

# Proračun i izrada modela mlaznog motora s elektropogonom

---

Dukić, Krešimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:132488>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Krešimir Dukić**

**PRORAČUN I IZRADA MODELA MLAZNOG**  
**MOTORA S ELEKTROPOGONOM**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2016.**

Zagreb, 20. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovni pogonski sustavi II**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 3593**

Pristupnik: **Krešimir Dukić (0135223698)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Pilot**  
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Proračun i izrada modela mlaznog motora s elektropogonom**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati idejno i konstrukcijsko rješenje motora MPM20, skicirati i objasniti princip rada motora, te objasniti princip stvaranja potiska. Potrebno je izraditi mali model motora na kojem će se moći prikazati princip stvaranja i mjerenja potiska. Na kraju je potrebno navesti moguće primjene motora MPM20 u eksploataciji.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2016.

Mentor:



doc. dr. sc. Anita Domitrović

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

### **PRORAČUN I IZRADA MODELA MLAZNOG MOTORA S ELEKTROPOGONOM**

### **CALCULATION AND DESIGN OF ELECTRICALY POWERED JET ENGINE MODEL**

Mentor: doc. dr. sc. Anita Domitrović

Student: Krešimir Dukić

JMBAG: 0135223698

**Zagreb, rujan, 2016.**

## **SAŽETAK**

Razvoj mlaznog motora dugotrajan je i detaljan proces. Prvo treba razviti ideju i koncept rada motora. Nakon toga treba izraditi cijelokupni motor sa sustavima, zatim ga testirati preko maksimalnih granica te analizirati zbog čega su nastali kvarovi, poboljšati tu komponentu ili sustav, te ponoviti cijeli proces sve dok se ne nađe pouzdano rješenje koje će omogućiti pouzdan i siguran rad motora. Električni motori su motori koji električnu energiju pretvaraju u mehaničku. U normalnom načinu rada, većina motora radi pomoću interakcije magnetnog polja motora i struje unutar njega. Cilj ovog rada je prikazati postupak proračunavanja i izrade nacрта, te samu izradu i testiranje mlaznog motora MPM20, koji za pogon koristi elektromotor.

**KLJUČNE RIJEČI:** mlazni; elektroventilatorski motor; razvoj motora; sustav; napajanje; ESC; proračunavanja; izrada

## **SUMMARY**

Developing a jet engine is a hard and detailed process. Firstly, an idea and concept has to be developed. Engine has to be produced with all its systems, then it has to be tested above its maximum limits with analysis made to detect where did malfunctions occur. Afterwards those components and systems are enhanced, and the whole process starts again until a reliable solution, that will ensure normal and safe work, is found. Electric engines are engines that convert electric energy into mechanical energy. In normal working mode, most of them operate through the interaction between the motor's magnetic field and currents within it. The goal of this thesis is to show procedure of calculation and production of blueprints, and the production and testing of jet engine MPM20 that uses electric energy for drive.

**KEY WORDS:** jet; EDF- Electric Ducted Fan; developing an engine; system; power supply; ESC; calculation; production

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. IDEJNO I KONSTRUKCIJSKO RIJEŠENJE MOTORA MPM20 .....	3
3. GLAVNI DIJELOVI MOTORA.....	6
3.1. POGONSKI DIO .....	7
3.2. SUSTAV ZA POKRETANJE I NAPAJANJE STRUJOM .....	8
3.3. SUSTAV ZA DOVOD GORIVA ZA NAKNADNO IZGARANJE .....	10
3.4. SUSTAV ZA ZAPALJENJE GORIVA.....	12
4. PRINCIP STVARANJA POTISKA UZ NAKNADNO IZGARANJE .....	14
5. MJERENJE BRZINA I PRORAČUN POTISKA.....	16
5.1. UTJECAJ BRZINE I VISINE LETA NA POTISAK .....	17
5.2. MJERENJE POTISKA, VOLUMNOG I MASENOG PROTOKA .....	18
6. MOGUĆNOST PRIMJENE MOTORA MPM20 NA MODELIMA ZRAKOPLOVA..	22
.....	23
7. ZAKLJUČAK.....	24
LITERATURA .....	25
POPIS KRATICA .....	26
POPIS TABLICA.....	26
POPIS SLIKA .....	27

## 1. UVOD

Još od početka 20. stoljeća i proizvodnje prvih zrakoplovnih motora, ljudi su se trudili dizajnirati i stvoriti što uspješnije i prikladnije motore te podizati granice tehnologije.

Od 1903. godine i motora za zrakoplov Wright Flyer, do Heinkel HE 178- prvog zrakoplova pogonjenog mlaznim motorom 1938. godine i prvih turboventilatorskih motora kreiranih od strane Arkhipa Lyulke 1939. i Daimler- Benz- a 1939.- 1943. napredak je očigledan u svim vrstama pogonskih grupa. U ovom radu govori se o motoru koji ima električni pogon, pa se kao takav koristi na električnim zrakoplovima i letjelicama. Električni zrakoplov je letjelica koju pokreće elektromotor, umjesto motora s unutrašnjim izgaranjem. Električna struja može dolaziti od gorivih ćelija, fotonaponskih ploča, bežičnog prijenosa energije ili od baterija/akumulatora, ali svejedno kao izvor pogona motora još uvijek nije našla veliku primjenu u komercijalnim svrhama, prvenstveno zbog problema koji stvara sam izvor te struje. Baterije ne mogu osigurati i stvoriti dovoljnu snagu i omogućiti dolet kao što to mogu motori sa unutrašnjim izgaranjem, iako se svake godine primjetno može vidjeti napredak električnih letjelica.

Poboljšanjem tehnologije i pristupom literaturi, ali i stvarnim primjerima, moguće je uz osigurane uvjete i potreban alat proizvesti mlazni motor vlastitog dizajna i principa rada.

Tema ovog rada je koncept i proizvodnja mlaznog motora sa elektropogonom MPM20 sa naknadnim izgaranjem te plinom kao gorivom, namjenjen za ugradnju na modele zrakoplova. Svi elementi i sustavi dizajnirani su proizvoljno uz određene preinake u odnosu na prototipove koji su kasnije prikazani na slikama. Princip rada motora temelji se na dobivanju potiska pomoću elektroventilatorskog motora bez četkica pogonjenog baterijom, te dodatnog potiska aktiviranjem naknadnog izgaranja. Sličan primjer motora, samo bez naknadnog izgaranja, može se vidjeti na zrakoplovu Airbus E-Fan koji je pogonjen sa dva elektroventilatorska motora napajana litij-ion baterijama.

Završni rad je strukturiran u 7 poglavlja. Nakon uvoda, u drugom poglavlju opisana je ideja i konstrukcijsko rješenje motora. U trećem poglavlju su navedeni njegovi glavni dijelovi. U četvrtom je poglavlju objašnjen princip stvaranja potiska uz naknadno izgaranje. U petom poglavlju prikazani su proračuni brzina i jačine potiska. Mogućnost primjene motora MPM20 na modelima zrakoplova prikazana je u poglavlju broj 6. Zaključna razmišljanja vezana uz temu nalazi se u sedmom poglavlju.

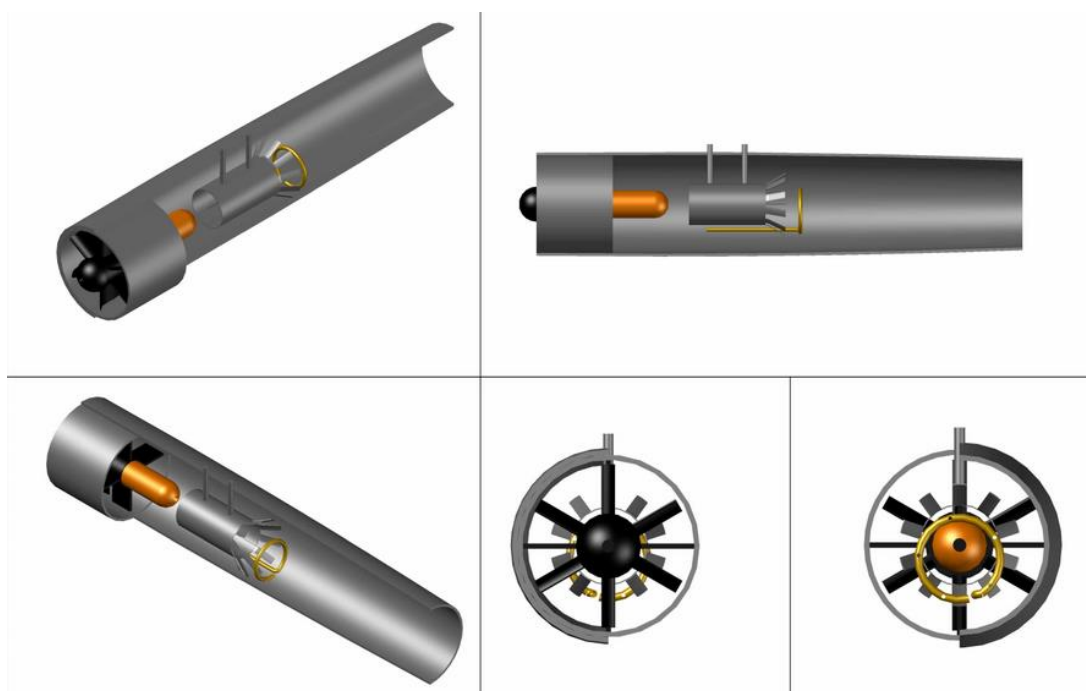


## 2. IDEJNO I KONSTRUKCIJSKO RIJEŠENJE MOTORA MPM20

"Duct fan" motori su sustavi za stvaranje potiska koji se sastoje od ventilatora postavljenog unutar kanala okruglog presjeka. Taj kanal smanjuje gubitak potiska na vrhovima lopatica. Lopatice su kratke i u većini slučajeva ih ima više, pa sukladno tome mogu raditi na većoj brzini vrtnje. EDF je kratica za *Electric Ducted Fan*, tj. električnu verziju "duct" motora koji za pogon koristi električni izvor energije.

Motor MPM20 (slika 1) je osmišljen kao pogonski sustav modela zrakoplova i bespilotnih letjelica na daljinsko upravljanje. Ovaj model se nalazi unutar oklopa napravljenog od lima debljine 0,7 mm, ali za potrebe ugradnje u modele zrakoplova proizveo bi se od kompozitnih materijala kako bi se smanjila nepotrebna masa. Vanjski promjer na ulazu u motor iznosi 8,0 cm, a unutarnji promjer između vrhova dvije suprotne lopatice ventilatora iznosi 7,0 cm.

Tuba i ispuh imaju konusni oblik, tj. blago se sužavaju prema ispuhu, a sam ispuh ima promjer 6,2 cm.



Slika 1. 3D AutoCAD projekcija motora MPM20

Na ulazu u motor pričvršćen je elektroventilatorski motor bez četkica. Motor dobiva napajanje strujom od baterije napona 14,8 V na koju je spojen servo tester sa potenciometrom i ESC (*Electronic Speed Regulator*)- elektronički kontroler brzine. S unutarnje strane motora, nakon ventilatora, ugrađen je držač plamena koji pomaže pri održavanju plamena naknadnog izgaranja. Kroz rupu na trupu provučen je dovod goriva i sustav za zapaljenje smjese. Zapaljenje smjese se osigurava pomoću Marxovog udarnog generatora. Sustav za dovod goriva sastoji se od servo uređaja čijim se aktiviranjem pomiče poluga koja zatim ostvaruje kontakt sa spremnikom plina, te ju pomiče naprijed i omogućava njegovo istjecanje. Dovod goriva odvija se cijevovodom koji se sastoji od gumene cijevi promjera 4,0 mm do oklopa motora, a na nju se dalje nastavlja cijev od mesinga promjera 3,0 mm. Ona se zatim provlači uz držač plamena i na udaljenosti 3,0 cm nizstrujno od njega savija u obliku prstena promjera 3,5 cm.

Cijelokupni motor se nalazi na četiri metalne noge postavljene na kuglične ležajeve, osigurane sa svake strane kako bi se spriječilo izlijetanje uslijed dodavanja potiska ili aktiviranja naknadnog izgaranja, ali se osigurava slobodan hod kako bi se mogao izmjeriti potisak. Na prednji rub postavljene su tri metalne šipke u obliku slova V, tako da kada se motor pokrene te šipke dođu u kontakt sa L- polugom postavljenom ispred konstrukcije (slika 2). Prilikom kontakta motora i L- poluge, ista se pomiče i ostvaruje pritisak na vagu, te se dobije direktno očitavanje potiska.



Slika 2. Konstrukcija nosača motora

Prednosti ovakve vrste motora:

- kompaktan je i zaštićen, stoga ga se može ugraditi unutar trupa, ali i sa vanjske strane
- tiši su nego modeli sa propelerima
- usmjeravaju cijeli potisak prema natrag pa je puno efikasniji, manji EDF može stvoriti jednak potisak kao i puno veći propeler
- omogućuje veće brzine zbog toga što se sav zrak usmjerava kroz cijev unutar koje se nalazi motor
- zbog toga što je električnog pogona nema potrebu za: spremnicima za gorivo, cijevi za ispuh i sustava za zapaljenje smjese ukoliko nema naknadnog izgaranja, sustav za startanje motora, pa je zbog toga lakše konstruirati takav motor te upravljati njime
- postoji mogućnost vektoriranja potiska usmjeravanjem struje zraka ispuha koja bi pomogla pojedinim zrakoplovima izvršiti određene manevre, znači ispuh ne mora biti samo paralelan sa smjerom leta
- jednostavnija izrada višemotornih modela

Unatoč brojnim prednostima, također ima i mane kao što su manja efikasnost pri ubrzavanju i usporavanju, zahtjeva veliki *RPM* i male vibracije, a razmak između kanala i lopatica trebao bi biti minimalan. [1]

### 3. GLAVNI DIJELOVI MOTORA

Cijelokupni motor (slika 3) može se podijeliti u nekoliko cjelina. Prvu cjelinu predstavlja pogonski dio, odnosno elektroventilator koji stvara osnovni potisak. Drugu cjelinu čini sustav za pokretanje i napajanje strujom koji se sastoji od LiPO baterije, servo testera sa potenciometrom za dodavanje broja okretaja te ESC- om koji povećava struju iz baterije i osigurava motoru dovoljno jaku struju da se pogoni pomoću nje. Treća cjelina se sastoji od sustava za dovod goriva za naknadno izgaranje. Boca sa plinom kao gorivom osigurana je perforiranom trakom i nalazi se na drvenom stalku. Na dnu boce nalazi se servo uređaj koji osigurava pomak motora i istjecanje plina kroz prvo gumeni, a zatim cijevovod od mesinga čiji je kraj oblikovan u obliku prstena sa probušenim rupama za istjecanje plina. Četvrta cjelina je sustav za zapaljenje smjese koji se sastoji od Marxovog udarnog generatora koji je sastavljen od dioda, otpornika i kondenzatora, te baterija kao izvora struje.



Slika 3. Prikaz motora sa sustavima

### 3.1. POGONSKI DIO

Potisak stvara elektroventilatorski motor bez četkica sa 6 lopatica (slika 4). Vanjski promjer mu iznosi 73 mm i dugačak je 58 mm, dok vrhovi lopatica opisuju kružnicu promjera 70 mm. Masa motora iznosi 98 g, a ventilatora 44 g. Maksimalni potisak samog ventilatora iznosi 1250 g. Brzina vrtnje iznosi 3000 *RPM/V*, što znači da sa baterijom od 14,8 V ima maksimalnu brzinu okretanja od 44400 *RPM*- a, a željeni brzina vrtnje postavlja se pomoću potenciometra.



Slika 4. Elektroventilatorski motor sa 6 lopatica

Izvor: <http://www.ebay.com/itm/261510906713>

Kontinuirana struja pražnjenja iznosi 30 A, a preporučeno je da ESC može davati struju jačine od 50 do 80 A. Ulazni napon treba biti od 8 do 18 V, a unutarnji otpor iznosi 128 Ohma.

EDF je principom rada sličan standardnom mlaznom motoru samo po pitanju kompresora, odnosno on je "neefikasniji" kompresor. Zbog toga se ne može koristiti u širokom području rada, već za male ili lagane zrakoplove sa manjim baterijama, ali potencijalno jakim motorima, te višemotorne zrakoplove koji mogu dijeliti baterije.

### 3.2. SUSTAV ZA POKRETANJE I NAPAJANJE STRUJOM

Izvor struje za elektroventilator je litij- polimer baterija kapaciteta 3000 mAh i 35C (slika 5), dakle maksimalnog opterećenja kontinuiranog pražnjenja pri kojem neće doći do oštećenja baterije od 105 A. Sadrži 4 ćelije i daje napon od 14,8 V, a masa joj iznosi 344 g.



Slika 5. Litij- polimer baterija

Izvor: [www.aliexpress.com](http://www.aliexpress.com)

ESC (slika 6.) regulira rad motora, povećava struju baterije sa 3 A na mogućih 80 A (iako motor ne bi trebao zahtijevati struju veću od 35 A), te pretvara tu struju u trofaznu izmjeničnu. [2]



### 3.3. SUSTAV ZA DOVOD GORIVA ZA NAKNADNO IZGARANJE

Za razliku od klasičnih sustava za dovod goriva, ovaj sustav nema nikakvu pumpu, nego tu ulogu odrađuje servo uređaj. Plin se dovodi direktno iz spremnika komprimiranog plina pa ne zahtjeva pročistač goriva, jer ne postoji mogućnost da se u njemu nalaze nečistoće. Također, cjevovod mora biti dovoljne dužine da se plin prebaci iz tekućeg u plinovito stanje i poveća svoju temperaturu kako bi se kasnije lakše zapalio u doticaju sa iskrom.

Servo uređaj (slika 8) zakretnog momenta 12 kg/cm, čije se dimenzije nalaze u tablici 1 potkrijepljene slikom 9, spojen je na mikroprekidač koji ga aktivira i upušta u rad.



Slika 8. Servo uređaj

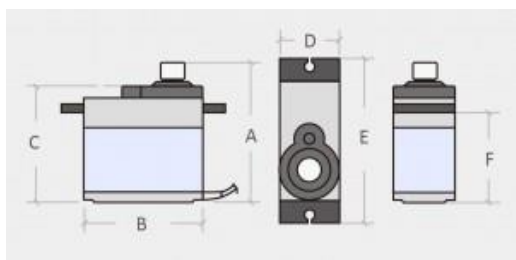
Izvor: [http://www.dhresource.com/albu\\_735019320\\_00-1.0x0/tower-pro-mg945-metal-gear-digital-servo.jpg](http://www.dhresource.com/albu_735019320_00-1.0x0/tower-pro-mg945-metal-gear-digital-servo.jpg)



Ručica serva se zakreće, stvara pritisak na bocu sa plinom, koja se nalazi učvršćena na drvenom stalku, i na taj način omogućiti istjecanje plina iz boce dalje u cjevovod.

Tablica 1. Dimenzije servo uređaja

Izvor: <http://www.towerpro.com.tw/product/mg945/>



Slika 9. Prikaz servo uređaja

Izvor: <http://www.towerpro.com.tw/product/mg945/>

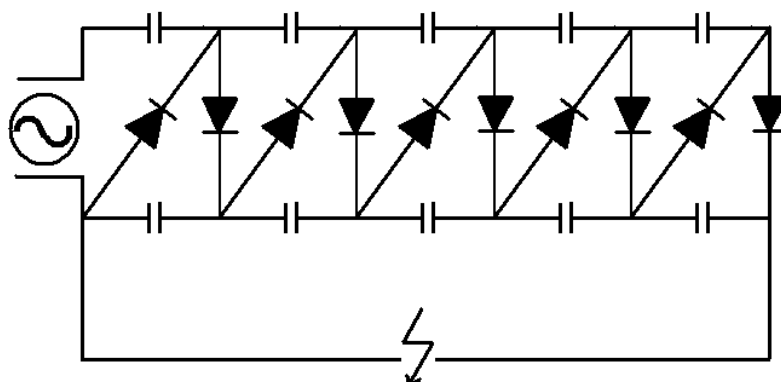
Težina (g)	55
Brzina (sec/st)	0.23
A (mm)	42.7
B (mm)	40.9
C (mm)	37
D (mm)	20
E (mm)	54
F (mm)	26.8

Plin koji se koristi kao gorivo za naknadno izgaranje je ukapljeni naftni plin (UNP). On je mješavina ukapljenih ugljikovodika, a dobiva se izdvajanjem smjese propana i butana iz nafte ili plinskog kondenzata. Pri normalnim uvjetima UNP je plinovit i teži od zraka, a ukapljuje se pri nižim tlakovima (1,7- 7,5 bar). Pojavljuje se u 2 stanja pri čemu je za prelazak iz jednog u drugo stanje potrebna izmjena topline. UNP je neotrovan, bez boje i mirisa, pa mu se prije uporabe dodaje odorant, radi lakšeg otkrivanja propuštanja. Ima uske, ali niske granice eksplozivnosti, a budući da je teži od zraka, vrlo lako stvara eksplozivnu smjesu sa zrakom. [3] Smjesa propan-butan preporučena je za korištenje u hladnijim uvjetima tijekom zimskog vremena, dok bi butan bio prikladan za korištenje tijekom ljetnih temperatura. U ovom primjeru koristi se smjesa propan- butan koja se nalazi u boci zapremnine 90 ml. Od spremnika goriva do oklopa motora plin se dovodi gumenom cijevčicom promjera 4,0 mm, a zbog sigurnosnih razloga (potencijalnog rastapanja gume) daljnji dovod goriva obavlja se putem cijevi od mesinga promjera 3,0 mm. Kao što je i prije navedeno, cjevovod mora biti dovoljne dužine kako bi se osigurala promjena agregatnog stanja iz tekućeg u plinovito, ali i malo povećala temperatura plina kako bi se olakšalo zapaljenje. U idealnim uvjetima mogao bi se ugraditi i nekakav grijač kraj kojega bi prolazio dovod plina, ali to bi povećalo masu motora što je nepoželjno pri izradi modela zrakoplova. Cijev unutar motora prolazi ispod držača plamena, a na udaljenosti od 1,5 cm od njega postavljena je vertikalno u obliku prstena promjera 3,5

cm sa probušenim rupama na razmaku od 2,0 cm kako bi omogućila istjecanje plina i njegovo miješanje sa zrakom, te kasnije zapaljenje.

### 3.4. SUSTAV ZA ZAPALJENJE GORIVA

Sustav za zapaljenje koristi Marxov udarni generator (slika 10). Sastoji se od 2 AA baterije od kojih svaka ima 1,5 V, koje su spojene na čip iz električnog reketa. Sa njega su uklonjeni kondenzator i transformator kako bi se smanjio nepotreban otpor, jer za stvaranje jače iskre potreban je čim manji otpor sustava. Njegova svha je stvoriti impuls velike voltaže dobiven iz slabog DC izvora. To je strujni krug koji se sastoji od dioda, kondenzatora i otpornika spojenih na bateriju, te razmaka između žica kako bi iskra mogla nesmetano preskakati. U ovom slučaju otpornici služe kako bi se usporio naboj i pražnjenje kondenzatora, kondenzatori kao spremnici struje/energije, a razmaci između žica kao prijenosnici iskra. Također je bitno ostvariti dovoljan razmak između žica, jer preveliki, ali i premali razmak može biti nepovoljan za iskru i na taj način je izgubiti. Princip rada je vrlo jednostavan, prvo se kondenzatori napune strujom paralelno kroz otpornike, a zatim se prazne serijski kroz razmake. Kada prvi kondenzator dosegne kritičnu voltažu, prva iskra će se zapaliti te serijski spojit prvi i drugi kondenzator. [4] U ovom slučaju ne koriste se otpornici nego samo spojevi kondenzatora i dioda.



Slika 10. Shema Marxovog udarnog generatora

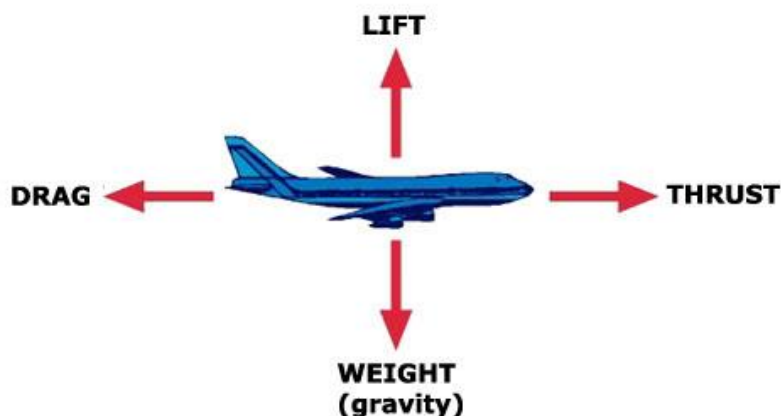
Bitna komponenta ovog sustava je držač plamena (slika 11). On nizstrujno stvara vrtlog manje brzine i obrnutog smjera od strujanja zraka unutar motora. [5] Na taj način stvara se bolje miješanje zraka i plina i osigurava kontinuirano gorenje, ali i fizički sprječava dolazak brze struje zraka na iskru i tako onemogućuje njeno hlađenje. Također je važno za napomenuti kako je aktiviranje naknadnog izgaranja dozvoljeno tek nakon što elektroventilatorski motor postigne najveći mogući broj okretaja kako bi se spriječilo moguće zapaljenje komponenti unutar motora. Nakon što se gorivo zapali prekida se dovod struje za stvaranje iskre kako bi sustavu osigurali dulji vijek trajanja.



Slika 11. Držač plamena

#### 4. PRINCIP STVARANJA POTISKA UZ NAKNADNO IZGARANJE

Potisna sila za pogon zrakoplova  $F_T$  ili potisak (slika 12) se stvara kao rezultat promjene količine kretanja radne tvari koja prolazi kroz motor: na ulazu u motor mala brzina strujanja, a na izlazu povećana brzina strujanja. Ta promjena količine gibanja je proizvedena na račun oslobođene energije izgaranja goriva, odnosno u ovom slučaju oslobođene energije elektroventilatorskog motora. Povećanje potiska mlaznog motora može se povećati naknadnim izgaranjem. [6] Maseni protok je se mijenja kroz kroz EDF zbog različitog omjera usisa i ispuha. Dovođenjem topline iza lopatica gustoća zraka se smanjuje. Sa smanjenom gustoćom treba se povećati brzina zraka kako bi maseni protok ostao isti, a sa povećanjem brzine ispuha želja je ostvariti veći potisak.



Slika 12. Podjela sila na avionu

Izvor: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/F/forces\\_of\\_flight.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/F/forces_of_flight.html)

Osnovni potisak dobiva se pokretanjem elektroventilatorskog motora preko baterije. Dodavanjem broja okretaja na servo testeru putem potenciometra javlja se signal u ESC- u koji zatim tu struju pojačava do potrebne za željeno napajanje motora, ali je i invertira u trofaznu izmjeničnu. Kada se postigne maksimalna brzina vrtnje od 44400 okretaja po minuti, može se aktivirati naknadno izgaranje. Prvo se

aktivira sustav za zapaljenje na način opisan u prethodnom poglavlju: prekidačem se pusti struja kroz Marxov udarni generator. Kada se iskre pojave, aktivira se sustav za dovod goriva. Dozirano gorivo se zapali i omogućí dodatni potisak motoru.

Bitno je paziti da su svi sustavi i dijelovi pravilno postavljeni, naročito držač plamena, koji se u jednom od prototipova ovog motora otpustio na jednom kraju, preusmjerio plamen na stjenke oklopa i na taj način stvorio štetu na istom.

Već prilikom aktiviranja samog elektroventilatora javlja se potisak od 1250 grama i pomiče cijeli motor naprijed, a naknadnim izgaranjem dobije se 10-15% dodatnog potiska, odnosno 175- 190 grama.

Kako bi motor prikazao čim točnija očitavanja, postavljen je na kuglične ležajeve što bitrebalo spriječiti mogućnost zapinjanja motora prilikom dodavanja potiska. V-konstrukcija postavljena na prednji dio motora prilikom dodavanja snage ostvaruje kontakt sa L- polugom. Dio te poluge nalazi se iznad vage, pa se pomakom motora pomiče i poluga te radi pritisak na nju, prilikom čega možemo dobiti direktno očitavanje ostvarenog potiska (vidjeti sliku nosača na strani 4).

## 5. MJERENJE BRZINA I PRORAČUN POTISKA

Prilikom prikaza izračuna važno je naglasiti kako se ovdje radi o mjerenju neinstaliranog potiska. Podaci o potisku mlaznih motora obično se daju na temelju mjerenja na ispitnom stolu. Određeni tip motora ugrađuje se na više vrsta zrakoplova, koji se značajno razlikuju po mjestu i uvjetima smještaja motora. To znači da će isti tip motora imati različite uvodnike, ispušne cijevi i mlaznike. Također u ovisnosti od vrste zrakoplova ovisiti će i količina snage koja se odvodi od motora za pogon pomoćnih uređaja u zrakoplovu. Zbog toga se razlikuje tzv. neinstalirani potisak dobiven na osnovu mjerenja na ispitnom stolu i instalirani potisak umanjen za gubitke pri postavljanju na zrakoplov. [6] Za mjerenje se potiska motora MPM20 koristila se kuhinjska vaga (slika 13).



Slika 13. Kuhinjska vaga

Izvor: <http://www.volimsvojd.com.rs/kuhinjske-vage>

## 5.1. UTJECAJ BRZINE I VISINE LETA NA POTISAK

Preliminarna analiza utjecaja brzine i visine leta može se započeti uz pomoć izraza za potisak:

$$F_T = \dot{m}_a(v_j - v)$$

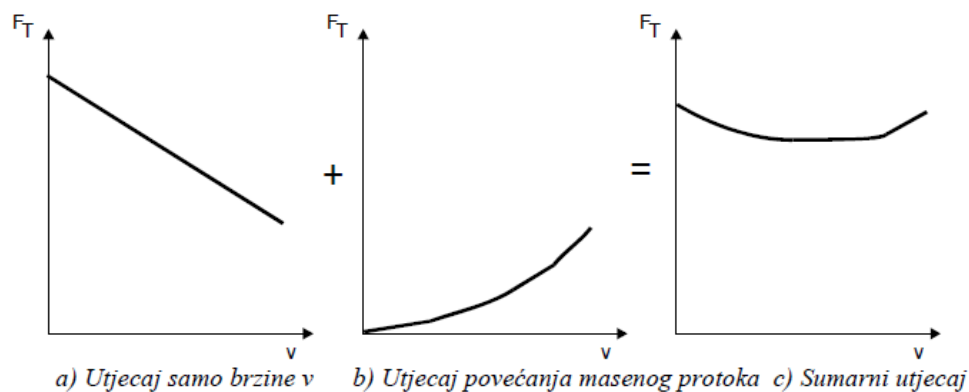
gdje je:  $F_T$  – sila potiska  
 $\dot{m}_a$  – maseni protok  
 $v_j$  – brzina ispušnih plinova na ispuhu  
 $v$  – brzina zraka na usisu

Maseni protok zraka kroz uvodnik motora jednak je umnošku gustoće zraka  $\rho_a$ , površine poprečnog presjeka uvodnika  $A_{inlet}$  i brzine strujanja zraka  $v$  na ulazu u uvodnik:

$$\dot{m}_a = A_{inlet} \cdot \rho_a \cdot v$$

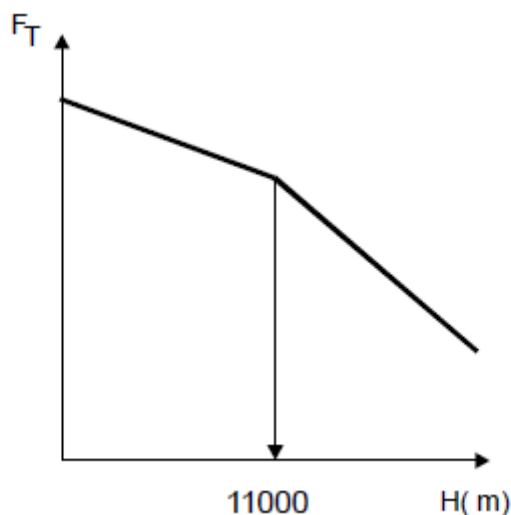
gdje je:  $\rho_a$  - gustoća zraka od 1,225 kg/m<sup>3</sup> na ISA/SL

Povećanjem brzine zrakoplova  $v$ , prema prethodnom izrazu, potisak pada. No, ako se povećava brzina, dolazi i do povećanja masenog protoka i brzine ispušnih plinova. Kombinacija ovih efekata ima za posljedicu da potisak na početku nešto opada, a nakon toga ponovno raste (slika14). [6]



Slika 14. Utjecaj brzine leta na potisak

Povećanjem visine leta (slika 15) pada potisak približno srazmjerno padu gustoće zraka. [6]



Slika 15. Utjecaj visine leta na potisak

Važno je napomenuti da je utjecaj visine na potisak drugačiji kod EDF motora u odnosu na tipične mlazne motore jer zrakoplovni modeli, za razliku od putničkih i vojnih aviona, najčešće se koriste na manjim visinama.

## 5.2. MJERENJE POTISKA, VOLUMNOG I MASENOG PROTOKA

Prema listi specifikacija EDF- a korištenog u ovom radu maksimalan raspoloživ potisak iznosi 1250 g, odnosno 1,25 kg. [7] Kako bi se sila potiska mogla izraziti u N, potrebno je veličinu u gramima pomnožiti sa gravitacijskom konstantom  $g$  koja iznosi  $9,81 \text{ m/s}^2$ , što je prikazano u sljedećem izrazu:

$$F_T = m \cdot g$$



Uvrštavanjem tih vrijednosti u jednadžbu dobije se podatak da sila potiska iznosi:

$$F_T = 1,25 \cdot 9,81 = 12.26 \text{ N}$$

Brzina vrtnje motora ovisi izričito o snazi baterije i tipu oznake motora (broju okretaja koji se dobije po jednom V). S obzirom da se podatak o brzini ne može izračunati bez određenih parametara, Na temelju podataka sa foruma i web stranica na kojima iskustva razmjenjuju proizvođači ovakvih motora, preuzet je podatak o prosječnoj brzini motora od 3000 RPM/V sa baterijom od 14,8 V koja iznosi  $\approx 30$  m/s. [8] Ako se tako pretpostavi, može se jednostavno izračunati volumni i maseni protok kroz motor.

Mjerenje volumnog protoka dobije se uz pomoć površine presjeka usisa i ispuha, te brzine koja se pritom ostvaruje:

$$\dot{V} = A \cdot v$$

gdje je:  $A_{inlet}$  – površina presjeka  
 $v$  – brzina na tom dijelu presjeka izražena u metrima po sekundi [m/s]

Površina presjeka A jednaka je umnošku polumjera presjeka na kvadrat, izražena u metrima kvadratnim [m<sup>2</sup>]:

$$A = r^2 \cdot \pi = 0,035^2 \cdot \pi = 0,0385 \text{ m}^2$$

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u formule dobijemo volumni protok od 1,155 metara kubičnih [m<sup>3</sup>/s]:

$$\dot{V} = 0,0385 \cdot 30 = 1,155 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nadalje, na temelju volumnog protoka, može se izračunati i maseni protok kroz motor. Maseni protok jednak je umnošku volumnog protoka i gustoće zraka:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

Kako su za izračune korišteni standardni *ISA* podatci, za gustoću zraka korišten je podatak od  $\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3$ . Daljnjim uvrštavanjem dobiva se maseni protok koji iznosi:

$$\dot{m} = 1,155 \cdot 1,225 = 1,415 \text{ kg/s}$$

Prema objavljenom članku inženjera Klause Scharnhorsta [9], može se približno provjeriti podatak o potisku, ako su poznati podaci o snazi koju proizvodi motor i promjeru ispušne cijevi. Podatak o snazi može se dobiti iz izraza:

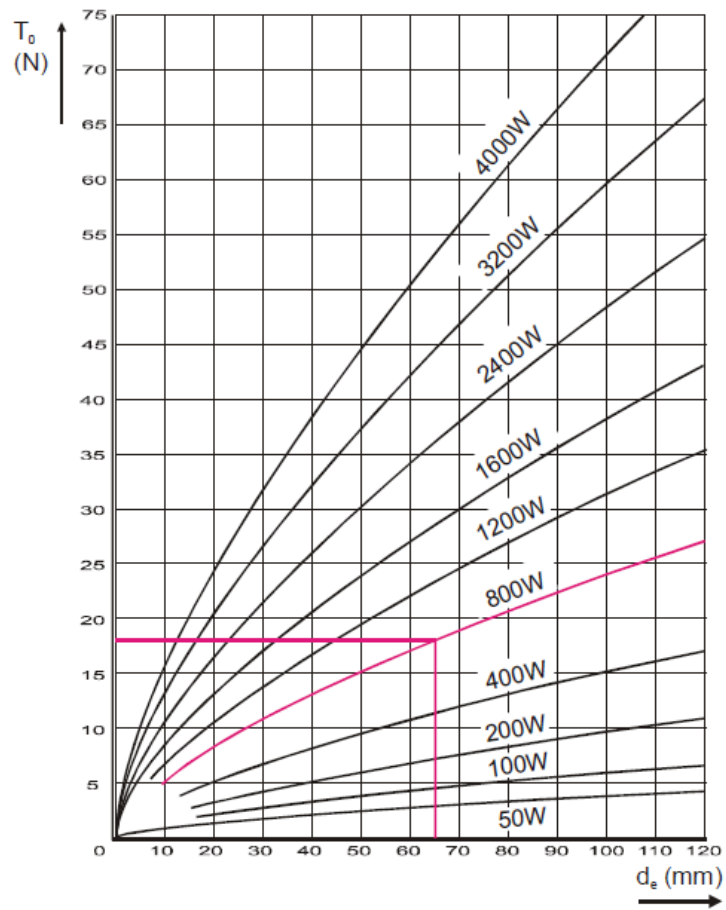
$$P = U \cdot I$$

gdje je:  $U$  – napon u V  
 $I$  – jakost struje u A

Napon iznosi 14,8 V, a struja kontinuiranog pražnjenja iznosi 30 A. Uvrštavanjem u formulu dobijemo snagu  $P$  koja iznosi:

$$P = 14,8 \cdot 30 = 444 \text{ W}$$

Ako se u grafu [9] koristi podatak o promjeru ispuha od 62 mm, vertikalna linija se povlači do snage od 444 W. Sada se povlači linija lijevo prema podatku o potisku, pa se može očitati da je potisak  $\approx 13 \text{ N}$  (slika 16). Ovaj potisak odgovara maksimalnom potisku iz specifikacija motora. [7]



Slika 16. Graf za određivanje potiska [9]

## 6. MOGUĆNOST PRIMJENE MOTORA MPM20 NA MODELIMA ZRAKOPLOVA

Svrha izrade ovog modela motora bila je izraditi funkcionalan motor koji se lako može ugraditi na modele zrakoplova, sa jednostavnim sustavima i lako zamjenjivim dijelovima koji nemaju preveliku masu. Uz osnovno znanje ovakva vrsta motora se može vrlo lako ugraditi na željene modele zrakoplova. Postoji mnogo primjera sa raznim promjerima motora, a samim time i brzinama i veličinama samih modela, od kojih će neki biti navedeni u nastavku.

Svaki model može biti sastavljen po volji osobe koja ga proizvodi. Najpoznatiji projekt je Durafly De Havilland DH.100 (slika 17), prvi EDF motor sa ugrađenim naknadnim izgaranjem. Motor je promjera 70 mm, a za zapaljenje koristi iskrnu dobivenu elektrošokerom, ali bez kotača jer je umjesto njih postavljena boca sa plinom.



Slika 17. Durafly De Havilland DH.100

Također, ovakav tip motora ugrađen je na prototip modela Lynx (slika 18), osmišljen i sastavljen od kolege studenta sa Fakulteta prometnih znanosti, smjer Aeronautika. Izrađena je od kompozita epoksi smole i stakloplastičnog pletiva. Masa letjelice je 3 kg sa svim sustavima i motorom, a masa prazne letjelice je 1 kg. Raspon krila je 145 cm, a duljina trupa 108 cm. Maksimalna brzina izračunata iznosi 24 m/s. Ima krila sa strijelom prema naprijed, canard i V- rep što povećava njegovu stabilnost. Dolet mu je testiran i ograničen snagom radio stanice za upravljanje, a prilikom testiranja jačina stanice omogućila mu je dolet od 500 m.



Slika 18. Prototip modela Lynx  
Autorski rad studenta Davida Ribića

## 7. ZAKLJUČAK

Uz određeno vrijeme i trud moguće je stvarati nove vrste motora i nove sustave, a EDF motori omogućuju upravo to. Za razliku od motora sa propelerom, zaštićeni su pa ih udarci ne mogu oštetiti, a može ih se prilagođavati i koristiti na razne načine, od usmjeravanja struje ispuha za razne manevre, sve do ugradnje na modele za snimanje terena. EDF je još uvijek relativno neistražena tehnologija, pa je realne proračune teško izvesti. U početku su postojale sumnje o ugradnji naknadnog izgaranja u tubu EDF motora zbog straha od topljenja dijelova i uništavanja strujnih krugova povezanih na modelima, ali pažljivom ugradnjom i zaštitom pojedinih dijelova naknadno izgaranje se može koristiti bez straha. Najveći problem je osigurati zapaljenje ubrizganog plina jer elektromotor postiže veliki broj okretaja i na taj način hladi bilo kakve izvore iskre i usijane žice. Motor za ispitni stol proizveden je amaterski, pa postoje minimalna odstupanja od proračuna zbog određenih neplaniranih deformacija tokom izrade. Također, uz korištenje lakših materijala kao što je kompozit obložen tankim slojem aluminija motor bi imao manju masu, a samim time bi bio pokretljiviji i ostvarivao veći potisak.

## LITERATURA

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ducted\\_fan](https://en.wikipedia.org/wiki/Ducted_fan), 21.04.2016.
- [2] Mystery Brushless Electronic Speed controller (ESC),  
<http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uploads/376627436X63807X15.pdf>  
07.08.2015.
- [3] STRELEC, V.: Plinarski priručnik. 6. dopunjeno i izmjenjeno izdanje. Zagreb, Energetika marketinga, 2014.
- [4] Redondo, L. M.; Silva, J. F.; Tavares, F.; Margato, E.: Solid-state Marx generator design with an energy recovery reset circuit for output transformer association, 2001.
- [5] U.S. Department of transportation, Federal Aviation Administration: Aviation Maintenance Technician Handbook- Powerplant, Volume I, 2012.
- [6] Bazijanac, E.: Zrakoplovni mlazni motori I. dio, Autorizirani nastavni materijali, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
- [7] <http://www.ebay.com/itm/261510906713>, 31.05.2016.
- [8] <http://www.modelflying.co.uk/forums/postings.asp?th=56241&p=1>, 10.10.2011.
- [9] Scharnhorst, K.: Ducted Fan Basic, 17.11.2007.

## **POPIS KRATICA**

EDF	Electric Ducted fan
ESC	Electric Speed Controller
LiPo	Litij- Polimer baterija
RPM	Rotations per minute/Okretaji po minuti
RPM/V	Rotations per minute per 1 Volt/Okretaji po minuti po Voltu
UNP	Ukapljeni naftni plin

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Dimenzije servo uređaja



## POPIS SLIKA

- Slika 1. 3D AutoCAD projekcija motora MPM20
- Slika 2. Konstrukcija nosača motora
- Slika 3. Prikaz motora sa sustavima
- Slika 4. Elektroventilatorski motor sa 6 lopatica
- Slika 5. Litij- polimer baterija
- Slika 6. ESC- Electronic Speed Regulator
- Slika 7. Servo tester
- Slika 8. Servo uređaj
- Slika9. Prikaz servo uređaja
- Slika 10. Shema Marxovog udarnog generatora
- Slika 11. Držać plamena
- Slika 12. Podjela sila na avionu
- Slika 13. Kuhinjska vaga
- Slika 14. Utjecaj brzine leta na potisak
- Slika 15. Utjecaj visine leta na potisak
- Slika 16. Graf za određivanje potiska
- Slika 17. Durafly De Havilland DH.100
- Slika 18. Prototip modela Lynx

## METAPODACI

**Naslov rada:** Proračun i izrada modela mlaznog motora s elektropogonom

**Student:** Krešimir Dukić, JMBAG 0135223698

**Mentor:** Doc. dr. sc. Anita Domitrović

**Naslov na drugom jeziku (engleski):** Calculation and Design of Electrically Powered Jet Engine Model

**Povjerenstvo za obranu:**

- Prof. dr. sc. Ernest Bazijanac, predsjednik
- Doc. dr. sc. Anita Domitrović, mentor
- Dr. sc. Karolina Krajiček Nikolić, član
- Prof. dr. sc. Tino Bucak, zamjena

**Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj:** Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

**Zavod:** Zavod za aeronautiku

**Vrsta studija:** Preddiplomski

**Studij:** Aeronautika

**Datum obrane završnog rada:** 13. rujna 2016.

**Napomena:** pod datum obrane završnog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni 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 \_\_\_\_\_

pod naslovom **Proračun i izrada modela mlaznog motora s elektropogonom**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 6.9.2016

Kresimir Dubić  
(potpis)