Koncept bespilotne letjelice privezane modularnom vezom za tlo

Tukarić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:726388

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Tukarić

Zagreb, 2020. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Josip Stepanić, dipl. ing.

Student:

Ivan Tukarić

Zagreb, 2020. godina.

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

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Josipu Stepaniću, za nesebično vodstvo i strpljenje tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i svojoj majci Dijani i ocu Marinku, kao i bratu Igoru, na beskrajnoj podršci koju su mi pružili tijekom studiranja.

Također se zahvaljujem svojim kolegama s Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a osobito gospodinu Leonu Korenu, na savjetima pri izradi ovog rada kao i prijateljstvu koje smo dijelili tijekom studiranja.

Naposljetku, posebna zahvala mojoj djevojci Luciji, na beskonačnom strpljenju i podršci bez koje bi ovaj rad izgledao značajno drukčije.

Ivan Tukarić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN TUKARIĆ** Mat. br.: 0035195485

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KONCEPT BESPILOTNE LETJELICE PRIVEZANE MODULARNOM VEZOM ZA TLO**

Naslov rada na engleskom jeziku: **A CONCEPT OF MODULARLY TETHERED UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Opis zadatka:

Primjena bespilotnih letjelica kao stacionarnih primopredajnika za dugotrajnije neprekidno korištenje predstavlja njihovu potencijalno značajnu primjenu.

U prvom dijelu rada potrebno je opisati postojeća rješenja u kojima se različite vrste bespilotnih letjelica, prvenstveno privezanih za tlo, koriste kao stacionarni primopredajnici za dugotrajni rad. Pritom njihova veza osigurava napajanje električnom energijom, prijenos podataka između zemaljske stanice i bespilotne letjelice te mehaničku lokalizaciju. Potrebno je izdvojiti njihove radne značajke i kriterije koji ih opisuju. Postojeće izvedbe treba međusobno usporediti po izdvojenim kriterijima.

Drugi dio rada treba sadržavati obrazloženi koncept primjene bespilotnih letjelica za stacionarnu primopredaju informacija, s maksimiziranom visinom koju pritom mogu postići i održavati. Vezu letjelice i tla treba prikazati kao modularni, lako sastavljivi i rastavljivi kabel.

Preliminarna razrada uvedenog koncepta treba predstavljati treći dio rada.

U radu je potrebno navesti upotrijebljenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
14. studenoga 2019.	16. siječnja 2020.	20. – 24.1.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Josip Stepanić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
1.1. Opis diplomskog zadatka 1
2. Idejno projektiranje sustava 3
2.1. Zemaljska jedinica 4
2.1.1. Fotonaponske ćelije 4
2.1.2. Elektrokemijski izvori 5
2.1.3. Generatori 8
2.2. Električni vod 9
2.2.1. Električni vod 9
2.2.2. Segmenti električnog voda 12
2.3. Multi-rotorska letjelica 13
3. Preliminarno projektiranje 15
3.1. Komponente sustava 16
3.1.1. Bespilotna letjelica 16
3.1.2. Električni vod 17
3.1.3. Motori 20
3.1.4. Referentni primjer 21
3.2. Formiranje jednadžbe segmenta 24
3.3. Formulacija MATLAB koda 27
3.4. Rezultati preliminarnog projektiranja 29
4. Detaljno projektiranje 34
4.1.1. Primjer ciljanog sustava 34
5. ZAKLJUČAK 36
LITERATURA 37
PRILOG: TEHNIČKA DOKUMENTACIJA 39

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Osnovni elementi sustava 3
Slika 2.2. Fotovoltaička ćelija [3] 4
Slika 2.3. Olovni akumulator [4] 5
Slika 2.4. Gorivni članak [5] 5
Slika 2.5. Nikal-metal-hidrid (Ni-MH) baterija [6] 6
Slika 2.6. Litij-polimer (Li-Po) baterija [7] 6
Slika 2.7. Vodič od pune bakrene žice [9] 9
Slika 2.8. Vodič u obliku užeta spletenog od tankih vodiča [10] 9
Slika 2.9. Višežilni električni vod [11] 10
Slika 2.10. Odnos maksimalne trajne struje i AWG broja [13] 11
Slika 2.11. Spoj baterije, upravljačke pločice, ESC uređaja i motora [14] 13
Slika 2.12. Baterija s oznakom 3S [16] 14
Slika 3.1. Bespilotne multi-rotorske letjelice; (lijevo) quadcopter Parrot Ar Drone 2.0 [17], (desno) hexacopter MJX X800 [18] 16
Slika 3.2. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod SiHF 18
Slika 3.3. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod (N)HXH-J/E90 18
Slika 3.4. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod FTG10OM1 19
Slika 3.5. Dijagram ovisnosti mase elektromotora o maksimalnoj električnoj snazi elektromotora 20
Slika 3.6. Rezultati struje za električni vod SiHF, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj U=12 V i n=1 29
Slika 3.7. Rezultati struje za električni vod NHXH, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj U=12 V i n=1 29
Slika 3.8. Rezultati struje za električni vod FTG10M1, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj U=12 V i n=1 30
Slika 3.9. Struja I_5, za vod SiHF, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je U= 12 V i n= 1, 2 ili 3; 30
Slika 3.10. Struja I_5, za vod NHXH, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je U= 12 V i n= 1, 2 ili 3; 31
Slika 3.11. Struja I_5, za vod FTG10OM1, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je U= 12 V i n= 1, 2 ili 3; 31
Slika 3.12. Snaga P_{uk} za el. vod SiHF u odnosu na L_S, za U=12 V i različite n 32
Slika 3.13. Snaga P_{uk} za el. vod NHXH u odnosu na L_S, za U=12 V i različite n 33
Slika 3.14. Snaga P_{uk} za el. vod FTG10OM1 u odnosu na duljinu segmenta L_S, za U=12 V i različite n 33

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Nazivni napon članaka ovisno o tipu 7
Tablica 2.2. Vrijednosti faktora smanjenja maksimalne struje u odnosu na broj jezgri (vodiča) u električnom vodu [12] 10
Tablica 2.3. Utjecaj broja serijski spojenih Li-Po ćelija na ukupni napon Li-Po baterije 14
Tablica 3.1. Koeficijenti prilagodbenih krivulja po vrstama električnih vodova 19
Tablica 3.2. Karakteristike izvedbi električnih vodova koji mogu provesti struju izračunatu u jednadžbi (3.12) 22
Tablica 3.3. Maksimalne duljine električnog voda, prema vrsti 23
Tablica 4.1. Iznosi maksimalne duljine el. voda za slučaj korištenja dva jednaka segmenta voda 35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	Površina rotora
C_m	kg	Konstanta pravca ovisnosti mase i maksimalne snage elektromotora
C_λ	kg/m	Konstanta polinoma ovisnosti linijske gustoće i struje
d	m	Promjer rotora
g	m/s^2	Gravitacijska akceleracija
$G_{u.u.}$	N	Težina uzgonskog uređaja
$G_{e.v.}$	N	Težina električnog voda
G_{uk}	N	Težina segmenta
I	A	Električna struja
I_{UAV}	A	Električna struja potrebna za bespilotnu letjelicu
$k_{\lambda 1}$	$kg/(m*A^2)$	Koeficijent polinoma ovisnosti linijske gustoće i struje
$k_{\lambda 2}$	kg/(m*A)	Koeficijent polinoma ovisnosti linijske gustoće i struje
k_m	kg/W	Koeficijent pravca ovisnosti mase i maksimalne snage elektromotora
L_S	m	Duljina segmenta sustava
m	kg	Masa
m_{max}	kg	Maksimalna masa letjelice Parrot AR Drone 2.0
m_{min}	kg	Minimalna masa letjelice Parrot AR Drone 2.0
m_{oklop}	kg	Masa vanjskog oklopa letjelice Parrot AR Drone 2.0
$m_{baterija}$	kg	Masa baterije letjelice Parrot AR Drone 2.0
m_{1m}	kg	Masa jednog elektromotora
m_{kon}		Masa konstrukcije i popratnih sustava uzgonskog uređaja
n		Broj segmenata sustava
$n_č$		Broj baterijskih članaka spojenih u seriju ili paralelu
P		Paralelni spoj baterijskih članaka
P_{el}	W	Električna snaga
P_{uk}	W	Ukupna snaga
P_h	W	Mehanička snaga u lebdjenju
S		Serijski spoj baterijskih članaka
t	s	Vrijeme
T	N	Uzgonska sila
U	V	Napon

UL	kg	Korisna nosivost
W	J	Rad
ε		Omjer ukupne uzgonske sile i težine
η		Efikasnost elektromotora
λ	kg/m	Linijska gustoća
ρ	kg/m^3	Gustoća zraka

SAŽETAK

Razvoj vezanih sustava multi-rotorskih bespilotnih letjelica relativno je nov korak u njihovoj evoluciji. Dosad pružena rješenja ograničena su cijenom i primjenom na malen spektar multi-rotorskih bespilotnih letjelica, što ograničava potencijal cjelokupnog sustava.

U ovom diplomskom radu naglasak je na promatranju različitih rješenja koja bi proširila primjenu sustava prijenosa energije na stacionarnu bespilotnu letjelicu. Učinjena je raščlamba i analiza dijelova sustava, promotrene su njihove realne izvedbe, a naposljetku je postavljena općenita jednadžba sustava.

Sustav koji se sastoji od većeg broja bespilotnih multi-rotorskih letjelica, zemaljske jedinice i energetskog električnog voda kompleksna je cjelina. Zbroj parametara koji dolaze sa svakim od osnovnih dijelova značajan je i otežava analizu. Zato je cilj ovoga rada poslužiti kao polazna točka za detaljniju analizu te optimizaciju.

Ključne riječi:

bespilotne letjelice, vezane bespilotne letjelice, multi-rotorske letjelice, energetski električni vod, zemaljska jedinica, prijenos snage

SUMMARY

The development of tethered multirotor unmanned aerial vehicles is a relatively new step in their evolution. Solutions offered up until now are price- and application- bound to a small range of multirotor UAVs, which limits the potential of the system.

The focus of this master's thesis is to examine different solutions which would expand the application of a power transmission system to a stationary multirotor UAV. An analysis of the main system components was made, their real-world counterparts were examined and a general equation of the system was established.

A system comprised of multiple multirotor UAVs, a ground unit and a flexible power cable is a complex unit. The sum of parameters acompanying every component is significant and makes any analysis that much more difficult. Therefore it is the purpose of this work to serve as a starting point for a more detailed analysis and optimisation.

Key words:

unmanned aerial vehicles, drones, tethered unmanned aerial vehicles, tethered drones, multi-rotors, flexible power cable, ground unit, power transmission

1. UVOD

1.1. Opis diplomskog zadatka

Za projektiranje zrakoplova potrebna je prethodna analiza zadataka za koje će se zrakoplov koristiti. Ovisno o tome govori li se o putničkim zrakoplovima velikog dometa, regionalnim zrakoplovima, teretnim ili vojnim zrakoplovima, potrebno je kroz odgovarajuće prioritete oformiti sustav koji ispunjava željenu namjenu. Jedan element koji nije specifičan za jednu zadaću i mora ga ispuniti svaki zrakoplov je energija.

Energija za konvencionalne putničke zrakoplove dolazi u obliku tekućeg goriva, a oslobađa se sagorijevanjem goriva u mlaznim motorima zrakoplova. Zrakoplovi nisu u mogućnosti nositi beskonačnu količinu goriva – ograničeni su uvjetom maksimalne mase pri polijetanju. Konačna količina goriva i potrošnja tog goriva tijekom leta određuju brzinu i domet zrakoplova, a time i zadaće koje taj zrakoplov može ispuniti.

U slučaju profesionalnih i industrijskih bespilotnih letjelica ograničenje postavlja energija spremljena u baterije koje se nalaze unutar letjelice. Ukoliko je potrebno izvršiti zadatak trajanja dužeg od maksimalnog vremena leta letjelice stvara se potreba za prekidom izvršavanja misije, povratak do operatera koji vrši zamjenu baterija te povratak do mjesta gdje je misija prekinuta. Troškovi dodatnih baterija i punjača u takvim slučajevima nisu zanemarivi.

Postoje zadaci bespilotnih multi-rotorskih letjelica koji se sastoje isključivo od stabilnog lebdjenja na određenoj poziciji - nadzor lokacija, detaljni pregledi struktura ili uporaba letjelica kao čvorišta komunikacijske mreže. U takvim slučajevima potrebno je pružiti energiju letjelici da ponese potrebne senzore na duže vrijeme. Iako je maksimalno vrijeme leta produženo manjkom manevara letjelice, taj porast često nije dovoljan s obzirom na potrebe korisnika.

U ovom radu razmatrat će se multi-rotorska bespilotna letjelica koja izvršava neku od navedenih zadaća stabilnog lebdjenja. Multi-rotori su optimalan izbor za izvršavanje takvih zadataka zbog svoje sposobnosti da stabilno lete na visinama višim od građevina te da uz minimalno odstupanje zadrže odabranu poziciju. Cilj ovog rada je projektirati sustav kojim je moguće povezati multi-rotorsku letjelicu na zemaljski izvor napajanja, čime bi se letjelici omogućilo neograničeno trajanje leta.

Takav sustav sastoji se od zemaljske jedinice, električnog voda za prijenos energije te same letjelice. Zemaljska jedinica sadrži izvor energije te uređaj za pretvorbu proizvedene energije

u električnu struju željenih karakteristika. Energija se električnim vodom prenosi do letjelice, gdje se po potrebi ponovno vrši pretvorba u vrstu električne struje koja je potrebna za normalan rad letjelice.

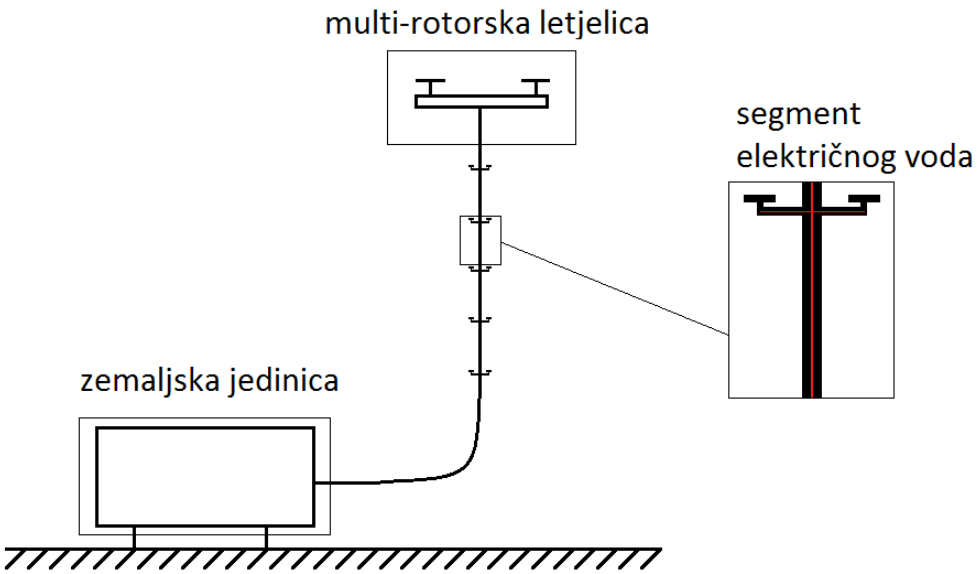
Razni projekti već su rezultirali djelomičnim rješenjima ovoga problema. Tvrtka GORE nudi 3 vrste specijaliziranih električnih vodova za vezane sustave bespilotnih letjelica. Tvrtke Elistair i ECA Group uz električne vodove nude potpune sustave koji uključuju i bespilotne letjelice. Zajednička karakteristika svih tih sustava je jedinstveni električni vod, tj. vod izveden iz jednog dijela. Masa električnog voda tako ograničava uporabu sustava samo na one letjelice koju mogu ponijeti tu masu – skupe profesionalne bespilotne letjelice.

Nažalost, specijalizirani sustavi i komponente intelektualno su vlasništvo proizvođača, pa o njima nije dostupan velik broj informacija. Naglasak u ovom radu bio je na korištenju komercijalno dostupnih elemenata.

Rješenje predstavljeno u ovom radu predstavlja dvije promjene u dosadašnjem pristupu usidrenim sustavima bespilotnih letjelica. Prva promjena je razdvajanje električnog voda na segmente, što bi omogućilo bržu i jeftiniju zamjenu u slučaju oštećenja voda. Druga promjena je uvođenje uređaja za stvaranje uzgona na svaki modul električnog voda, s ciljem smanjenja efektivne mase električnog voda i omogućavanja uporabe ovakvoga sustava na letjelicama koje dosad nisu mogle biti korištene za takve namjene.

2. Idejno projektiranje sustava

U ovom poglavlju bit će predstavljena idejna razrada sustava. Ponuđeni su općeniti pregledi mogućih varijanti dijelova sustava te njihove karakteristike.



Slika 2.1. Osnovni elementi sustava

Slika 2.1 prikazuje raspored osnovnih elemenata sustava. Zemaljska jedinica nalazi se na tlu, a s letjelicom je povezana modificiranim električnim vodom podijeljenim u segmente. Za potrebe ovog diplomskog rada promatrat će se multi-rotorska bespilotna letjelica u stanju lebdjenja, dakle bez brzine leta u smjeru sve tri osi koordinatnog sustava.

2.1. Zemaljska jedinica

Primarni zadatak zemaljske jedinice je proizvodnja električne energije koja je potrebna za napajanje ostatka sustava. Električnu energiju moguće je proizvesti iz primarnih izvora energije jednom od 3 metode [1].: fotonaponskim ćelijama, elektrokemijskim reakcijama ili generatorima električne struje.

2.1.1. Fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije ili fotovoltaici direktno vrše pretvorbu iz solarne energije u električnu energiju. Za proces je odgovoran fotovoltaični efekt kojim se u materijalu stvaraju napon i električna struja kad ga se izloži svjetlosti. Zemaljska jedinica koja koristi fotonaponske ćelije morala bi imati veći broj ćelija povezanih u fotovoltaičke module ili, popularnije, solarne ploče.

Prednost uporabe ove metode proizvodnje električne energije je ta da se koristi obnovljivi primarni izvor energije, Sunčeva svjetlost. Ista ta činjenica je razlog za velike mane ovakvog sustava - gustoća snage najefikasnijih solarnih ploča iznosi tek oko 170 W/m^2 [2]. proizvodnja energije bila bi ograničena vremenskim uvjetima – solarne ploče postižu tek 10 – 20 % svoje maksimalne efikasnosti na oblačne ili kišne dane. Tada bi ovakav sustav, kako bi se uz potrošnju postigla i zaliha električne snage, zahtijevao iznimno veliku površinu zemaljske jedinice.



Slika 2.2. Fotovoltaička ćelija [3]

2.1.2. Elektrokemijski izvori

Elektrokemijski izvori za generiranje električne energije koriste kemijsku energiju. Primjer elektrokemijskog izvora su baterije, u kojima se električna energija proizvodi putem spontanih kemijskih reakcija između anode i katode. Ovisno o tome može li se proces obrnuti tj. može li se kemijska energija obnoviti nakon što je iskorištena za pretvorbu u električnu energiju, baterije se dijele na primarne (tj. nepunjive) i sekundarne (tj. punjive) baterije.

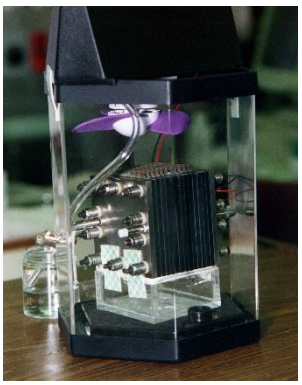
Postoje razne vrste baterija kao što su olovni akumulatori, nikal i litij baterije, te gorivni članci. Baterije obično sadržavaju više baterijskih članaka povezanih u seriju – time je moguće povećati ukupni napon baterije. To se čini kako bi se, za istu potrošnju snage, smanjila električna struja unutar sustava kao i gubici koji s njom dolaze.

Olovni akumulatori imaju najniže vrijednosti gustoće energije, ali zato postižu visoke vrijednosti omjera snage i mase. Zato su pogodni za uporabu u automobilskoj industriji, jer su sposobni pružiti visoku električnu struju potrebnu za starter motora.



Slika 2.3. Olovni akumulator [4]

Gorivni članci jedini su od navedenih elektrokemijskih izvora koji koristi komponente izvan baterije – gorivo i kisik iz zraka – umjesto kemijske spojeve koji se već nalaze unutar baterije.



Slika 2.4. Gorivni članak [5]

S obzirom da im konstrukcija može biti izvedena bez pomičnih dijelova, ističu se visokom pouzdanošću. Zato se trenutno koriste kao uglavnom kao izvori energije u svemirskoj industriji i na zabačenim lokacijama, iako su testirani i u automobilskoj industriji. Razlog rijetkog korištenja su visoka cijena i relativno nizak nazivni napon, što zahtijeva veći broj članaka u usporedbi s ostalim tipovima baterija.

Nikad-kadmij baterije gotovo su potpuno zamijenjene drugom generacijom baterija, tzv. nikal-metal-hidrid baterijama. Njihovim razvojem riješeni su najveći problemi baterija prve generacije – uporaba otrovnog kadmija i nizak kapacitet. Koriste se najviše u potrošačkoj elektronici, ali poznate su i primjene u automobilskoj industriji.



Slika 2.5. Nikal-metal-hidrid (Ni-MH) baterija [6]

Litij-ion, a kasnije i litij-polimer baterije, postupno su preuzele mjesto ostalih tipova baterija. To je omogućila njihova visoka gustoća energije, visok nazivni napon i minimalno samopražnjenje kad nisu u uporabi. U usporedbi s nikal-metal-hidrid baterijama su skuplje i kraćeg životnog vijeka.



Slika 2.6. Litij-polimer (Li-Po) baterija [7]

Tablica 2.1. Nazivni napon članaka ovisno o tipu

Tip baterijske ćelije		**Nazivni napon ćelije [V]**
Olovni akumulator		2,1
Nikal	Nikal-kadmij (Ni-Cd)	1,2
	Nikal-metal-hidrid (Ni-MH)	1,2
Litij	Litij-ion (Li-Ion)	3,6 ~ 3,85
	Litij-polimer (Li-Po)	3,0 ~ 4,2
Gorivni članak		0,7

Broj povezanih baterijskih članaka može značajno utjecati na masu baterije. Za zadovoljavajuće karakteristike bit će potrebno spojiti ih serijski kako bi se postigao traženi napon u sustavu, a potom i paralelno kako bi se osigurao dovoljan kapacitet koji će letjelicu i uzgonske uređaje moći opskrbljivati duže vrijeme.

2.1.3. Generatori

Generatori služe za pretvorbu mehaničke energije u električnu. Pretvorba se provodi uporabom Faradayevog zakona indukcije, koji kaže da se kretanjem vodiča ili magnetnog polja (u kojem se vodič nalazi) stvaraju napon i električna struja. Istim principom služe se električni motori za obrnutu pretvorbu energije – iz električne u mehaničku.

Generatori mogu proizvoditi ili istosmjernu ili izmjeničnu struju. U slučaju proizvodnje izmjenične struje dalje se mogu podijeliti na asinkrone i sinkrone motore, prema tome rotira li se osovina brzinom jednakom brzini okretnog magnetskog polja ili ne.

Ukoliko se u jednu jedinicu povežu motor s unutarnjim izgaranjem i generator dobiva se motor-generator set. Setovi mogu koristiti različita goriva poput benzina, dizela, prirodnog plina i sl. Ovisno o snazi, mogu značajno varirati u veličini – od ručnih setova s nekoliko stotina vata do velikih stacionarnih setova s preko milijun vata. U setove se mogu dodati i inverteri (za pretvorbu istosmjerne u izmjeničnu struju) ili ispravljači (za pretvorbu izmjenične u istosmjernu struju), ovisno o tome kakva je struja potreba potrošaču.

Za ovaj stupanj projektiranja dovoljno je pretpostaviti da odabrana metoda za proizvodnju električne energije može proizvesti električnu struju potrebnih karakteristika, koje će biti određene kasnije.

Uz funkciju generiranja električne energije, zemaljska jedinica služi i kao sidrište ostatku sustava. Težina zemaljske jedinice mora biti veća od viška uzgonske sile koju stvaraju letjelica i uzgonski uređaji na segmentima električnog voda.

2.2. Električni vod

2.2.1. Električni vod

Električni vodovi su skupovi jednog ili više vodiča, izolatora i različite druge opreme koji služe za prijenos, raspodjelu, razvođenje i priključivanje električne energije ili u telekomunikacijske svrhe [8]. Osnovna izvedba električnog voda sadrži jedan puni bakreni ili aluminijski vodič, obavijen slojem polimernog materijala.

Iako se kolokvijalno ti pojmovi često poistovjećuju, potrebno je razlikovati električni vod od električnog kabela, koji može služiti u iste svrhe, ali je isključivo namijenjen polaganju u tlo ili pod vodu.



Slika 2.7. Vodič od pune bakrene žice [9]

Umjesto pune žice, vodiči mogu doći u obliku užeta spletenog od tankih niti vodiča. Takva izvedba dopušta značajno više savijanja električnog voda, ali potreban je kabel većeg promjera i težine za maksimalnu struju koju postižu tanji masivni vodiči.



Slika 2.8. Vodič u obliku užeta spletenog od tankih vodiča [10]

U električnom vodu može se nalaziti i veći broj zasebnih vodiča – takav se sustav naziva višežilni električni vod. Korištenjem višežilnih električnih vodova olakšava se izvedba spojeva i smanjuje cijena instalacije, ali zbog otežanog hlađenja unutarnjih vodiča maksimalna dopuštena struja je manja u odnosu na jednožilne vodove.



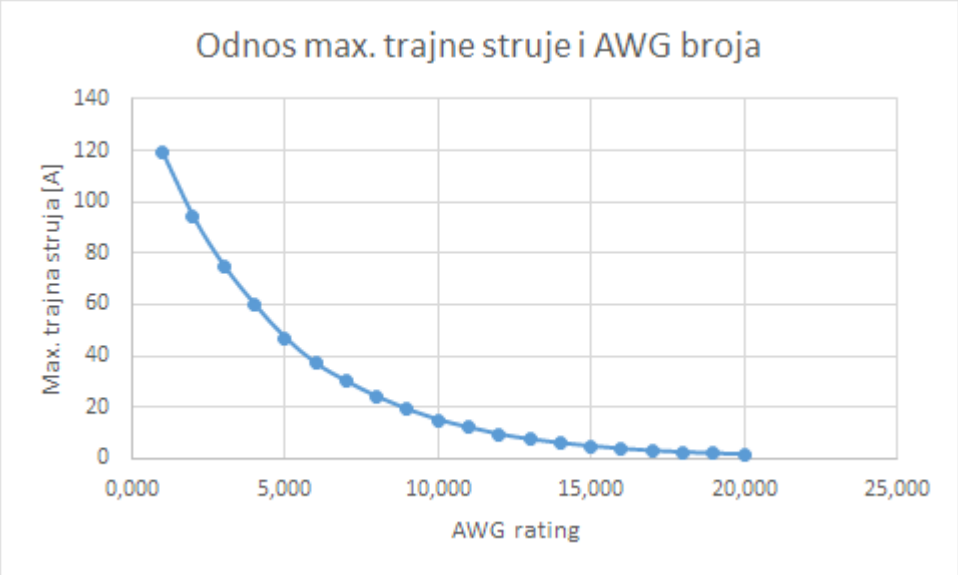
Slika 2.9. Višežilni električni vod [11]

Tablica 2.2. Vrijednosti faktora smanjenja maksimalne struje u odnosu na broj jezgri (vodiča) u električnom vodu [12]

Način uporabe električnog voda	**Broj vodiča u električnom vodu**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
u zraku ili na površini	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50

Za uporabu u sustavu opisanom u ovom diplomskom radu bit će potreban energetski električni vod zadovoljavajućih karakteristika koji se može koristiti na zraku, u različitim vremenskim uvjetima. Takve karakteristike i dopušteni načini uporabe zapisani su najčešće u dokumentaciji proizvođača.

Električne karakteristike električnih vodova moguće je odrediti i pomoću AWG (engl. *American Wire Gauge*) sustava [13]. Taj standardizirani sustav navodi vrijednosti poput linijskog otpora i maksimalne dopuštene struje za puni bakreni vodič različitih presjeka. Moguća je primjena i na vodiče s bakrenim užetom, ali uz prethodno računanje ekvivalentnog presjeka vodiča. Ovaj se pristup koristi u slučaju nedostatka podataka koje pruža proizvođač električnog voda.



Slika 2.10. Odnos maksimalne trajne struje i AWG broja [13]

Slika prikazuje smanjenje vrijednosti dopuštene trajne struje s rastom AWG broja, tj. sa smanjenjem poprečnog presjeka (a time i ukupne mase) masivnog bakrenog vodiča. Ove će vrijednosti poslužiti kao referentne, jer karakteristike realnih električnih vodova ne mogu nailaziti karakteristike neizoliranog masivnog bakrenog vodiča.

Masa kabela bit će bitna komponenta u jednadžbi sustava – može se pretpostaviti da će predstavljati najveću masu u sustavu.

2.2.2. Segmenti električnog voda

Svaki segment električnog voda sadrži standardni električni vod, uzgonske uređaje i pripadajuću konstrukciju te uređaje za ostvarivanje spoja sa ostatkom sustava (tzv. konektore).

Jedan od segmenata električnog voda razlikuje se od ostalih segmenata poglavice u tome što na jednom kraju sadrži spoj koji odgovara izlazu zemaljske jedinice. Njegov drugi kraj (na koji se nastavlja ostatak električnog voda, tj. sljedeći segment) sadrži jednak mehanizam za proizvodnju uzgona kao ostali segmenti i konektor na koji se može nastaviti sljedeći segment električnog voda.

S obzirom na oštećenja koja se mogu pojaviti kad je radijus savijanja vodiča manji od minimalnog dopuštenog radijusa savijanja vodiča, pretpostavlja se da je spoj sa zemaljskom jedinicom izveden tako da do tih oštećenja ne dolazi.

Ostali segmenti električnog voda nastavljaju spoj od zemaljske jedinice do letjelice. U sebi nose vodič koji mora istovremeno voditi struju za uzgonski uređaj segmenta, uzgonske uređaje segmenata iznad tog segmenta, kao i za potrebe same letjelice. Ta će funkcija odrediti potreban promjer vodiča i izolacije, a time i masu samog kabela.

Letjelica i uzgonski uređaji koriste istosmjernu struju, pa je poželjno da se upravo takva struja proizvodi u zemaljskoj jedinici i vodi do svih potrošača u strujnom krugu. Alternativno, moguće je uvesti ispravljač za pretvorbu između generirane izmjenične struje i korištene istosmjerne struje.

Svaki segment na krajevima ima spoj za povezivanje sa segmentom prije, tj. poslije. Poželjno je da ti spojevi imaju što manji unutarnji otpor, a moraju moći podnijeti maksimalnu struju u krugu. Segmenti također sadrže i svoj uzgonski uređaj, koji bi trebao stvarati uzgon jednak ili veći od težine jednoga segmenta. Ukupna uzgonska sila svih segmenata mora biti veća od ukupne težine električnog voda. Uzgonski uređaji segmenata aktiviraju se priključivanjem električnog voda na izvor napajanja, tj. na zemaljsku jedinicu.

Uzgonske uređaje moguće je projektirati na više načina, pa je provedena usporedba izvedbi korištenjem koaksijalnih kontra-rotirajućih rotora i standardne multi-rotor konfiguracije s 4 rotora. S obzirom da je tijekom eksploatacije poželjno minimizirati kretanje električnog voda, za uzgonske uređaje odabrana je multi-rotorska konfiguracija. Razlog tome je da ona inherentno pruža otpor destabilizirajućim utjecajima poput zapuha vjetra. Uz to, konstrukcija

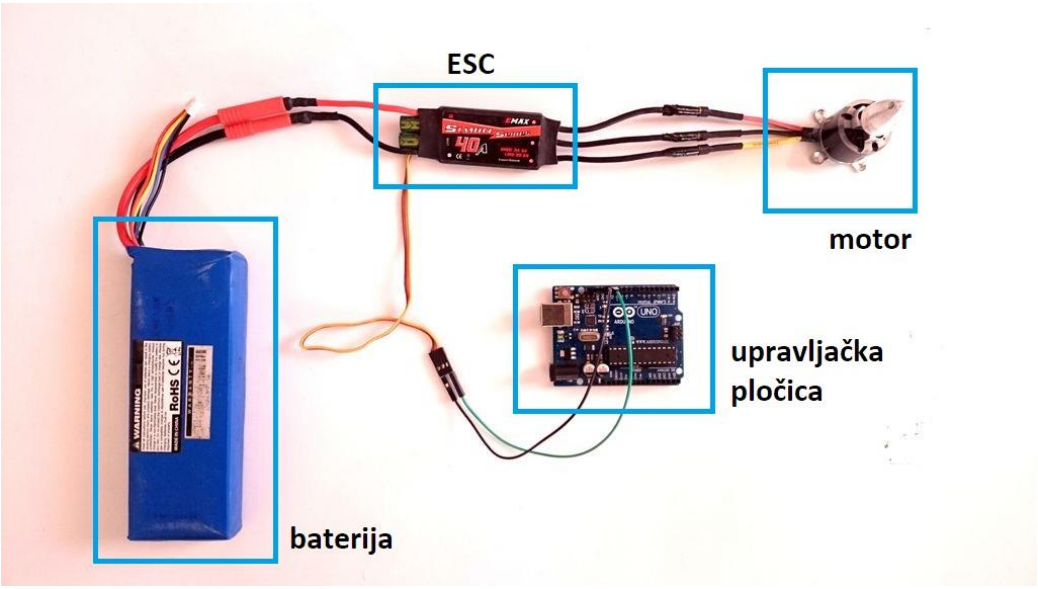
te konfiguracije dopušta smještanje električnog voda u težište, što nije moguće korištenjem koaksijalnih kontra-rotirajućih rotora.

2.3. Multi-rotorska letjelica

Multi-rotorske letjelice ostvaruju uzgon i porivnu silu koristeći veći broj vodoravnih rotora. Rotore pokreće zakretni moment dobiven pretvorbom električne energije u mehaničku u elektromotorima letjelice. Pretvorba se događa unutar motora putem permanentnih magneta i namotaja vodiča – magnetsko polje stvoreno prolaskom električne struje kroz vodič direktno utječe na magnete postavljene oko ili unutar tog magnetskog polja. To međudjelovanje rezultira kretanjem rotora.

Kako bi se izbjeglo neprekidno mijenjanje smjera vrtnje motora uzrokovano nepovoljnom pozicijom magneta u odnosu na generirano magnetsko polje, potrebno je periodički promijeniti smjer struje u namotajima vodiča. Dio motora to čini korištenjem komutatora (tzv. *brushed* motori), dok ostatak istu zadaći izvršava elektronički (tzv. *brushless* motori).

Većina današnjih bespilotnih letjelica koristi BLDC (engl. *brushless direct current*) motore uz dodatak ESC (engl. *electronic speed controller*) uređaja koji istosmjernom strujom iz baterije letjelice kontroliraju brzinu rotacije motora. ESC uređaji povezani su direktno na bateriju letjelice iz koje dobivaju potrebnu struju i upravljačku pločicu kojoj predaju dio struje, a od koje primaju upravljačke signale.



Slika 2.11. Spoj baterije, upravljačke pločice, ESC uređaja i motora [14]

Današnje multi-rotorske bespilotne letjelice gotovo isključivo koriste Li-Po baterije. Kao što je već opisano, Li-Po baterije pripadaju u skupinu punjivih baterija, a pokazale su se kao optimalan izbor u potrošačkoj elektronici zbog svoje visoke gustoće energije i male mase u odnosu na starije Ni-Cd ili Ni-MH baterije.

Osnovne komponente ćelije su katoda, anoda, te elektrolit. Jedna od elektroda uvijek je izrađena od interkaliranog litijevog spoja. Litijevi ioni kreću se prilikom trošenja od negativne prema pozitivnoj elektrodi, prolazeći pritom kroz polimerni elektrolit. Između elektroda često je umetnut i separator – tanki polimerni film koji dopušta kretanje iona ali sprječava dodir čestica različitih elektroda [15].

Kao što je već opisano, baterijske ćelije se najčešće serijski spajaju kako bi nastala Li-Po baterija višeg ukupnog napona. Za označavanje baterije koristi se oznaka $n_{ć}S$, gdje $n_{ć}$ predstavlja broj spojenih ćelija, a „S“ serijski spoj. Vrijednosti napona za različite brojeve Li-Po ćelija u bateriji navedene su u tablici.

Tablica 2.3. Utjecaj broja serijski spojenih Li-Po ćelija na ukupni napon Li-Po baterije

Broj serijski spojenih ćelija	Oznaka baterije	Nazivni napon baterije [V]
2	2S	7,4
3	3S	11,1
4	4S	14,8
5	5S	18,5

Spajanjem ćelija i baterija u paralelu povećava im se ukupni kapacitet, a u tom slučaju koristi se oznaka „nP“. Ukoliko su ćelije spojene samo serijski, često se izostavlja „1P“ iz naziva. Ukoliko su ćelije spojene serijski, a potom baterije paralelno, oznake se povezuju. Tako bi oznaka na bateriji „3S2P 2 Ah“ označavala 2 paralelno spojene baterije (ukupnog kapaciteta 2 Ah) od kojih svaka ima tri serijski spojene Li-Po ćelije (tj. ukupni napon iznosi 11,1 V).



Slika 2.12. Baterija s oznakom 3S [16]

3. Preliminarno projektiranje

Cilj preliminarnog projektiranja je unaprjeđenje ideje formirane tijekom idejnog projektiranja. Rad utrošen na idejno projektiranje sustava omogućava bolji odabir dijelova sustava tijekom procesa preliminarnog projektiranja.

Za određene dijelove sustava navedene u idejnom projektiranju ponuđeno je nekoliko stvarnih, komercijalno dostupnih opcija. Zapisane su njihove relevantne karakteristike, kako bi se iste mogle iskoristiti za formiranje jednadžbe samoga sustava. Iste su karakteristike kasnije korištene u svrhu detaljnog projektiranja sustava.

Kao izvor karakteristika korišteni su primarni i sekundarni izvori informacija – proizvođači komponenti i prodavači komponenti. Bitno je primijetiti kako su obje vrste informacija korištene s oprezom, s obzirom da se u nekim slučajevima nije moguće potvrditi točnost informacija.

Tako stvorena nesigurnost oko određenih aspekata tehničkih komponenti – primjerice u vezi njihove efikasnosti – odražava se u konzervativnim vrijednostima nekih karakteristika korištenih u jednadžbi sustava.

3.1. Komponente sustava

3.1.1. Bespilotna letjelica

Za potrebe izbora letjelice uspoređene su dvije vrste multi-rotorskih bespilotnih letjelica – letjelice s 4 rotora (engl. *quadcopteri*) i letjelice sa 6 rotora (engl. *hexacopteri*).

Quadcopteri predstavljaju najveći dio tržišta bespilotnih letjelica i dostupni su u širokom rasponu karakteristika. Hexacopteri su značajno manje zastupljeni na tržištu, ali veći broj rotora nudi nešto veću sigurnost u slučaju otkaza motora, što ih čini zanimljivom skupinom za promatranje.



Slika 3.1. Bespilotne multi-rotorske letjelice;
(lijevo) quadcopter Parrot Ar Drone 2.0 [17], (desno) hexacopter MJX X800 [18]

Svaki rotor povezan je na jedan elektromotor, što znači da je veći broj rotora direktno povezan s ukupnom snagom koju letjelica troši. Zemaljska jedinica morat će pružiti dovoljno snage za letjelicu kao i uzgonske uređaje svih segmenata električnog voda – zahtjev koji će značajno utjecati na izbor tipa zemaljske jedinice.

Dva su faktora bila presudna u odluci da se za korištenje u primjerima sustava odabere letjelica Parrot AR Drone 2.0. Prvi je taj da letjelica ima izrazito nisku potrošnju snage, s obzirom da koristi posebno konstruirane komponente. Drugi je taj da se dvije takve letjelice nalaze u posjedu Fakulteta i brodogradnje, pa je moguć uvid u karakteristike i eventualna eksperimentalna provjera sustava kroz izgradnju prototipa.

Takav izbor povezan je i s ciljem koji je naveden u uvodu ovog rada – osmisliti sustav koji je moguće primijeniti na jeftinije letjelice kako bi se smanjilo početno ulaganje u sustav.

S obzirom da su uzgonski uređaji segmenata i sami bespilotne letjelice, ukoliko se uzgonski uređaj posljednjeg segmenta proširi potrebnom opremom nije potrebno imati dodatnu, različitu bespilotnu letjelicu.

3.1.2. Električni vod

Pretraživanjem podataka proizvođača pronađen je relativno mali broj električnih vodova zadovoljavajućih karakteristika. Većina komercijalno ponuđenih vodova nije za vanjsku uporabu pri mehaničkim naprezanjima.

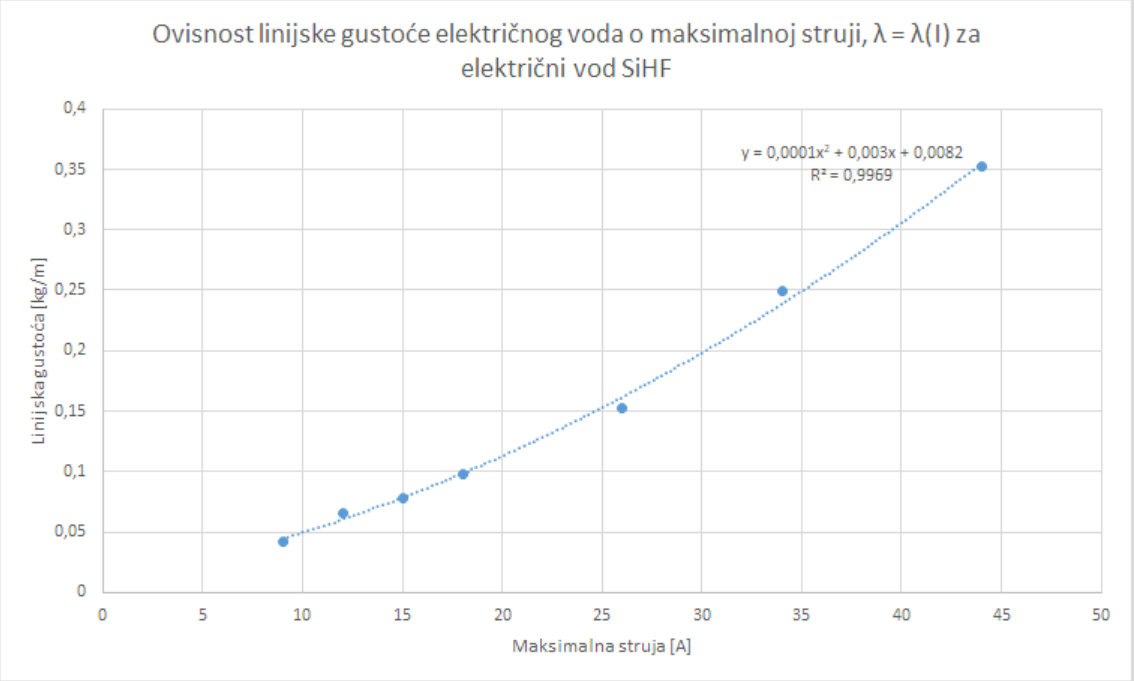
U konačnici odabrane su 3 vrste vodova, različitih namjena. Njihove karakteristike pokazuju da postoji mogućnost mobilne instalacije u različitim okolišnim uvjetima. U svrhu usporedivosti rezultata promatrane su trožilne izvedbe sva 3 odabrana voda. Odabir upravo te izvedbe je logičan – u sustavu će biti potrebna dva energetska voda, a treći vod može predstavljati signalni vodič. Ta zamjena nije posve točna zbog veće mase energetskih u odnosu na signalne vodiče, ali bitno je primijetiti da će svaki ovako dimenzioniran sustav podržavati i vod koji uključuje signalni vodič.

U slučaju korištenja kompozitnog (preciznije CFRP, engl. *carbon fiber reinforced polymer*) okvira za uzgonski uređaj segmenta, treći vod može poslužiti za uzemljenje jer su ugljikova vlakna vodlljiva.

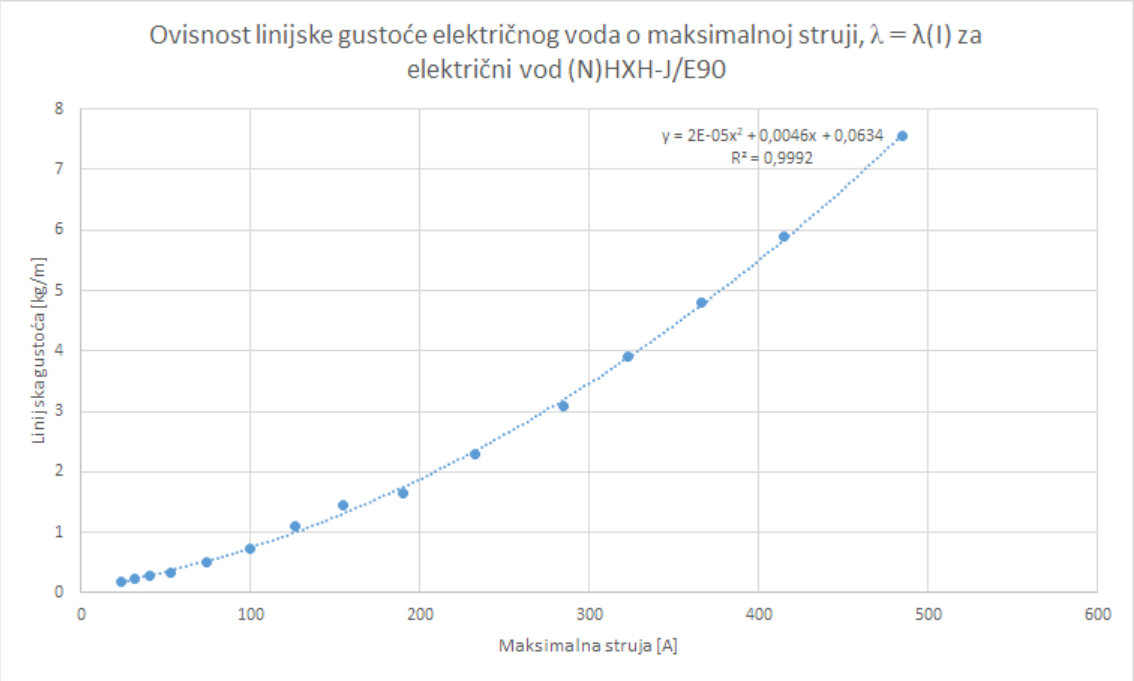
Za potrebe izvoda jednadžbe segmenta formirane su prilagodbene krivulje koje povezuju linijsku gustoću i maksimalnu trajnu struju pojedinog električnog voda. Korištene su polinomne krivulje 2. reda, pa su jednadžbe oblika

$$\lambda(I) = k_{\lambda 1} * I^2 + k_{\lambda 2} * I + C_{\lambda}. \tag{3.1}$$

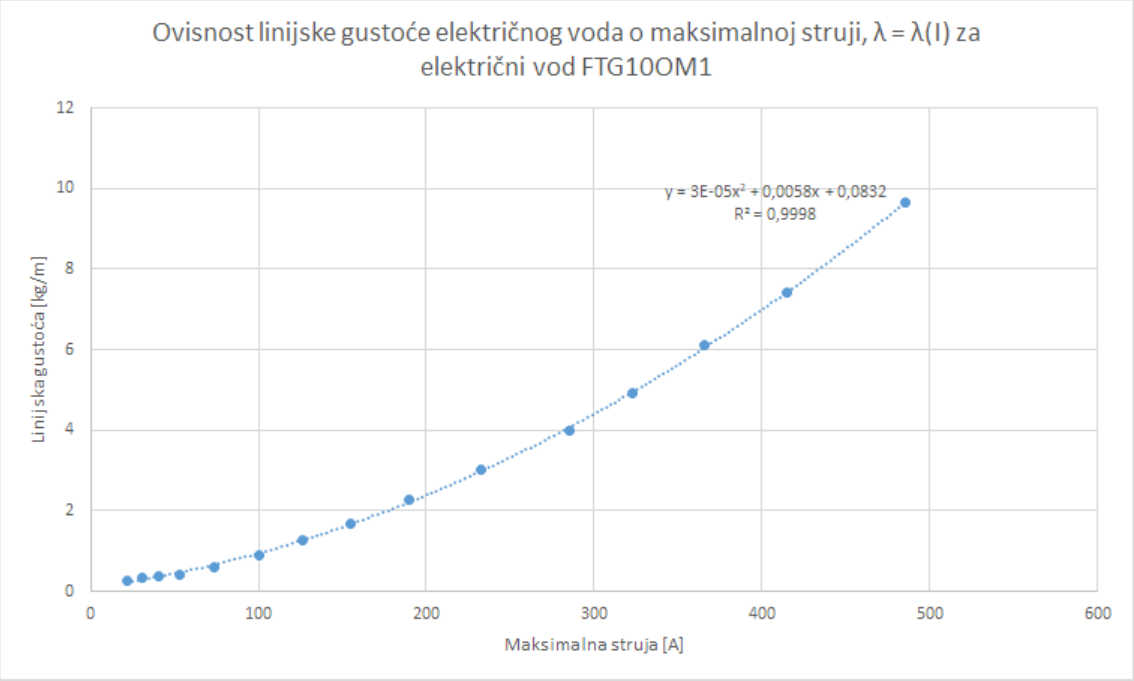
Krivulje su prikazane na slikama, a koeficijenti za pojedini kabel ispisani u Tablica 3.1. Tehnički podaci korišteni za formiranje krivulja navedeni su u Prilogu.



Slika 3.2. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod SiHF



Slika 3.3. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod (N)HXH-J/E90



Slika 3.4. Odnos linijske gustoće i maksimalne trajne struje za električni vod FTG10OM1

Tablica 3.1. Koeficijenti prilagodbenih krivulja po vrstama električnih vodova

Vrsta el. voda	Koeficijent $k_{\lambda 1}$ [kg/(m*A^2)]	Koeficijent $k_{\lambda 2}$ [kg/(m*A)]	Koeficijent C_λ [kg/m]
SiHF-J	0,00010	0,0030	0,0082
(N)HXH-J/E90	0,00002	0,0046	0,0634
FTG10OM1	0,00003	0,0058	0,0832

Kao što je izneseno u uvodu, bitan dio projektiranja svih vrsta letjelica je minimizacija mase u svrhu produljenja trajanja leta. U ovom radu zadatak je pronaći odgovarajući odnos mase električnog voda i ostalih komponenti sustava – neizbježno je povećanje mase samoga voda jer je ono povezano s njegovom većom duljinom.

3.1.3. Motori

Kao što je navedeno u poglavlju o bespilotnim letjelicama, elektromotori koji se koriste u bespilotnim letjelicama najčešće su BLDC tip, pa su upravo takvi elektromotori promatrani za uporabu u uzgonskim uređajima segmenata električnog voda. Električni vod morat će simulirati bateriju letjelice – bit će spojen direktno ili putem PDB (engl. *power distribution board*) na ESC uređaje kako bi se omogućio normalan rad motora.

Maksimalna efikasnost ovih motora ovisi o tipu, ali u većini slučajeva povezana je s ulaznim naponom od 11,1 V (tj. s korištenjem 3S Li-Po baterija). Iako se u ovom dijelu rada neće promatrati različiti načini izvedbe zemaljske jedinice, pretpostavlja se da će moći pružati istosmjernu struju tog ili bliskog napona. Time je moguće izbjeći mijenjanje karakteristika struje na uzgonskim uređajima i povećanje mase koje bi popratni uređaji donijeli.

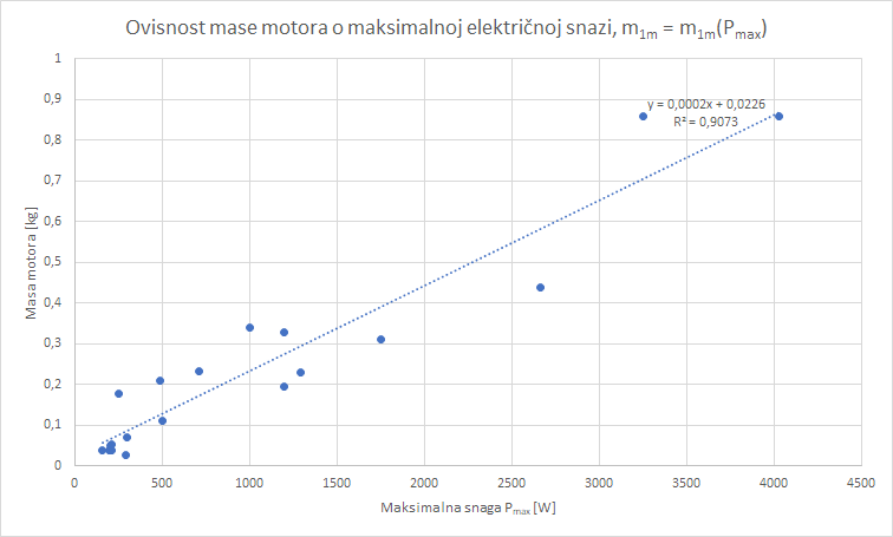
Za potrebe jednadžbe sustava formulirana je veza između mase motora i maksimalne snage. Korišteni tehnički podaci mogu se pronaći u Prilogu. Veza je aproksimirana pravcem, prikazanim na Slika 3.5, čiji je opći oblik

$$m_{1m}(P_{el}) = k_m * P_{el} + C_m, \tag{3.2}$$

a koeficijenti pravca iznose

$$k_m = 0{,}0002 \left[\frac{\text{kg}}{\text{W}}\right], \tag{3.3}$$

$$\text{i } C_m = 0{,}0226 \text{ [kg]}. \tag{3.4}$$



Slika 3.5. Dijagram ovisnosti mase elektromotora o maksimalnoj električnoj snazi elektromotora

3.1.4. Referentni primjer

Kao referentni primjer provedena je analiza za sustav koji se sastoji od letjelice, neprekinutog električnog voda i zemaljske jedinice – dakle bez segmentiranja električnog voda i uporabe dodatnih uzgonskih uređaja. Cilj primjera je pokazati visinu na kojoj može lebdjeti određena letjelica povezana običnim električnim vodom na izvor napajanja, kako bi se rezultati novoga sustava mogli usporediti s konvencionalnom izvedbom.

Za potrebe primjera koristit će se prethodno odabrana bespilotna letjelica Parrot AR Drone 2.0.

Maksimalna masa letjelice Parrot AR Drone 2.0, koja uključuje oklop za vanjsku uporabu i bateriju, iznosi

$$m_{max} = 0{,}42 \text{ [kg]}. \tag{3.5}$$

S tom masom on je u mogućnosti izvesti sve programirane akrobatske kretnje, te penjanje i let punom brzinom.

Mase vanjskog oklopa i baterije iznose

$$m_{oklop} = 0{,}04 \text{ [kg] } i \tag{3.6}$$

$$m_{baterija} = 0{,}15 \text{ [kg]}, \tag{3.7}$$

pa minimalna ukupna masa iznosi

$$m_{min} = m_{max} - m_{oklop} - m_{baterija} = 0{,}25 \text{ [kg]}. \tag{3.8}$$

Korisna nosivost modificirane letjelice (engl. *useful load*, UL) izrazit će se kao razlika veličina m_{max} i m_{min}

$$UL = m_{max} - m_{min} = 0{,}17 \text{ [kg]}. \tag{3.9}$$

Iz normalne operacije letjelice pri m_{max} može se zaključiti da motori mogu generirati uzgon i veći od onoga koji bi ponio m_{max}, ali će se koristiti ova vrijednost nosivosti uz napomenu da je to minimalna nosivost letjelice. Iznos manji od ove nosivosti značio bi da letjelica nije u stanju poletjeti.

Kako bi se odabrala prikladna izvedba električnog voda, potrebno je odrediti koliku struju mora moći provesti. To se određuje prema energetskim potrebama letjelice. S obzirom da Parrot AR Drone 2.0 koristi 4 elektromotora od 15 W (u stabilnom letu) [19], ukupna je snaga

nešto viša od njihovog zbroja zbog potreba snage ostalih komponenti letjelice. Iznos snage koja odlazi na ostale komponente je teško odrediti jer ovisi o njihovom broju i vrsti, ali se iznos od

$$P_{max} \cong 70 \text{ [W]} \tag{3.10}$$

može uzeti kao realna vrijednost uz određen faktor sigurnosti. Manji iznos ukupne snage značit će i manju struju u sustavu, pa ova pretpostavka neće imati značajan utjecaj na rezultat. Struja u sustavu ovisi o naponu na zemaljskoj jedinici, a za koji je najbolje da je što bliži naponu na baterijama letjelice. Parrot AR Drone 2.0 koristi 3S 1000 mAh bateriju, što znači da je nazivni napon 11,1 V. Komercijalni generatori imaju 1 izlaz s istosmjernom strujom napona 12 V, pa će se taj iznos koristiti u jednadžbi. Korištenjem odnosa snage i energije, te odnosa energije i napona

$$P_{el} = \frac{W}{t} = \frac{U * I * t}{t} = U * I \tag{3.11}$$

struja iznosi

$$I = \frac{P_{el}}{U} = \frac{70}{12} = 5{,}834 \text{ [A]} \tag{3.12}$$

Tablica **3.2** prikazuje prve dostupne izvedbe promatranih električnih vodova koji mogu provesti tu struju, uz dodatak neizoliranog punog bakrenog vodiča u svrhu usporedbe:

Tablica 3.2. Karakteristike izvedbi električnih vodova koji mogu provesti struju izračunatu u jednadžbi (3.12)

Tip električnog voda	Max. trajna struja, I [A]	Linijska gustoća el. voda, λ [kg/m]
SiHF-J 3x0,5	9	0,042
(N)HXH-J/E90 3x1,5	24	0,18
FTG10OM1 3x1,5	22	0,27
Neizolirani bakreni vodič, AWG 14	5,9	0,018*

*vrijednost dobivena umnoškom poprečnog presjeka AWG14 žice i gustoće čistog bakra

Maksimalna duljina električnog voda koju Parrot AR Drone 2.0 može ponijeti bit će omjer korisne nosivosti modificirane letjelice i linijske gustoće el. voda

$$L_s = \frac{UL}{\lambda}. \tag{3.13}$$

U tablici su prikazane maksimalne duljine električnog voda koje odabrana letjelica može ponijeti, izračunate uvrštavanjem vrijednosti iz prethodne tablice u jednadžbu.

Tablica 3.3. Maksimalne duljine električnog voda, prema vrsti

Tip električnog voda	Max. duljina voda [m]
SiHF-J 3x0,5	4,05
(N)HXH-J/E90 3x1,5	0,94
FTG10OM1 3x1,5	0,63
Neizolirani bakreni vodič, AWG 14	9,45

Očito je da, čak i korištenjem najlakšeg električnog voda, maksimalna visina na kojoj Parrot AR Drone 2.0 može lebdjeti nije pretjerano visoka. Rješenja naravno ovise o tome da su odabrane prve dostupne izvedbe sva 3 voda – iz tablice s vrijednostima maksimalne trajne struje lako je iščitati da bi bilo bolje koristiti izvedbe manjeg presjeka (kad bi bile dostupne). Neizolirani bakreni vodič je suprotni ekstrem, ostvarujući minimalnu vrijednost linijske gustoće zbog nedostatka izolacije. Optimalna vrijednost duljine voda bila bi dakle između vrijednosti za neizolirani vodič i el. vod SiHF.

3.2. Formiranje jednadžbe segmenta

Statička analiza problema diktira da uzgon generiran uzgonskim uređajem segmenta mora biti za određeni faktor veći od ukupne težine segmenta:

$$\boldsymbol{\varepsilon * T_{uk} = G_{uk}} \tag{3.14}$$

Ukupni uzgon generiraju 4 motora u jednakoj mjeri, pa vrijedi:

$$\boldsymbol{T_{uk} = 4 * T_{1m}} \tag{3.15}$$

Ukupnu težinu čine težina električnog voda i težina uzgonskog uređaja segmenta:

$$\boldsymbol{G_{uk} = G_{e.v.} + G_{u.u.}} \tag{3.16}$$

S obzirom da je duljina samoga segmenta varijabla koju će biti potrebno kasnije odrediti, umjesto mase električnog voda u jednadžbi se pojavljuje umnožak duljine segmenta i vrijednost linijske gustoće električnog voda, λ.

$$\boldsymbol{G_{e.v.} = \lambda * L_s * g} \tag{3.17}$$

Za linijsku je gustoću prethodno pokazano da je funkcija maksimalne struje, pa je ispravno pisati λ(I). Kako je već navedeno u izrazu (3.1), aproksimacija odnosa je izvršena polinomnom krivuljom 2. reda i općeniti oblik je

$$\boldsymbol{\lambda(I) = k_{\lambda 1} * I^2 + k_{\lambda 2} * I + C_{\lambda}}. \tag{3.18}$$

Iznosi koeficijenata $k_{\lambda 1}$, $k_{\lambda 2}$ i C_λ navedeni su u Tablica 3.1.

Ukoliko se jednadžba (3.18) uvrsti u izraz za težinu električnog voda, dobije se izraz:

$$\boldsymbol{G_{e.v.} = k_{\lambda 1} * L_s * g * I^2 + k_{\lambda 2} * L_s * g * I + C_{\lambda} * L_s * g} \tag{3.19}$$

Ukupnu težinu uzgonskog uređaja segmenta čine težine 4 motora i težina konstrukcije na kojoj se nalaze. Težina konstrukcije u ovoj jednadžbi, uz fizičku strukturu uzgonskog uređaja, uzima u obzir sve one komponente čija se masa ne ubraja u masu motora, kao što su propeleri, ESC uređaji, vodiči i sl.

$$\boldsymbol{G_{u.u} = 4 * m_{1m} * g + m_{kon} * g} \tag{3.20}$$

Umjesto mase motora možemo uvrstiti jednadžbu ovisnosti mase jednoga motora o snazi, koja je pokazana izrazom (3.2):

$$\boldsymbol{m_{1m}(P_{el}) = k_m * P_{el} + C_m} \tag{3.21}$$

Vrijednosti koeficijenata k_m i C_m navedene su u izrazima (3.3) i (3.4).

Uvrsti li se jednadžba ovisnosti mase jednoga motora o maksimalnoj električnoj snazi elektromotora u izraz za težinu uzgonskog uređaja, izraz glasi:

$$\boldsymbol{G_{u.u} = 4 * k_m * P_{el} * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g} \qquad \boldsymbol{(3.22)}$$

Uvođenjem jednadžbi (3.19) i (3.22) u jednadžbu (3.16), dobiva se izraz:

$$\boldsymbol{4 * \varepsilon * T_{1m} = k_{\lambda 1} * L_s * g * I^2 + k_{\lambda 2} * L_s * g * I + C_\lambda * L_s * g + 4 * k_m * P_{el} * g +}$$

$$\boldsymbol{4 * C_m * g + m_{kon} * g} \qquad \boldsymbol{(3.23)}$$

Optimalno je promatrati segment električnog voda povezan na zemaljsku jedinicu – on će imati zadaću provoditi struju za sve ostale segmente električnog voda, ovisno o njihovom broju, i diktirat će izgled svih ostalih segmenata. Zato se jednadžba (3.23), proširena za *n* broj segmenata električnog voda, zapisuje kao

$$\boldsymbol{4 * \varepsilon * T_{1m} = k_{\lambda 1} * L_s * g * (n * I)^2 + k_{\lambda 2} * L_s * g * n * I + C_\lambda * L_s * g +}$$

$$\boldsymbol{4 * k_m * P_{el} * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g} \qquad \boldsymbol{(3.24)}$$

Promatramo li slučaj lebdjenja, mehanička snaga potrebna za lebdjenje može se povezati s uzgonom koji generira jedan motor korištenjem teorije diska u lebdjenju:

$$\boldsymbol{P_h = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 * \rho * A}}} \qquad \boldsymbol{(3.25)}$$

Ista jednadžba može se invertirati kako bi se dobila ovisnost uzgona o snazi potrebnoj za lebdjenje:

$$\boldsymbol{T = (2 * \rho * A)^{\frac{1}{3}} * P_h^{\frac{2}{3}}} \qquad \boldsymbol{(3.26)}$$

Teorija diska služi za grube procjene jer je postavljena za jedan idealni rotor. Točniji rezultati dobivaju se eksperimentalnim testiranjem kombinacije propelera i motora ili naprednijim simulacijskim metodama, kako bi se uzela u obzir interferencija većeg broja rotora i stvarni uvjeti.

Kao što je već objašnjeno, motori pretvaraju električnu energiju u mehaničku energiju. Pretvorba električne snage u mehaničku nije potpuno efikasna zbog gubitaka u namotajima

vodiča, gubitaka zbog trenja itd. Djelotvornost motora ovisi o mnogo faktora, a u elektromotorima se nalazi u rasponu od 20 % pa sve do 99 %.

Matematički izraz za efikasnost elektromotora je:

$$\boldsymbol{\eta = \frac{P_h}{P_{el}}} \tag{3.27}$$

a s obzirom da će biti pogodnije u jednadžbi sustava okupiti srodne (električne) veličine, postavlja se izraz

$$\boldsymbol{P_h = \eta * P_{el}} \tag{3.28}$$

Uvrštavajući taj izraz u jednadžbu sustava (3.24), dobiva se jednadžba oblika:

$$\boldsymbol{4 * \varepsilon * (2 * \rho * A)^{\frac{1}{3}} * \eta^{\frac{2}{3}} * P_{el}^{\frac{2}{3}} = k_{\lambda 1} * L_s * g * (n * I)^2 + k_{\lambda 2} * L_s * g * n * I +}$$

$$\boldsymbol{C_\lambda * L_s * g + 4 * k_m * P_{el} * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g} \tag{3.29}$$

Naposljetku, potrebno je izraziti poveznicu električne snage i električne struje, korištenu u izrazu (3.12):

$$\boldsymbol{P_{el} = I * U.} \tag{3.30}$$

Kad se (3.30) uvede u jednadžbu sustava (3.29), ta jednadžba glasi:

$$\boldsymbol{4 * \varepsilon * (2 * \rho * A)^{\frac{1}{3}} * \eta^{\frac{2}{3}} * U^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{2}{3}} = k_{\lambda 1} * L_s * g * (n * I)^2 + k_{\lambda 2} * L_s * g * n * I +}$$

$$\boldsymbol{C_\lambda * L_s * g + 4 * k_m * U * I * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g} \tag{3.30}$$

Kad se svi članovi presele na desnu stranu jednadžbe i grupiraju, konačni oblik jednadžbe sustava je:

$$\boldsymbol{k_{\lambda 1} * L_s * g * (n * I)^2 +}$$

$$\boldsymbol{(k_{\lambda 2} * L_s * g * n + 4 * k_m * U * g) * I -}$$

$$\boldsymbol{\left(4 * \varepsilon * (2 * \rho * A)^{\frac{1}{3}} * \eta^{\frac{2}{3}} * U^{\frac{2}{3}}\right) * I^{\frac{2}{3}} +}$$

$$\boldsymbol{(C_\lambda * L_s * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g) = 0} \tag{3.31}$$

Zamijene li se sve komponente uz električnu struju koeficijentima, jednadžba se može zapisati kao

$$\boldsymbol{C_1 * I^2 + C_2 * I - C_3 * I^{\frac{2}{3}} + C_4 = 0} \qquad \boldsymbol{(3.32)}$$

gdje su

$$\boldsymbol{C_1 = k_{\lambda 1} * L_s * g * n^2},$$

$$\boldsymbol{C_2 = k_{\lambda 2} * L_s * g * n + 4 * k_m * U * g},$$

$$\boldsymbol{C_3 = 4 * \varepsilon * (2 * \rho * A)^{\frac{1}{3}} * \eta^{\frac{2}{3}} * U^{\frac{2}{3}}},$$

$$\boldsymbol{C_4 = C_\lambda * L_s * g + 4 * C_m * g + m_{kon} * g}.$$

Supstitucija, kojom se eliminira član $I^{2/3}$,

$$\boldsymbol{I^{\frac{1}{3}} = x} \qquad \boldsymbol{(3.33)}$$

dovodi do oblika

$$\boldsymbol{C_1 * x^6 + C_2 * x^3 - C_3 * x^2 + C_3 = 0} \qquad \boldsymbol{(3.34)}$$

Ovakav oblik jednadžbe sustava odgovara jednadžbi polinoma 6. stupnja, općeg oblika

$$\boldsymbol{a * x^6 + b * x^5 + c * x^4 + d * x^3 + e * x^2 + f * x + g = 0} \qquad \boldsymbol{(3.35)}$$

3.3. Formulacija MATLAB koda

S obzirom na visok red jednadžbe sustava, njezine rezultate relativno je teško izračunati analitičkim metodama. Zato se koriste numeričke metode, točnije programski paket MATLAB. Ovo poglavlje diplomskog rada refencira se na MATLAB kod zapisan u datoteci „Tukaric_diplomski_rad_kod_fin.pdf“, koja se može naći u Dodatku.

Za početak su u kodu navedene sve konstantne veličine – faktor omjera uzgona i težine ε (čija vrijednost od 0,5 je određena empirijski), efikasnost elektromotora η te veličine standardne atmosfere – temperatura t, tlak p i gustoća zraka ρ. Veličine standardne atmosfere neće biti sve potrebne za računanje rezultata jednadžbe sustava, ali navedene su kako bi se naglasilo da gustoća ρ nije izabrana proizvoljno.

Uz navedene, zapisani su još i koeficijenti jednadžbe koja govore o odnosu mase i snage elektromotora te jednadžbi koje opisuju ovisnost linijske gustoće i maksimalne trajne struje pojedinog električnog voda. Koeficijenti jednadžbe $\lambda(I)$ za različite električne vodove neće se koristiti u isto vrijeme, ali je poželjno okupiti ih na jednome mjestu.

Kako bi se olakšao zapis i izmjena jednadžbe segmenta, koeficijenti jednadžbe λ(I) zapisani su kao članovi vektora koeficijenata.

Iznos ukupne mase – koja predstavlja zbroj mase okvira uzgonskog uređaja, svih popratnih uređaja, senzora, žica i propelera – određen je promatranjem njihovih prosječnih veličina. U detaljnom projektiranju bit će potrebno uzeti točnije vrijednosti svih tih veličina.

Propeleri koji se koriste uz elektromotore na bespilotnim letjelicama gotovo su isključivo cjelobrojnih vrijednosti promjera u inčima. Te su vrijednosti okupljene u vektor d_{in}, a raspon iznosa je određen analizom propelera koji se koriste uz promatrane motore. Okupljanje vrijednosti u vektor olakšava se promatranje utjecaja promjera propelera na ostatak sustava, ukoliko se za to pokaže potreba.

S obzirom da je za jednadžbu uzgona potrebna površina rotora, izvodi se par transformacija kako bi se površina rotora izračunala u odgovarajućim jedinicama. Član jednadžbe u kojemu se nalazi površina potenciran je, pa se taj član ovdje računa zasebno – time se olakšava kasniji zapis jednadžbe segmenta.

Kao što je opisano u primjeru, poželjno je koristiti napon koji je standardan akumulatorima i genetatorima, a koji u isto vrijeme mogu koristiti uzgonski uređaji. Napon od 12 V je fiksirana vrijednost, ali moguće je oformiti i vektor s rasponom vrijednosti napona te tako promatrati utjecaj promjene napona na rezultate jednadžbe sustava.

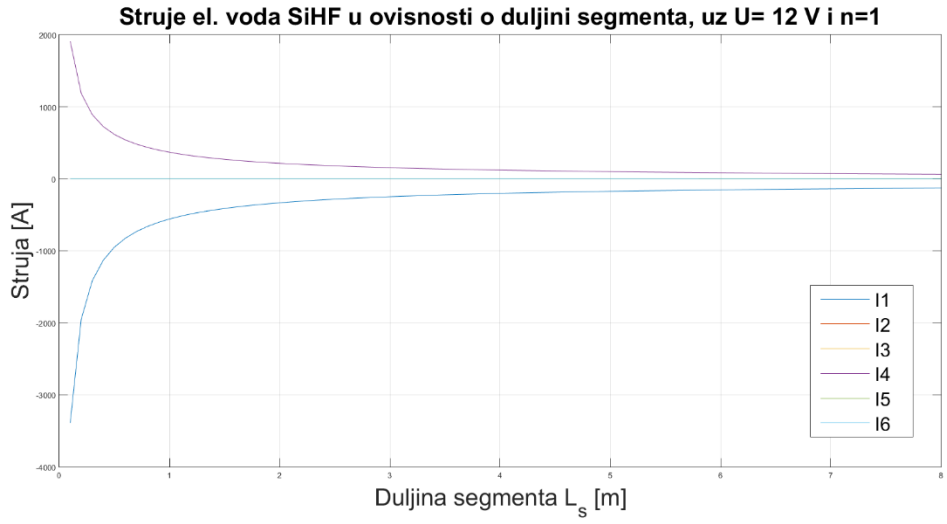
Vektor koji sadrži raspon vrijednosti je vektor duljine segmenta, čiji će se utjecaj promatrati kroz dijagrame. Vrijednost broja segmenata postavljena je za početak na 1, ali će i ta vrijednost biti promijenjena kako bi se odredile struje u slučaju različitog broja segmenata.

Tijekom izrade ovog diplomskog rada primijećeno je da vrijednosti struje, za neke kombinacije parametara sustava, postaju kompleksni brojevi. S obzirom da oni nemaju fizikalno značenje u ovom problemu, svaki korijen čija je imaginarna vrijednost različita od 0 zamijenjen je s iznosom 0. Utjecaji ove odluke vidljivi su na mnogim dijagramima.

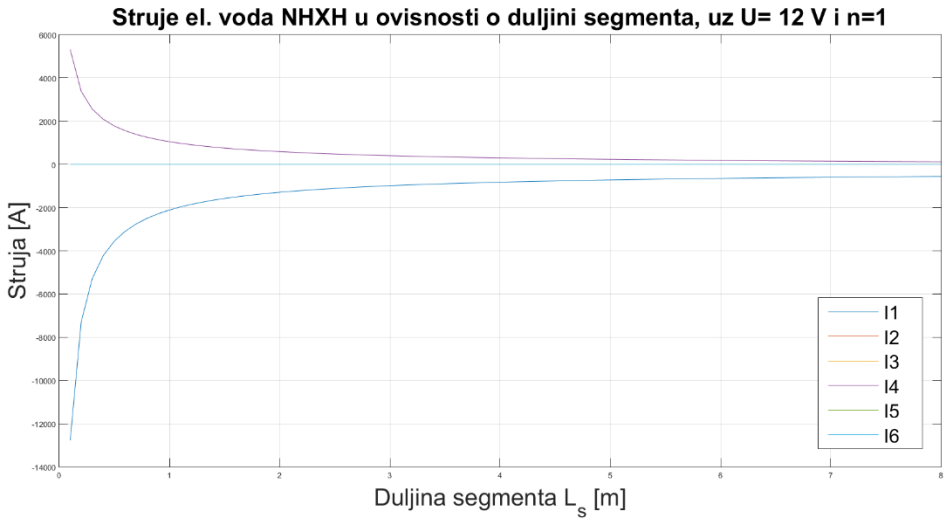
3.4. Rezultati preliminarnog projektiranja

Prva generirana rješenja su korijeni jednadžbe polinoma 6. reda. Inverznom supstitucijom su određeni iznosi struje u sustavu. S obzirom da jednadžba polinoma 6. reda ima 6 rješenja, dobivenih primjenom funkcije „*roots*“ na vektor koeficijenata polinoma *p*, njihovim kubiranjem dobiveno je 6 različitih rješenja za struju u sustavu. Na Slika 3.8 su prikazane u ovisnosti o duljini segmenta L_s, za *n* jednak 1 te *U* od 12 V.

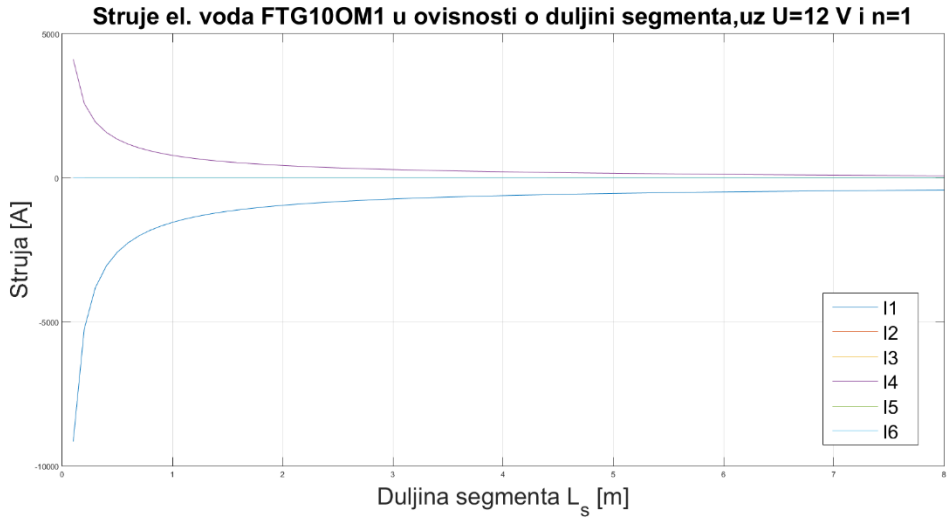
Povećanjem duljine segmenta rasti će ukupna masa, pa se za povećanje duljine segmenta očekuje i rast struje. Također se očekuje da će se njezini iznosi nalaziti unutar fizikalno prihvatljivih granica. Odgovarajuću struju nije moguće iščitati iz dijagrama za sve struje, s obzirom da ih je nekoliko iznimno velikih iznosa pa ostale nije moguće raspoznati.



Slika 3.6. Rezultati struje za električni vod SiHF, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj *U*=12 V i *n*=1

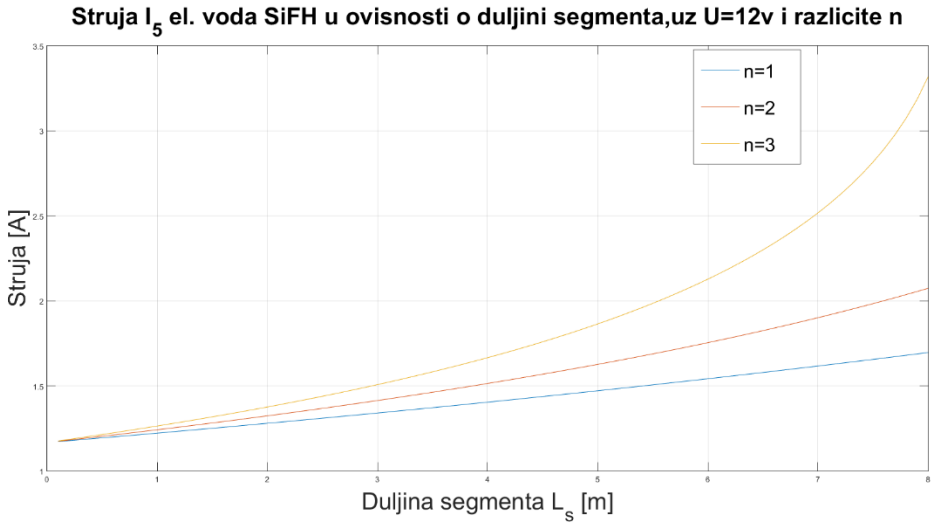


Slika 3.7. Rezultati struje za električni vod NHXH, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj *U*=12 V i *n*=1

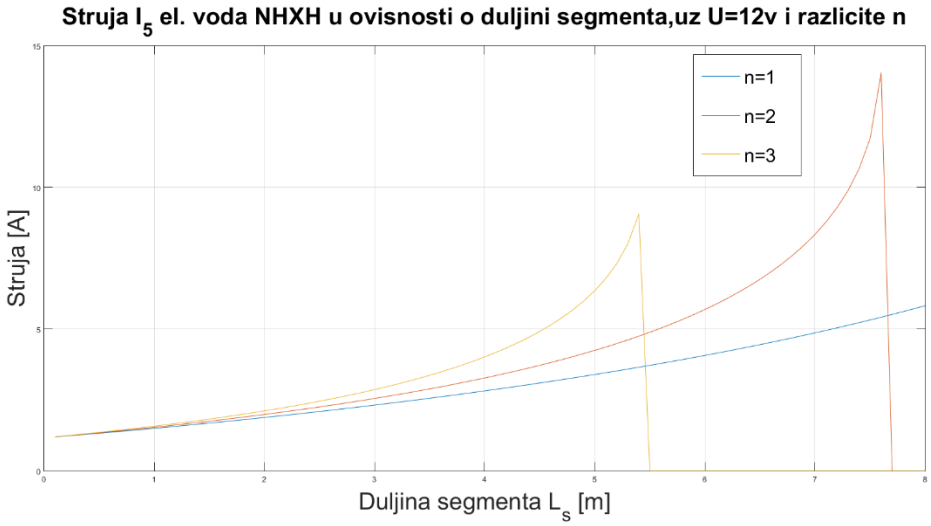


Slika 3.8. Rezultati struje za električni vod FTG10M1, u ovisnosti o duljini segmenta, za slučaj *U*=12 V i *n*=1

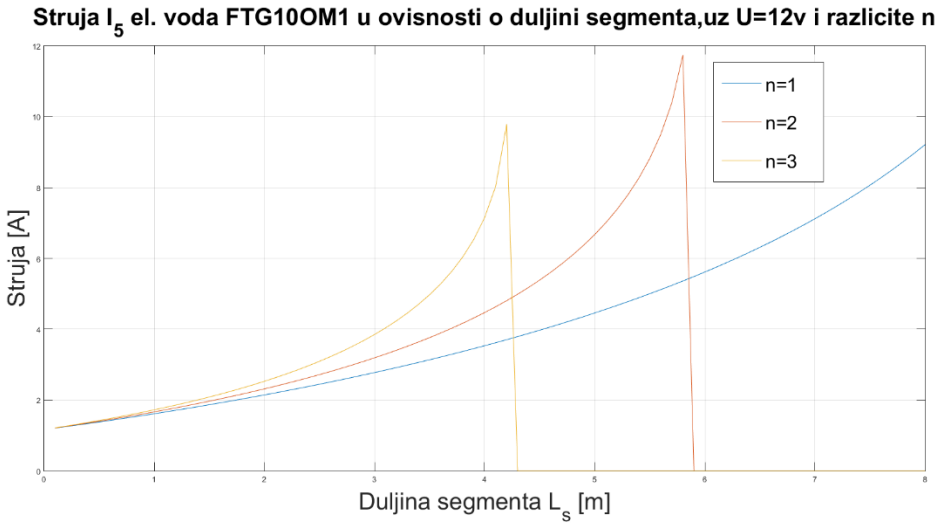
Kroz provjeru matrice I, u kojoj su okupljeni iznosi svih struja za sve duljine segmenta, vidljivo je da je fizikalno prihvatljiva isključivo struja u 5. stupcu.



Slika 3.9. Struja I_5, za vod SiHF, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je *U*= 12 V i *n*= 1, 2 ili 3;



Slika 3.10. Struja I_5, za vod NHXH, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je U= 12 V i n= 1, 2 ili 3;



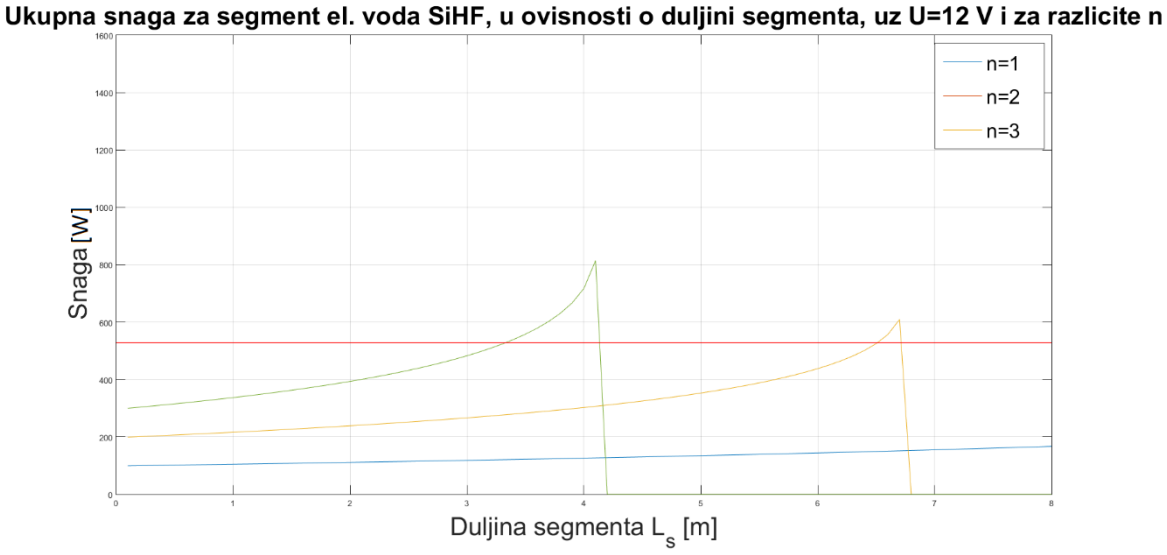
Slika 3.11. Struja I_5, za vod FTG10OM1, u ovisnosti o duljini segmenta, u slučaju da je U= 12 V i n= 1, 2 ili 3;

Za električne vodove (N)HXH i FTG10OM1 vidljivo je da za određene kombinacije parametara – veće duljine segmenta, veći broj segmenata – vrijednosti struje postaju kompleksni brojevi. Te se vrijednosti ne mogu analizirati, pa će predstavljati granicu parametara sustava.

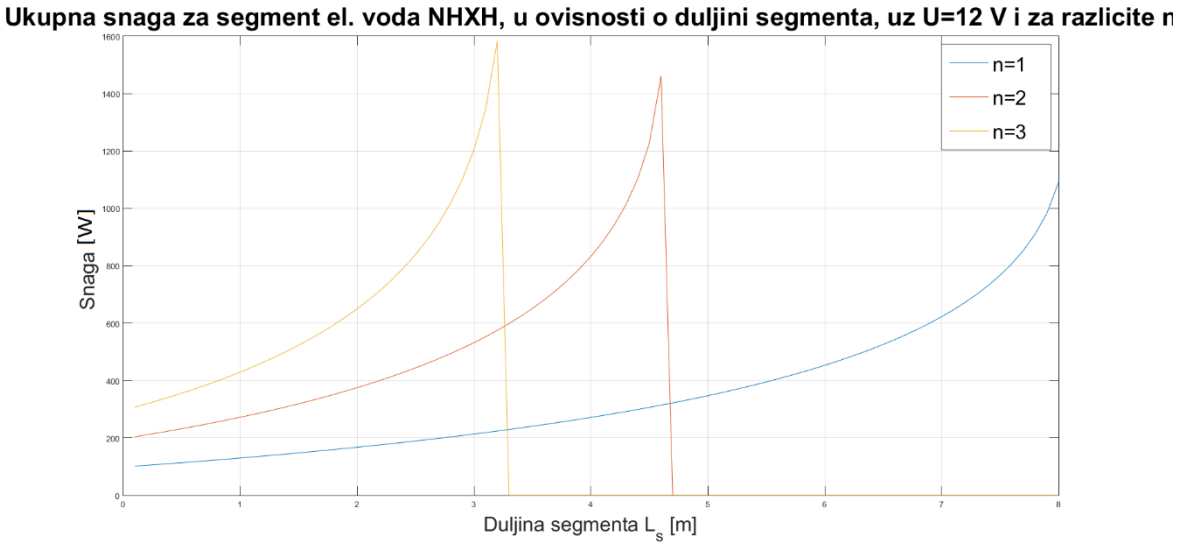
Krivulje na Slika 3.9, Slika 3.10 i Slika 3.11 očekivane su – električni vod SiHF ima najniže vrijednosti linijske gustoće, pa će mu za istu duljinu segmenta masa biti najniža. Isto vrijedi za više vrijednosti broja segmenata. To će rezultirati nižim vrijednostima struje, kad su svi ostali parametri jednaki.

Umnožak struje I_5 i napona rezultira snagom P_5. Na slici su prikazani rezultati za ukupnu snagu P_{uk} u ovisnosti o duljini segmenta L_s, gdje P_{uk} ovisi o

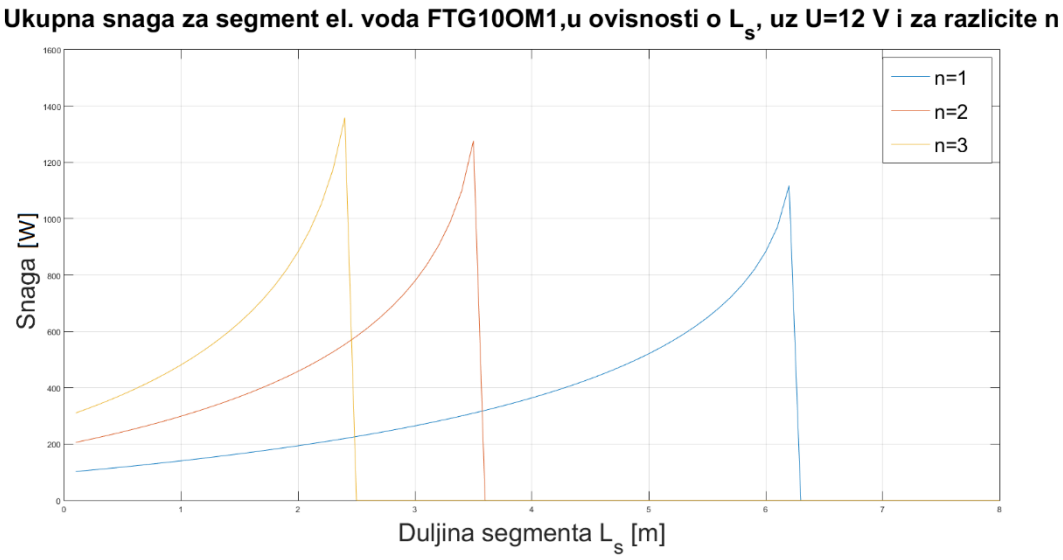
$$P_{uk} = 4 * I_5 * U * n \tag{3.36}$$



Slika 3.12. Snaga P_{uk} za el. vod SiHF u odnosu na L_S, za U=12 V i različite n



Slika 3.13. Snaga P_{uk} za el. vod NHXH u odnosu na L_S, za U=12 V i različite n



Slika 3.14. Snaga P_{uk} za el. vod FTG10OM1 u odnosu na duljinu segmenta L_S, za U=12 V i različite n

S obzirom da je ukupna snaga ovisna o broju rotora i broju segmenata, krivulje su nalik onima za struju I_5 ali uvećane za određeni faktor. Njihovi lokalni maksimumi su izrazito bitni jer, čak i ako je moguće generirati napon od 12 V i provesti struju prikazanu na Slika 3.11, potrebno je pripaziti da se ne prekorači maksimalnu snagu zemaljske jedinice.

Jedna takva granica prikazana je na Slika 3.12, jer je maksimalna struja el. voda SiHF ograničena tipovima tog električnog voda i iznosi 44 A. Kad se taj iznos pomnoži sa zadanim naponom od 12 V, maksimalna snaga iznosi 528 W.

4. Detaljno projektiranje

4.1.1. Primjer ciljanog sustava

Razmatra se sustav kojeg čine letjelica Parrot AR Drone 2.0, dva segmenta s trojezgrenim električnim vodovima i paralelno spojenom nosivom grupom, te zemaljskom jedinicom u obliku generatora za sad nepreciziranih radnih značajki.

Kao prvi segment uzima se onaj spojen na generator, dakle segment koji je najbliži tlu prilikom rada. Slično, zadnji segment (u ovom slučaju drugi) je onaj spojen na bespilotnu letjelicu. U općenitijem slučaju većeg broja od N segmenata redom dobivaju brojeve od 1 (segment uz generator) do N (segment uz bespilotnu letjelicu). Prvi segment provodi struju za svoj uzgonski uređaj te za sve segmente i letjelicu iznad sebe. Drugi segment provodi struju koja je od struje što prolazi kroz prvi segment manja za struju koja napaja nosivu grupu prvog segmenta.

Pripadna jednadžba za ukupnu visinu, u odnosu na tlo, do koje se podiže bespilotna letjelica, je:

$$L_{uk} = \sum_{i=1}^{n} \frac{UL_i}{\lambda\left((n-1) * \frac{P_{el}}{U} + I_{UAV}\right)}, \#(4.1)$$

a pokazuje kako će ukupna duljina voda (a time i visina na kojoj letjelica lebdi) biti određena brojem segmenata, nosivošću i snagom pojedinog uzgonskog uređaja i linijskom gustoćom odabranog voda. Uz pretpostavku da uzgonski uređaj segmenta troši jednaku snagu i ima nosivost jednaku nosivosti letjelice Parrot AR Drone 2.0, $I_{\mathrm{UAV}} = I$, prethodna jednadžba prelazi u

$$L_{uk} = 2 * \frac{0{,}17\ \mathrm{m}}{\lambda\left(2 * \frac{70}{12}\ \mathrm{A}\right)} \#(4.2)$$

U tablici su navedene te duljine za različite vrste električnih vodova.

Tablica 4.1. Iznosi maksimalne duljine el. voda za slučaj korištenja dva jednaka segmenta voda

Tip električnog voda	Max. duljina voda [m]
SiHF-J 3x0,75	5,15
(N)HXH-J/E90 3x1,5	1,88
FTG10OM1 3x1,5	1,26
Neizolirani bakreni vodič, AWG 14	9,45

Za električne vodove (N)HXH-J/E90 i FTG10OM1 rezultat je samo dvostruka vrijednost one prikazane u tablici. Masivni bakreni el. vod SiHF korišten u prvom dijelu primjera ne može provesti novu maksimalnu vrijednost struje, pa je u ovom primjeru zamijenjen debljom izvedbom – SiHF-J 3×0,75. Veća dozvoljena struja znači i veću masu voda, pa porast nije jednak kao za preostale razmatrane vodove.

U ovom primjeru podrazumijevalo se kako su postavljene određene pretpostavke na tip bespilotne letjelice, snagu uzgonskog uređaja segmenta i napon zemaljske jedinice.

5. ZAKLJUČAK

U radu je razmatrana mogućnost lebdjenja bespilotne letjelice na fiksnoj poziciji tokom znatno dužeg vremena nego što bi se moglo ostvariti napajanjem letjelice baterijom koju ona nosi.

Pretpostavljeno je da se lebdjenje odvija u statičkoj atmosferi. Umjesto izvora energije koji letjelica nosi sa sobom, lebdjenje letjelice omogućeno je napajanje s tla. Veza izvora napajanja i letjelice ostvarena je žičanom vezom od više segmenata. Takva veza ima veću masu nego veza ostvarena jednim električnim vodom, ali je za praksu puno pogodnija jer omogućava jednostavnije i pouzdanije korištenje. Svaki segment ima vlastiti uzgonski uređaj, tako da je u regularnim uvjetima njegov potisak jednak ili veći težini segmenta.

Razmatrane su izvedbe segmenata sastavljene od komercijalno dostupnih segmenata. Segmenti su bili varijabilne dužine i različitih maksimalnih propuštenih struja. Njihov broj bio je određen karakeristikama izvora električne energije u zemaljskoj jedinici. Cilj je bio odrediti maksimalnu visinu, u odnosu na tlo, na kojoj uz navedene pretpostavke može lebdjeti navedena letjelica.

Za razmatrane motore određena je prilagodbena krivulja koja fenomenološki povezuje maksimalnu motora s njegovom masom. Za električne vodove određena je prilagodbena krivulja koja povezuje maksimalnu trajnu struju i linijsku gustoću. Prema podacima za komercijalno dostupne upravljačke cjeline i spojnice na krajevima segmenata, određen je raspon njihovih masa.

Uvjet lebdjenja segmenta oblikovan je u jednadžbu za struju koja u tom slučaju prolazi kroz električni vod. Jednadžba je numerički riješena za cjelokupne raspone pripadnih parametara. Analizom rješenja izdvojena su područja ostvarivih kombinacija parametara, a time i duljine segmenata.

Za snagu reda veličine 500 W i masu bespilotne letjelice oko 0,3 kg, s podjednakom nosivosti moguća ukupna dužina segmenata iznosi između 10 i 20 m.

Ukupna visina smanjuje se povećavanjem broja segmenata, što je posljedica povećanja ukupne mase svih upravljačkih cjelina i spojnica, te veće ukupne mase debljih vodiča. Ako je prioritet maksimalna visina lebdjenja, onda je jedinstveni kabel traženi oblik distribucije napajanja. Ako su uvjeti korištenja sustava takvi da je povećana mogućnost kvarova ili oštećenja, prikladnija je uporaba većeg broja segmenata.

LITERATURA

[1] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Electricity generation“, odlomak „Methods of generation“;
datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[2] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Solar panel“, odlomak „Efficiencies“;
datum posljednjeg pregleda : 15.1.2020.

[3] Wikipedija, https://hr.wikipedia.org/
članak „Solarni članak“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[4] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Lead-acid battery“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[5] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Fuel cell“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[6] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Nickel-metal hydride battery“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[7] https://www.ebay.com/itm/RC-Turnigy-3000mAh-3S-30C-Lipo-Pack-w-XT-60-/253249935398 ; datum zadnjeg pregleda: 15.1.2020.

[8] Enciklopedija.hr, http://www.enciklopedija.hr/
članak „Električni vod“; datum zadnjeg pregleda: 15.1.2020.

[9] Tim-kabel, http://www.tim-kabel.hr/
proizvod „H05V-U“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[10] Tim-kabel, http://www.tim-kabel.hr/
proizvod „H05V-K“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[11] Tim-kabel, http://www.tim-kabel.hr/
proizvod „H05VV-F“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[12] Electrical installation wiki, http://www.electrical-installation.org/
„General method for cable sizing“, datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[13] Power Stream, https://www.powerstream.com/
„Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength“;
datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[14] Instructables.com, https://www.instructables.com/
„Interfacing Brushless DC Motor (BLDC) With Arduino“;
datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[15] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/
članak „Lithium polymer battery“, odlomak „Working principle“;
datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[16] Hobbysquare LLP, https://hobbysquare.com.sg/
proizvod „Onbo 2250mAh 35C 3S Lipo Battery“;
datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[17] Parrot, https://www.parrot.com/
proizvod „Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[18] Amazon, https://www.amazon.com/
proizvod „MJX X800 RC Quadcopter 2.4G 6 Axis Gyro Auto Return 3D Roll Drone Hexacopter UAV Black“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

[19] Parrot, https://www.parrot.com/
proizvod „Parrot Ar.Drone 2.0 Brushless Motor“; datum posljednjeg pregleda: 15.1.2020.

PRILOG: TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

EL. VOD	BROJ VODIČA (n)	NAZIVNI PRESJEK (nxmm^2)	Promjer vodiča [mm]
SiHF-J	3	3*0,5	5,8
SiHF-J	3	3*0,75	6,8
SiHF-J	3	3*1	7,4
SiHF-J	3	3*1,5	8
SiHF-J	3	3*2,5	9,7
SiHF-J	3	3*4	11,5
SiHF-J	3	3*6	14,2

Vanjski promjer [mm]	Debljina izolacije [mm]	Otpor [Ohm/km]
5,8	0,6	40,1
6,8	0,6	26,7
7,4	0,6	20
8	0,6	13,7
9,7	0,7	8,21
11,5	0,8	5,09
14,2	0,8	3,39

Dužinska gustoća kabel	Dužinska gustoća kabela [kg/m	Strujno opterećenje [A]*
44	0,044	9
66	0,066	12
78	0,078	15
98	0,098	18
152	0,152	26
249	0,249	34
352	0,352	44

*30 °C na zraku

EL. VOD	BROJ VODIČA (n)	NAZIVNI PRESJEK (nxmm^2)
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 1,5
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 2,5
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 4
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 6
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 10
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 16
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 25
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 35
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 50
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 70
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 95
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 120
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 150
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 185
(N)HXH- J/ E90	3	3 * 240

Promjer vodiča [mm]	Vanjski promjer [mm]	Debljina izolacije [mm]
1,37	11	0,7
1,74	11,5	0,7
2,26	12,5	0,7
2,66	14	0,7
3,48	16	0,7
4,6	19	0,7
5,8	22,5	0,9
6,8	25	0,9
8	24	1
9,6	27	1,1
11,3	30	1,1
12,7	37,5	1,2
14,1	42	1,4
15,7	46	1,6
18	51	1,7

Otpor [Ohm/km]	Dužinska gustoća kabela [kg/km]
12,1	180
7,41	220
4,61	290
3,08	340
1,83	500
1,16	740
0,727	1110
0,524	1450
0,387	1650
0,268	2300
0,193	3100
0,153	3900
0,124	4800
0,0991	5900
0,0754	7550

Dužinska gustoća kabela [kg/m]	Strujno opterećenje [A]*
0,18	24
0,22	32
0,29	41
0,34	53
0,5	74
0,74	100
1,11	126
1,45	155
1,65	190
2,3	233
3,1	285
3,9	323
4,8	366
5,9	415
7,55	485

* 30 °C na zraku

EL. VOD	BROJ VODIČA (n)	NAZIVNI PRESJEK (nxmm^2)	Promjer vodiča [mm]	Vanjski promjer [mm]	Debljina izolacije [mm]	Otpor [Ohm/km]
FTG10OM1	3	3 * 1,5	1,6	13,5	1	13,3
FTG10OM1	3	3 * 2,5	2	14,5	1	7,98
FTG10OM1	3	3 * 4	2,6	15,5	1	4,95
FTG10OM1	3	3 * 6	3,1	16,5	1	3,3
FTG10OM1	3	3 * 10	4	19	1	1,91
FTG10OM1	3	3 * 16	5	21,5	1	1,21
FTG10OM1	3	3 * 25	6,2	25	1,2	0,78
FTG10OM1	3	3 * 35	7,5	28,5	1,2	0,554
FTG10OM1	3	3 * 50	8,9	33,5	1,4	0,386
FTG10OM1	3	3 * 70	10,9	38	1,4	0,272
FTG10OM1	3	3 * 95	12,1	43	1,6	0,206
FTG10OM1	3	3 * 120	13,6	47,5	1,6	0,161
FTG10OM1	3	3 * 150	15,6	53	1,8	0,129
FTG10OM1	3	3 * 185	17,3	58	2	0,106
FTG10OM1	3	3 * 240	19,4	65,5	2,2	0,0801

Dužinska gustoća kabela [kg/km]	Dužinska gustoća kabela [kg/m]	Strujno opterećenje [A]*
270	0,27	22
325	0,325	31
380	0,38	41
412	0,412	53
615	0,615	74
900	0,9	100
1290	1,29	126
1690	1,69	155
2270	2,27	190
3020	3,02	233
4010	4,01	285
4940	4,94	323
6100	6,1	366
7410	7,41	415
9650	9,65	485

* 30 °C na zraku

Naziv	Masa motora [g]	Masa motora [kg]	Max. snaga motora [W]
Turnigy D2836/8	70	0,07	302
Turnigy D2826-10	50	0,05	205
Turnigy D2830-11	52	0,052	210
Turnigy D2822/14	38	0,038	160
PROPDRIVE v2 4248	231	0,231	1295
FC 28-12	39	0,039	200
Turnigy Aerodrive SK3-6374	858	0,858	4032
FC 28-22	39	0,039	210
Turnigy D2205	28	0,028	290
Turnigy TrackStar 13.5T	178	0,178	255
Turnigy Aerodrive SK3 - 3536	110	0,11	505
PROPDRIVE v2 5060	438	0,438	2665
Turnigy XK3674	310	0,31	1750
Racestar 3660	195	0,195	1200
Flipsky R-6374	860	0,86	3250
Cobra CM-3520	234	0,234	710
Cobra CM-4510	211	0,211	490
Cobra CM-4520	340	0,34	1000
Turnigy 9225-160KV Multistar	329	0,329	1200

```
clear all

%standardna atmosfera
%t=15 °C=288.15 [K]
%p=1.01325 [bar]
ro=1.225; %gustoca zraka, [kg/m3]

g=9.80665; %[m/s^2]

k_m=0.0002; %[kg/W] ili [s^3/m^2]
C_m=0.0226; %[kg]

%eps=G/L
%generirani uzgon mora biti barem 2 puta veci od tezine letjelice
eps=0.5;

%eta=P_h/P_el
%pretvorba elektricne energije u mehanicku u motoru nije bez gubitaka
eta=0.7; %konzervativno! vrijednost je obicno izmedu 0.7 i 0.9

k_lambda1_1=0.0001;     %[kg/m*A^2]
k_lambda1_2=0.00002;
k_lambda1_3=0.00003;

k_lambda2_1=0.003;      %[kg/m*A]
k_lambda2_2=0.0046;
k_lambda2_3=0.0058;

C_lambda1=0.0082;       %[kg/m]
C_lambda2=0.0634;
C_lambda3=0.0832;

lambda1=[k_lambda1_1 k_lambda2_1 C_lambda1]; %SiHF_J
lambda2=[k_lambda1_2 k_lambda2_2 C_lambda2]; %NHXH
lambda3=[k_lambda1_3 k_lambda2_3 C_lambda3]; %FTG1OOM1

m_uk=0.300;     %masa konektora, konstrukcije, ESCa, propova [kg]

%d_in=5:1:11;       %promjer propelera [in]
d_mm=8*25.4;        %promjer propelera [mm]
d_m=d_mm/1000;      %promjer propelera [m]
A=(d_m)^2 *pi/4;    %povrsina rotora u metrima [m^2]

C0=(2*ro*A)^(1/3); %[kg/m^3 * m^2]

U_el=12;        %napon [V]
L_s=0.1:0.1:8;
n=3;
```

```
for i=1:length(L_s);
        C1(i)=L_s(i)*lambda1(1)*n^2;

        C2(i)=4*k_m*U_el + L_s(i)*lambda1(2)*n;

        C3=-4*(1/g)*eps*C0*(eta*U_el)^(2/3);

        C4(i)=4*C_m + m_uk + L_s(i)*lambda1(3);

        p(i,:)=[C1(i) 0 0 C2(i) C3 0 C4(i)];
        I(i,:)=roots(p(i,:)).^3;
        I(imag(I) ~= 0) = 0;
        P_uk(i)=I(i,5)*U_el*4*n;
end
```