DA 100 | DA 100L | 3W 106 |
| Materijal konstrukcije | Kompozit | Balsa/avio-šperploča | Balsa/avio-šperploča |
| Kapacitet spremnika za gorivo [l] | 1 | 1 | 1,5 |
| Maksimalna brzina [m/s] | 56,38 | 44,5 | 47,6 |
| Nosivost krila [N/m^2] | 103,441 | 79,07 | 93,21 |
| Maksimalno opterećenje [G] | 14,3 | 9 | 8,1 |
| Otklon krilca [°] | 40 | 45 | 19 |
| Otklon kormila visine [°] | 55 | 45 | 35 |
| Otklon kormila smjera [°] | 48 | 45 | 27 |
| Omjer pogonske sile i težine | 1,8 | 1,7 | 1,15 |

Izvor: [38], [39]

Iz tablice je vidljivo kako se radi o modelima zrakoplova s približno jednakim pogonskim sustavima, istih veličina motora odnosno približnim pogonskim silama. Zrakoplov Pitts S12 je kategorije dvokrilca, dok je Super Decathlon izvedba zrakoplova s visoko postavljenim krilom. Prema samoj izvedbi modela zrakoplova letne značajke ne mogu biti identične. Prema navedenim podacima tehničke dimenzije koje opisuju model zrakoplova uvelike se razlikuju od modela do modela. Pitts S12 zbog svoje izvedbe sa dva krila ima najmanji razmah krila, dok Super Decathlon ima najveći razmah krila i to za oko 26% veći od modela zrakoplova Extra 330I. Duljina je kraća jedino kod zrakoplova Pitts S12, dok Super Decathlon i Extra 330I imaju približno jednaku duljinu. Prema prikazanim vrijednostima kapaciteta spremnika za gorivo, ako se uzme u obzir da su u svim modelima slični pogonski

sustavi, Super Decathlon ima najveću istrajnost. Kako se model Super Decathlon osim za akrobatsko letenje koristi i za vuču jedrilica, potrebna je veća količina goriva kako bi se osigurala i veća istrajnost s jednim punjenjem goriva. Prema vrijednosti maksimalne težine, model Extra 330l najlakši je u kategoriji, a Pitts S12 ima za svega 10-ak N veću težinu od zrakoplova Extra 330l. Zrakoplov Super Decathlon ima za oko 45% veću masu od zrakoplova Extra 330l. S obzirom na različite tipove zrakoplova, podaci potvrđuju i različite maksimalne brzine iz kojih je vidljivo da Pitts S12 ima najmanju maksimalnu brzinu, a Extra 330l najveću. To se može i zaključiti s obzirom na razinu aerodinamičkih otpora koje zrakoplovi imaju, a direktno su vezani na tip zrakoplova. Nosivost krila, najveća je kod modela Extra 330l, dok je najmanja kod modela Pitts S12. Pitts S12 ima dva krila koja raspoređeno nose opterećenje po većoj površini krila. Uzevši u obzir letne performanse akrobatskog leta, težine i veličine modela zrakoplova, Extra 330l u stanju je izvesti manevre s najvećim opterećenjem, dok je to kod modela zrakoplova Super Decathlon skoro 50% manje. Zahvaljujući kompozitnoj strukturi i dizajna modela zrakoplova Extra 330l, može se reći da je to upravo razlog sposobnosti podnošenja manevara s tolikim strukturnim opterećenjem. U promatranoj kategoriji akrobatskih zrakoplova, uz njihovo korištenje u učestalim akrobatskim letovima, može se utvrditi i bitna razlika u trajanju eksploatacije istih. Drvena struktura pod utjecajem učestalih dinamičkih opterećenja pokazuje znakove dotrajlosti u relativno kratkom periodu korištenja. Slučaj kod modela zrakoplova od kompozitne strukture kao što je primjer Extra 330l, utvrđena su znatno bolja strukturna svojstva.

Prema podacima o zakretanju upravljačkih površina, može se utvrditi da je otklon krilaca najveći kod modela Pitts S12, a najmanju kod zrakoplova Super Decathlon. Otkloni kormila smjera i kormila visine najveći su kod modela Extra 330l, a najmanji kod Super Decathlona. Brzine rotacije također su najveće kod modela Extra 330l, a zbog veličine krila i izvedbe najmanje kod zrakoplova Super Decathlon. Pitts S12 i Extra 330l imaju skoro podjednaku stabilnost u letu, dok Super Decathlon ima nešto manju stabilnost smjera i poprečnu stabilnost. Super Decatlon ima najmanju brzinu slijetanja i polijetanja, ali je kod primjera modela Pitts S12 i Extra 330l potrebna manja duljina uzletno-sletne staze. Pitts S12 u mogućnosti je izvesti sve vrste akrobacija kao i Extra 330l, ali pri nešto manjim brzinama, dok se kod zrakoplova Super Dechatlon uvelike odražava tip zrakoplova prilikom izvođenja akrobacija s posljedicom smanjene preciznosti. Bočni vjetar najviše u letu utječe na Pitts S12 iz razloga velikih bočnih površina i spojnih aerodinamičkih površina između krila zbog kojih se javlja bočno klizanje zrakoplova i velika potreba za korekcijom u upravljanju. Omjer

pogonske sile i težine najveći je kod modela Extra 330l, dok je kod modela Super Dechatlon zbog najveće težine taj omjer najmanji.

7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazan je povijesni razvoj bespilotnih letjelica te njihova klasifikacija i primjena. Opisane su zakonske regulative korištenja bespilotnih letjelica kao i propisi natjecanja modelima zrakoplova u klasi F3M. Opisan je princip rada bespilotnih letjelica, te su opisani svi sustavi od kojih se bespilotna letjelica sastoji.

Kao studija slučaja odabran je primjer konstruiranja modela bespilotne letjelice Extra 330l, te analiza letnih značajki iste. Početnim postavkama za sudjelovanje na natjecanju u akrobatskom letu modela zrakoplova u F3M kategoriji replika zrakoplova pune veličine odabrao se zrakoplov Extra 330l. Postavljanjem zahtjeva akrobatskih letnih značajki za dizajn modela zrakoplova, formirane su osnove za razvoj dizajna. Dizajn modela zrakoplova proveden je kroz konceptno, preliminarno i detaljno konstruiranje. Nakon odabranog mjerila i određivanja osnovnih dimenzija, odabran je profil krila na osnovu kojega je izrađen dijagram faktora opterećenja. Kroz konstrukciju dijagrama opterećenja prikazana su stanja opterećenja tijekom manevriranja određenim brzinama i aerodinamičke granice u letu. U idućim fazama definirane su dimenzije i geometrijske karakteristike modela zrakoplova koje su ključne za daljnje stvaranje 3D dizajna modela. Na osnovi konceptnih dimenzija generiran je 3D model zrakoplova Extra 330l koji je baza za projektiranje svih detalja pojedinih elemenata. Svaki sustav i elementi sustava projektirani su do najsitnijeg detalja kako bi u fazi izrade bili definirani svi potrebni materijali i tehnologija izrade. Prema definiranim zahtjevima odabrani su polimerni kompoziti kao materijal za izradu modela zrakoplova. U idućoj fazi izrađen je model koji je osnova za izradu kalupa svih pojedinih elemenata modela zrakoplova.

U radu su definirani svi tehnološki procesi izrade elemenata modela zrakoplova Extra 330l, te su detaljno opisani svi sustavi. U idućoj fazi izvršeno je inicijalno podešavanje svih sustava modela zrakoplova, postavljen je centar težišta i ispravno je postavljena os pogonskog sustava. Zatim su izvedena ispitivanja u testnim letovima iz kojih su zabilježeni određeni parametri za evaluiranje letnih značajki modela zrakoplova. Dobiveni rezultati koji opisuju letne značajke potvrđuju visoku manevarsku sposobnost modela zrakoplova koja se podudara sa procijenjenom sposobnošću iz konceptne faze formiranom na osnovu definiranih zahtjeva.

Dobivene su letne značajke modela zrakoplova Extra 330l, uz krajnje mogućnosti i granice unutar kojih je letjelica sposobna izvoditi određene akrobatske manevre pri dovoljnoj razini sigurnosti u letu. Korištenjem kompozitnih materijala u izgradnji modela zrakoplova uvelike se pridonijelo otpornosti strukture na djelovanje opterećenja u ekstremnim manevrima, te izradom vrlo laganih elemenata poput krila čija mala masa pokazuje izvrsne

performanse brzine rotacije, odnosno brzine zaustavljanja rotacije u željenom trenutku. To su bitne značajke u preciznom akrobatskom letenju u kojem se ocjenjuju i najsitniji detalji prilikom izvođenja određene akrobacije. Zaključnim razmatranjem može se utvrditi uspješnost razvoja i izgradnje vrlo sposobnog i preciznog modela zrakoplova koji predstavlja zavidnu konkurentnost u svijetu profesionalnih akrobatskih modela zrakoplova.

Kroz usporednu analizu tehničkih i letnih karakteristika s sličnim modelima zrakoplova jasno su prikazane mogućnosti i granice, te odnosi pojedinih značajki ovisno o izvedbi i dizajnu. Usporednom analizom također se evaluiraju letne značajke promatranog modela zrakoplova u svrhu eventualnog razvoja mogućih poboljšanja performansi određenog sustava modela zrakoplova.

LITERATURA

- [1] Barnhart R. K., Hottman S. B., Shappee E., Masrhall D. M. Introduction to Unmanned Aircraft Systems: Boca Raton, CRC Press; 2012.
- [2] <https://shvachko.net/?p=1378&lang=en> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [3] <http://flyingmachines.ru/Images7/Putnam/GD/36-1.jpg> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [4] <https://interestingengineering.com/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [5] https://tipsfordrones.com/wp-content/uploads/2019/08/The-History-of-Drones_TipsForDrones-01.jpg [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [6] https://7lafa.com/weapons_en/284 [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [7] <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/V1.html> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [8] <https://www.combatairmuseum.org/aircraft/ryanbqm34afirebee.html> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [9] https://www.gyrodynehelicopters.com/dash_history.htm [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [10] https://airandspace.si.edu/collection-objects/pioneer-rq-2a-uav/nasm_A20000794000 [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [11] <https://www.airforce-technology.com/projects/predator-uav/> [pristupljeno: ožujak, 2021.]
- [12] <https://eu.usatoday.com/story/money/business/2014/06/10/faa-drones-bp-oil-pipeline-aerovironment-north-shore/10264197/> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [13] Arjomandi, M.: Classification of Unmanned Aerial Vehicles. Adelaide, 2008.
- [14] <https://www.overfly.me/hr/rilievo-fotogrammetrico-drone/> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [15] <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2020/08/drone-based-air-quality-analyzer-developed/> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [16] <https://www.commercialuavnews.com/infrastructure/using-a-swarm-of-drones-to-research-hurricanes> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [17] <https://www.west-midlands.police.uk/frequently-asked-questions/police-drones> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [18] https://www.fai.org/sport/aeromodelling?upcoming=1&f%5B0%5D=fai_event_year%3A2021&f%5B1%5D=field_discipline_task_list_map%253Afield_sport%3A28&display=list [pristupljeno: travanj, 2021.]

- [19] Provedbena uredba komisije (EU) 2019/947; od 24. svibnja 2019. o pravilima i postupcima za rad bespilotnih zrakoplova
- [20] <https://www.elitemodelsonline.co.uk/Aircraft/By-Manufacturers/Keil-Kraft/40649-/Keil-Kraft-Invader-Kit-245-Free-Flight-Towline-Glider-A-KK1020> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [21] <http://www.americanjuniorclassics.com/Workshop/ucontrolpatent.htm> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [22] <https://www.greeleytribune.com/2014/06/23/up-in-the-air-rc-planes-flying-high-east-of-ault/> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [23] http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/211_fall_2016/Benson_Hoover/Slide6.htm [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [24] <https://sites.google.com/site/ntuuavion> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [25] <https://www.rcplanet.com/cdn-cgi/image/width=475/images/large/hrc/hrc34110.jpg> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [26] <https://rogershobbycenter.com/lipoguide> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [27] <https://shop.stormerhobbies.com/5000mah-50c-lipo-battery-p/dynb3810ec.htm> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [28] <https://www.pbsindia.com/aerospace/engines/turbojet-engines> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [29] <https://www.modelmotors.cz> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [30] https://www.airfieldmodels.com/information_source/getting_started_in_radio_control/images/wallpaper/disorientation_01.jpg [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [31] FAI Sporting code, Radio Control Aerobatics, 2017., Volume 3, Section 4 - Aeromodelling
- [32] <https://www.desertaircraft.com/products/da-1001> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [33] <https://www.desertaircraft.com/products/mejzlik-2-blade?variant=1770874753> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [34] https://hitecrd.com/images/products/full/337_1_2013_Aurora9X_ProductShot.jpg [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [35] <https://www.rc-airplane-world.com/trimming-your-rc-airplane.html> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [36] <https://www.motionrc.eu/collections/gps-speed-meters/products/skyrc-gps-speed-meter-sk-500002> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [37] <https://www.rc-thoughts.com/jeti-g-force-sensor/> [pristupljeno: travanj, 2021.]

- [38] <https://ultimate-hobby.com/products/super-decathlon-100cc-arf>
[pristupljeno: travanj, 2021.]
- [39] <https://www.modelairplanenews.com/exclusive-online-hangar-9-100cc-beast-review/>
[pristupljeno: travanj, 2021.]
- [40] <https://hitecrcd.com/products/aircraft-radios-receivers-and-accessories/2.4ghz-aircraft-receivers-modules/optima-9-9-channel-2.4ghz-receiver/product> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [41] <https://www.espritmodel.com/emcotec-dpsi-rv-mini-6-power-distribution-system-6-7-channels.aspx> [pristupljeno: travanj, 2021.]
- [42] <https://hitecrcd.com/products/servos/digital/coreless/hs-7955tg/product> [pristupljeno: travanj, 2021.]

POPIS KRATICA

UAV – (Unmanned Aircraft Vehicle) – Беспилотна летјелица

UAS – (Unmanned Aircraft System) – Sustav беспилотне летјелице

FAI – (International Aeronautical Federation) – Међународни зракопловни savez

TAS – (True airspeed) – Stvarna brzina kretanja

DA – (Desert Aircraft) – Proizvođač pogonskih sustava

GPS – (Global Position System) – Globalni sustav pozicioniranja

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Bepilotna letjelica "zračna meta" | 4 |
| Slika 2. Bepilotna letjelica "Kettering Bug" | 4 |
| Slika 3. Bepilotna letjelica Curtiss N2C-2 | 5 |
| Slika 4. Bepilotna letjelica Radioplane OQ-2 | 5 |
| Slika 5. Bepilotna letjelica Doodlebug V-1 | 6 |
| Slika 6. Bepilotna letjelica Ryan Firebee BQM-34A..... | 7 |
| Slika 7. Bepilotni helikopter Dash QH-50 | 7 |
| Slika 8. Bepilotna letjelica RQ-2A..... | 8 |
| Slika 9. Bepilotna letjelica RQ-1 Predator | 9 |
| Slika 10. Bepilotna letjelica Raven | 9 |
| Slika 11. Bepilotna letjelica s pet rotora | 10 |
| Slika 12. Slobodno-leteće bepilotne letjelice | 17 |
| Slika 13. Kontrolirana bepilotna letjelica..... | 18 |
| Slika 14. Radio-upravljana bepilotna letjelica | 18 |
| Slika 15. Prikaz osi bepilotne letjelice | 19 |
| Slika 16. Predajnik/daljinski upravljač | 21 |
| Slika 17. Prikaz servo-uređaja | 23 |
| Slika 18. Prikaz baterije | 24 |
| Slika 19. Primjer preklapanja oblika..... | 29 |
| Slika 20. Prikaz profila krila NACA 0012..... | 37 |
| Slika 21. Prikaz dimenzija modela zrakoplova Extra 330l..... | 38 |
| Slika 22. Prikaz radnog sučelja programa SolidWorks..... | 39 |
| Slika 23. Prikaz generiranog 3D modela zrakoplova Extra 330l..... | 39 |
| Slika 24. Prikaz projektiranja pojedinog elementa modela zrakoplova..... | 40 |
| Slika 25. Izrađen trup modela zrakoplova Extra 330l..... | 42 |
| Slika 26. Prikaz stajnog trapa modela zrakoplova Extra 330l | 43 |
| Slika 27. Prikaz procesa izgradnje krila modela zrakoplova Extra 330l | 43 |
| Slika 28. Prikaz pozicije osi zakretanja krilaca | 44 |
| Slika 29. Prikaz prihvata upravljačke površine vertikalnog stabilizatora..... | 45 |
| Slika 30. Prikaz ugradnje servo-uređaja u horizontalnom stabilizatoru | 45 |
| Slika 31. Presjek konstrukcije podvozja | 46 |
| Slika 32. Prikaz ugradnje pogonskog sustava..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Slika 33. Prikaz ugradnje ispušnog sustava | 48 |
| Slika 34. Elisa pogonskog sustava Mejzlik 28/10 | 48 |
| Slika 35. Konzola sa spremnicima za gorivo i ulje..... | 49 |
| Slika 36. Prijemnik Hitec Optima 9..... | 50 |
| Slika 37. Prikaz DPSI Emcotec RV Mini 5 i raspodjele servo-uređaja..... | 51 |
| Slika 38. Servo-uređaj Hitec HS – 7955 tg..... | 52 |
| Slika 39. Prikaz ugrađene Li-Po baterije Rhino 2150 | 53 |
| Slika 40. Prikaz ugradnje servo-uređaja za kormilo smjera | 53 |
| Slika 41. Prikaz ugradnje elemenata sustava upravljanja | 54 |
| Slika 42. Radio-upravljač Hitec Aurora 9X..... | 55 |
| Slika 43. Model zrakoplova Extra 330l sa zrakoplovom stvarne veličine..... | 56 |
| Slika 44. Prikaz osi pogonskog sustava | 58 |
| Slika 45. Prikaz ispitivanja osi potiska pogonskog sustava u letu..... | 59 |
| Slika 46. Prikaz otklona kormila visine | 60 |
| Slika 47. Prikaz otklona kormila smjera..... | 61 |
| Slika 48. Prikaz otklona krilca | 62 |
| Slika 49. GPS uređaj SkyRC GPS Speed Meter..... | 63 |
| Slika 50. Uređaj Jeti G-force sensor | 64 |
| Slika 51. Ispitivanje podvozja modela zrakoplova Extra 330l | 65 |
| Slika 52. Model zrakoplova Extra 330l u akrobatskom letu..... | 70 |
| Slika 53. Lebdenje modelom zrakoplova Extra 330l..... | 72 |
| Slika 54. Model zrakoplova Super Decathlon | 75 |
| Slika 55. Model zrakoplova Pitts S12..... | 75 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Klasifikacija bespilotnih letjelica | 12 |
| Tablica 2. Pretpostavljene i izračunate vrijednosti letnih uvjeta i modela zrakoplova Extra 3301..... | 34 |
| Tablica 3. Tehničke specifikacije motora DA 100 | 47 |
| Tablica 4. Letne značajke modela zrakoplova Extra 3301..... | 74 |
| Tablica 5. Tehnički podaci i letne značajke promatranih modela | 76 |

POPIS GRAFIKONA

| | |
|--|----|
| Grafikon 1. V-n grafikon modela zrakoplova Extra 330l | 36 |
|--|----|



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ diplomski rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ diplomskog rada pod naslovom **Analiza letnih značajki bespilotne letjelice Extra 330I**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, _____ 25.6.2021 _____

(potpis)

