

Identifikacija parametara ionske propulzije za upravljanje kutem valjanja letjelice

Greblo, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:316511>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 78

**IDENTIFIKACIJA PARAMETARA IONSKE PROPULZIJE ZA
UPRAVLJANJE KUTEM VALJANJA LETJELICE**

Luka Greblo

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 78

**IDENTIFIKACIJA PARAMETARA IONSKE PROPULZIJE ZA
UPRAVLJANJE KUTEM VALJANJA LETJELICE**

Luka Greblo

Zagreb, lipanj 2024.

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 78

Pristupnik: **Luka Greblo (0036526333)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Automatika i robotika
Mentor: prof. dr. sc. Stjepan Bogdan

Zadatak: **Identifikacija parametara ionske propulzije za upravljanje kutem valjanja letjelice**

Opis zadatka:

Cilj rada je eksperimentalna potvrda već dokazanih efekata s ciljem poboljšanja rada i dubljeg razumijevanja fizikalnih pojava vezanih za ionsku propulziju. Radom na zadatku potrebno je dizajnirati i izraditi postava za mjerenje sile ionske propulzije s ciljem upravljanja jednim stupnjem slobode letjelice. U prvoj fazi rad uključuje izradu ionskog potisnika koji će se ugraditi na element krila letjelice postavljen na mjerni postava. Mjerni postav treba biti usidren za podlogu i imati dva stupnja slobode koji su aktuirani s dva nezavisna potisnika postavljena oko oslonca. Korištenjem mjernog postava potrebno je identificirati sustav i odrediti prijenosne funkcije potisnika.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 078

**Identifikacija parametara ionske
propulzije za upravljanje kutem
valjanja letjelice**

Luka Greblo

Zagreb, kolovoz 2024.

Didu

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Koronalni izboj	2
2.1. Matematički model	2
2.1.1. Modeliranje gibanja iona	5
2.2. Trenutne spoznaje	7
2.3. Očekivani potisak	11
3. Mjerenja	12
3.0.1. Mjerne komponente	13
3.1. Mjerni postav	14
3.2. Izvođenje mjerenja	18
3.2.1. Programsko rješenje mjerenja	18
3.2.2. Provođenje mjerenja	19
4. Postupak identifikacije	22
4.0.1. Proračun inercije	22
4.0.2. Određivanje početnih parametara	24
4.0.3. Usporedba modela identifikacije	27
4.0.4. Identifikacija parametara potisnika	30
4.1. Potisak	34
4.2. Upravljanje postavom	40
5. Primjena na letjelici	43
5.1. Profili krila	44
5.2. Modeliranje letjelice	47
5.3. Analiza letjelice	49
6. Zaključak	56
Literatura	57

1. Uvod

Ionska propulzija, iako često povezana sa svemirom, također pruža značajne mogućnosti za poboljšanje performansi letjelica u atmosferskim uvjetima. Jedna od ključnih komponenti ovog tehnološkog pristupa je koronalni izboj, koji igra centralnu ulogu u stvaranju potiska bez pokretnih dijelova. Uz to, korištenje kombinacije potisnika na postavu koji predstavlja letjelicu dodatno otvara puteve za upravljanje valjanja letjelice, što je bitno za njenu stabilnost i kontrolu.

Cilj ovog rada je detaljna analiza parametara sustava koji se sastoji od dva potisnika ovješena na suprotnim krakovima poluge oslonjene o kuglične ležajeve te identifikacija parametara prijenosne funkcije u kontekstu ionske propulzije. Istaknuta vrijednost ovog istraživanja leži u integriranju upravljanja kutom valjanja letjelice putem parametara ovog sustava. Kut valjanja, kao ključni faktor, ima značajan utjecaj na stabilnost i upravljivost letjelica, posebno u promjenjivim atmosferskim uvjetima.

Analiza ovih parametara je ključna za optimizaciju performansi ionske propulzije u atmosferskim uvjetima, uzimajući u obzir izlazne brzine, trajanje letova te efikasnost pogona. Ovaj rad koristi kombinaciju eksperimentalnih rezultata, teorijskih modela i numeričkih simulacija kako bi pružio sveobuhvatan pregled faktora koji utječu na rad ovog složenog sustava.

Važno je istaknuti da dobiveni rezultati imaju potencijalne implikacije izvan područja svemirskih letova. Visoka preciznost i kontrola fluidnih sustava pod utjecajem elektromagnetskih polja koje pruža ionska propulzija mogu biti korisne u različitim tehničkim disciplinama.

U nastavku će biti detaljno opisan eksperimentalni postav, metodologija mjerenja te analiza dobivenih rezultata s ciljem identifikacije ključnih parametara i karakteristika prijenosne funkcije sustava dva potisnika ovješениh na polugu.

2. Koronalni izboj

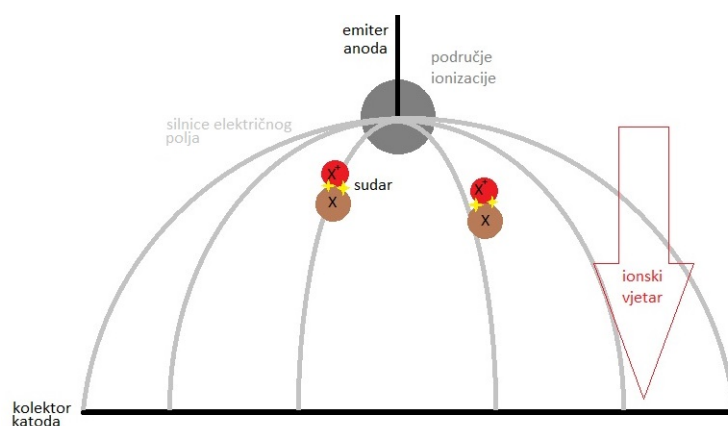
2.1. Matematički model

Ionska propulzija zasnovana je na ionizaciji atoma sredstva (plina) koja se odvija pod utjecajem visokog napona između dviju elektroda odmaknutih u sredstvu koje se ionizira. Plin u kojem su elektroni odvojeni od iona te se slobodno gibaju sredstvom, nalazi se u stanju koje se naziva plazma. Pri ionizaciji zraka razlikuje se nekoliko regija plina u blizini elektroda te se svojstva naglo mijenjaju na granicama. Regije oko elektroda su područja koronalnog izboja i područje električnog luka koji povezuje elektrode uz napone dovoljno visoke za probijanje otpora zraka i prelaska u vodljivi režim fluida. Prije prelaska u vodljivi režim iskrenja nakon napona proboja zraka, za vrijeme koronalnog izboja ioni putuju između elektroda te uslijed interakcija s neioniziranim dijelom sredstva stvara gibanje. Ovaj efekt naziva se ionski vjetar (engl. *ionic wind*), koji je generiran ionizacijom plina (stvaranjem plazme). Izvedba ionskog propulzora sastoji se od anode i katode koje su odvojene specifičnim razmakom ovisno o sredstvu u kojem se nalaze, naponu koji je doveden te geometrijskim svojstvima ovisno o ciljanom vladanju. Razlikuju se dvije vrste propulzora na temelju raspodjele elektroda, odnosno radi li se o pozitivnom ili negativnom koronalnom izboju.

Uzevši u obzir standardni sastav zraka koji glasi:

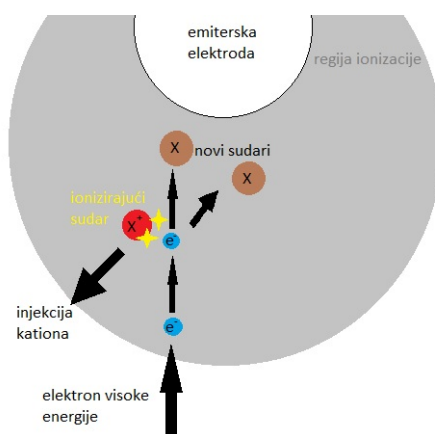
- 78.084% dušik,
- 20.946% kisik,
- 0.934% argon,
- 0.036% ugljikov dioksid,

moгуće je pojednostaviti model kao ionizaciju samo dušika (N_2) i kisika (O_2), što čini ukupno 99.03% ukupnog fluida. Geometrija sustava u kojem je emiter točkasti izvor visokog napona postavljena iznad kolektora prikazan na Slici 2.1 oznakom X uz to je prikazan atom kisika ili dušika zbog preglednosti. Dominantna reakcija koja se događa pri sudarima je $e^- + X \longleftrightarrow 2e^- + X^+$.



Slika 2.1: Shema sudara iona pri visokom naponu i generiranje ionskog vjetra

Uz direktnu ionizaciju u području ionizacije oko elektrode dolazi i do lavine multiplikacije ionizacije pri kojoj se slobodni elektroni nasumično sudaraju te uslijed velike količine energije koju nose imaju mogućnost stvaranja novih iona uslijed sudara. Ovaj fenomen poznat je kao Townsendova lavina, a princip je prikazan na Slici 2.2. Ovakav izboj dovodi do velikog povećanja u vodljivosti materijala te time čini ključni korak u stvaranju iskrenja i proboja zraka pri naponu većem ili jednakom specifičnom proboju zraka u danim uvjetima.



Slika 2.2: Nastanak Townsendove lavina

Kako bi bilo moguće ispravno matematički modelirati sustav koronalnog izboja i povezanih efekata potrebni su modeli više fenomena. Neki od značajnijih efekata su:

- električna struja uslijed gibanja iona
- toplinska energija koja utječe na gibanje i brzine molekula
- Jouleovi efekti koji utječu na svojstva fluida

Uzimajući otvorenu domenu (neograničeni prostor) Ω u smjerovima u kojima jednu stranicu ne zatvara kolektorska elektroda prema Slici 2.1, Ω predstavlja područje prostora koje je ispunjeno pretežno neutralnim fluidom i pozitivno nabijenim ionima. Područje ionizacije

oko emitera je zanemarivo s obzirom na ukupnu putanju između elektroda te je na Slici 2.1 ona ilustrativno prikazana preuveličano.

Formulacija Poissonove jednadžbe za unipolarne ione u fluidu glasi:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = -\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = qN_p \quad (2.1)$$

Sprega s kontinuitetom električne struje definira se jednadžbom 2.2:

$$\frac{\partial qN_p}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (2.2)$$

U gore navedenim jednadžbama ϵ je električna permitivnost zraka, $\vec{E}$ vektor električnog polja, ϕ električni potencijal, N_p broj protona te je q jedinični naboj. Sprega je u parcijalnim diferencijalnim jednadžbama povezana kroz gustoću struje $\vec{j}$, koja se povezuje s tri različita efekta: zanošenje uslijed djelovanja električnog polja, advekcija i difuzija, kao što je prikazano u jednadžbi 2.3:

$$\vec{j} = qN_p \cdot \mu \vec{E} + qN_p \vec{v} - qD \nabla N_p \quad (2.3)$$

Koeficijent μ predstavlja mobilnost iona u fluidu te će biti dodatno prikazan u nastavku rada kao i njegova uloga u analitičkim izrazima nužnim za uvedene aproksimacije, dok je $\vec{v}$ ukupna brzina fluida. Konstantu D nazivamo difuzijskom konstantom, koja je povezana s mobilnošću i temperaturom T prikazanom u Einsteinovoj jednadžbi, uz k_B kao Boltzmannovu konstantu:

$$D = \mu k_B T q^{-1} \quad (2.4)$$

Aerodinamički efekti nekompresibilnog Newtonskog fluida opisani su Navier-Stokesovim jednadžbama 2.5, koje predstavljaju očuvanje mase i količine gibanja:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} &= \nu \nabla^2 \vec{v} - \nabla \tilde{p} + \frac{\vec{F}_{\text{EHD}} + \vec{F}_B}{\rho} \\ \nabla \cdot \vec{v} &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdje je ν kinematički viskozitet, $\tilde{p}$ modificirani (efektivni) tlak u polju, $\vec{F}_{\text{EHD}}$ elektromagnetske sile koje čine Lorentzovu silu u režimu elektrohidrodinamičkih efekata te $\vec{F}_B$ sila zanošenja koja djeluje na fluid u prisutnosti magnetskog polja.

Prebacivanjem pažnje na zadnji član jednadžbe 2.5 sastoji se od sume sila koje su elektrohidrodinamička F_{EHD} 2.18 i uzgona F_B . Pošto se radi o jednom toku uniformnog fluida (zraka) i ograničenog temperaturnog gradijenta sila koja proizlazi iz elektrohidrodinamike i veličine samog postava moguće je uvesti Boussinesqovu aproksimaciju oko referentne temperature T_{ref} :

$$\vec{F}_B = \vec{g}[\rho(T) - \rho] = \vec{g}[\rho \beta_{\text{exp}}(T_{\text{ref}})(T - T_{\text{ref}})] \quad (2.6)$$

gdje su β_{exp} termalni koeficijent proširenja i $\rho(T)$, varijabilna gustoća, ovisna o temperaturi oko točke linearizacije (temperature i gustoće). Zaključno za termodinamiku vrijedi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T - \frac{k}{\rho C_V} \nabla^2 T = \frac{\dot{Q}}{\rho C_V} \quad (2.7)$$

gdje je k toplinska vodljivost, a C_V specifični kapacitet mase. Toplinsku snagu koja se razvija, $\dot{Q}$, je moguće raspisati kao Jouleovo zagrijavanje uslijed djelovanja $\vec{j}$ i mehaničke snage razvijene uslijed gibanja iona F_{EHD} :

$$\dot{Q} = \vec{j} \cdot \vec{E} - \vec{v} \cdot F_{\text{EHD}} = (qN_P\mu\vec{E} - qD\nabla N_P) \cdot \vec{E} \quad (2.8)$$

2.1.1. Modeliranje gibanja iona

Kako bi se pokrenulo koronalno pražnjenje, pad napona između emitera i kolektora mora premašiti određeni prag vrijednost koji označavamo s V_0 , dok je odgovarajuća jačina električnog polja na emiteru označena s E_0 . Opće prihvaćena Kaptsovljeva hipoteza (Kaptsov, 1947) kaže da slobodni naboj, emitiran koronalnim pražnjenjem pri naponima višim od V_0 rezultira "zadržavanjem" jačine električnog polja emiteru na vrijednosti E_0 . Iako V_0 jako ovisi o cjelokupnoj geometriji uređaja, eksperimentalni dokazi pokazuju da je E_0 strogo povezan s polumjerom zakrivljenosti kolektorske elektrode Peek (1929). Na mikroskali, koronalno pražnjenje se generira udarnom ionizacijom molekula plina i lavinskom multiplikacijom elektrona. Prema lavinskom modelu koji je prvi razvio Townsend i objavio u knjigama: Townsend i Edward (1910) i Townsend (1915), kationi se generiraju u području koje karakterizira skup točaka $\vec{x} \in \Omega$ takav da:

$$\gamma_T \exp \left(\int_{L(\vec{x})} \alpha_T(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \right) \geq 1 \quad (2.9)$$

Parametri γ_T i α_T ovise o primijenjenom električnom polju, tlaku i kemijskom sastavu plina i elektroda, dok je $L(\vec{x})$ putanja negativno nabijenih čestica koje kreću s emitera i putuju do točke $\vec{x}$ zbog sile električnog polja. Iako nije praktično važna kada prostorni naboj nije zanemariv, relacija 2.9 daje grubu procjenu debljine ionizacijskog područja gdje se plin može smatrati plazmom. Ta debljina uvelike ovisi o geometriji, tlaku fluida i električnom polju. U režimu koronalnog izboja ona je toliko mala u usporedbi s duljinom neutralnog područja fluida da ima smisla koristiti objedinjeni model za ionizacijsko područje i predstaviti ga kao dio površine emitera. U ovoj aproksimaciji, jedini nositelji naboja unutar područja fluida su kationi kako je i opisno u radu Peek (1929).

Uzevši opći oblik modeliranja stope ubrizgavanja kationa u regiju glavnog fluida. S ciljem opisa sustava potrebno je odrediti rubni uvjet odnosno u ovom slučaju jednadžbu rubnog uvjeta Robinovog tipa kao u jednadžbi 2.10 u kojoj Γ_A označava površinu emitera:

$$\alpha N_p|_{\Gamma_A} + \beta \partial_{\mathbf{n}} N_p|_{\Gamma_A} = \kappa \quad (2.10)$$

gdje je $\partial_{\vec{n}} N_p = \nabla N_p \cdot \vec{n}$ komponenta gradijenta gustoće iona normalna na Γ_A . Uvjet 2.10 općenito će biti nelinearan jer dopušta koeficijente α , β i κ koji lokalno ovise o normalnoj komponenti $E_n = \vec{n} \cdot \vec{E}|_{\Gamma_A}$ i o gustoći iona $N_p|_{\Gamma_A}$. Najčešći pristup korišten u numeričkim studijama pozitivnog korona pražnjenja koji se pojavljuje u Mazumder i Lai (2011) Mazumder et al. (2011) sastoji se u postavljanju struje i_m tako da na emiteru bude jednaka eksperimentalno izmjerenoj vrijednosti i_m . To vodi do sljedećeg izbora parametara u 2.10:

$$\begin{aligned}\alpha_1 N_p|_{\Gamma_A} + \beta_1 \partial_{\mathbf{n}} N_p|_{\Gamma_A} &= \kappa_1, \\ \alpha_1 &= -q\mu E_n, \\ \beta_1 &= qD, \\ \kappa_1 &= \frac{i_m}{s}\end{aligned}\tag{2.11}$$

Vidljivo je da se prema 2.11 model temelji na dodatnoj pretpostavci da je komponenta gustoće ionske struje kao $j_n = \vec{n} \cdot \vec{j}|_{\Gamma_A}$ normala na kontakt jednoliko raspoređena duž Γ_A (što predstavlja uniformnu razdiobu). Ova posljednja pretpostavka, zajedno s činjenicom da je potrebno poznavanje izmjerene vrijednosti struje za svaku vrijednost primijenjenog napona, značajno ograničava sposobnost simulacija i izračuna koji su temeljeni na jednadžbama 2.11 što onemogućuje pružanje korisnih informacija o utjecaju geometrije kontakta emitera na performanse uređaja. Postoji modifikacija za modeliranje brzine kojom se kationi ubrizgavaju u područje fluida. Kako bi bilo moguće pojednostaviti izračun iz kojeg je moguće izvesti jednadžbu prema 2.23 koja je korištena u Sigmond (1982), a predložena prema Thomas Christen (2005)

$$j_n = wN_p - j_{\text{sat}}H(E_n - E_0)\tag{2.12}$$

gdje $H(x)$ označava Heavisideova funkciju skoka. Parametri koji se pojavljuju u 2.12 su maksimalna dozvoljena gustoća struje j_{sat} , prag električnog polja E_0 za stvaranje ionizacije, te proporcionalna konstanta w (dimenzije brzine pomnožene s električnim nabojem) između struje povratnog raspršenja i količine iona nakupljenih u regiji prostornog naboja na emiteru. Ovaj model je moguće predstaviti kao struju kontroliranu prostornim nabojem. Korištenjem 2.12 za određivanje koeficijenata općeg izraza 2.10 dolazimo do

$$\begin{aligned}\alpha_2 N_p|_{\Gamma_A} + \beta_2 \partial_{\mathbf{n}} N_p|_{\Gamma_A} &= \kappa_2, \\ \alpha_2 &= w - q\mu E_n, \\ \beta_2 &= qD, \\ \kappa_2 &= j_{\text{sat}}H(E_n - E_0).\end{aligned}\tag{2.13}$$

Iako ovaj model ne zahtijeva prethodno znanje o gustoći struje, čime se naizgled rješava glavni problem modela 2.12, kvaliteta njegovih predikcija kritično ovisi o ispravnom izboru parametara j_{sat} i w , te se čini da je, u nekim relevantnim praktičnim situacijama, prilično loša

ako se tim parametrima daju vrijednosti neovisne o pristranosti. Poboljšanjem je moguće uvesti još daljnje promjene modela 2.12 kod κ_2 u κ_3 tako da se model definira kao:

$$\begin{aligned}\alpha_3 N_p|_{\Gamma_A} + \beta^2 \partial_{\mathbf{n}} N_p|_{\Gamma_A} &= \kappa_3^2, \\ \alpha_3 &= w - q\mu E_0, \\ \beta_3 &= qD, \\ \kappa_3 &= q\mu E_n N_p|_{\Gamma_A}\end{aligned}\tag{2.14}$$

Pristup prikazan u modelu opisanom jednadžbom 2.14 ima samo jedan parametar kojega je relativno lako odrediti, čak i aproksimativno, a to je E_0 , no pod cijenu nelinearnosti na granici kroz $N_p|_{\Gamma_A}$, što u stacionarnom stanju polja kakva su u ovome radu razmatrane omogućuje, jednostavnu linearizaciju u ustaljenom stanju.

2.2. Trenutne spoznaje

Koronalni izboj događa se između elektrode s oštro zakrivljenom površinom, poput oštrice ili tankog vrha žice te površinom veće, no oblikom mnogo manje zakrivljene površine ili čak ravnine. Vrh ili žica nazivaju se emiter elektrodom i mogu biti pozitivno ili negativno nabijene u odnosu na suprotnu elektrodu. Druga elektroda naziva se kolektorskom elektrodom i suprotnog je polariteta ili uzemljena u odnosu na emitorsku elektrodu. Koronalni je izboj oblik svjetlosti u kojem se, osim u malom području oko emitera, struja prenosi isključivo pomoću iona. Napon između emitorske i kolektorske elektrode postavlja se u red veličine kV u zraku pod atmosferskim tlakom te taj napon može biti pozitivan ili negativan ovisno o naboju na emitorskoj elektrodi. Uslijed veoma male veličine emitera stvara vrlo veliko lokalno električno polje u blizini oštrog ruba, reda veličine električnog polja u zraku, u bliskoj okolini emitorske elektrode, iznosi 10^7 V/m. Tolika jakost električnog polja dovodi do elektronske emisije iz čega slijedi ako je emiter pozitivno nabijen, elektroni će se vratiti emiteru, ali će pri tom proći kroz sudare s molekulama zraka, stvarajući pozitivno nabijene ione. Time će nastali ioni biti odbačeni od emitera i privučeni prema kolektoru čime će nasumično doći do sudara s molekulama zraka, dajući im moment i time generirajući ionski vjetar koji je osnova za stvaranje potiska. Područje u kojem se ioni stvaraju vrlo je malo u usporedbi s udaljenosti između emitera i kolektora, tako da većina područja pražnjenja dominira ionskom strujom. Debljina δ (mm) ionizacijskog područja može se izračunati prema radu E.A. i P.S. (1967)

$$\delta = \sqrt{a}\tag{2.15}$$

gdje je a (mm) radijus vrha emitera iz kojeg se javlja koronalni izboj. Ako se primijenjeni napon previše poveća i približi se naponu proboja zraka dolazi od iskrenja za tu duljinu

zračnog rasporeda, a svjetlost korone prelazi u iskrinu. Christenson i Moller E.A. i P.S. (1967) pokazali su da potisak koji proizvodi ionski vjetar u zraku, $T(N)$, može se zapisati kao:

$$T = \frac{I \cdot d}{\mu} \quad (2.16)$$

gdje je I - struja u pražnjenju (A), d je raspon između elektroda emitera i kolektora (m), a μ je ionska mobilnost ($m^2/V - sec$). S obzirom na potisak izražen kao potisak po jedinici snage θ moguće ga je prikazati kao:

$$\theta = \frac{T}{IV} = \frac{\frac{d}{V}}{\mu} = \frac{1}{E\mu} \quad (2.17)$$

gdje je V primijenjeni napon, a E prosječno električno polje, definirano kao $E = \frac{V}{d}$. Problem korištenja ionske propulzije kao pogona je vidljiv u jednadžbi 2.17 budući da bi se postigao visoki omjer potiska prema snazi, električno polje mora biti nisko, što implicira nisku struju, a time i nizak potisak prema jednadžbi 2.15. Alternativa je imati nisku mobilnost. Mobilnost zraka poznata je i ovisi o vlažnosti Tyndall i Grindley (1926), ali varira samo od vrijednosti $1.6 \times 10^{-4} m^2/Vs$ za suhi zrak do 2.15×10^{-4} za zasićeni zrak. Iz eksperimenata Christenson i Moller E.A. i P.S. (1967) zaključeno je da učinkovitost pogona iznosi oko 1%, što je premalo za bilo kakvu praktičnu primjenu. Njihov maksimalno izmjereni potisak bio je oko 0.45 N, s površinom protoka otprilike $0.1 m^2$, a omjer potiska prema snazi bio je 21 N/kW. Jedina geometrijska varijabla u eksperimentu bila je udaljenost između elektroda. Počevši od jednadžbe 2.15 može se izvesti vrlo jednostavno pretpostavljajući, kao što je to učinjeno u radu E.A. i P.S. (1967), da je električno polje uniformno u glavnom dijelu koronalnog pražnjenja, s primijenjenim naponom V . Budući da više nema iona nakon što su ioni napustili područje visokog polja oko vrha, umnožak gustoće iona, n_i , i presjeka pražnjenja A koji će biti konstantan. Svaki ion će doživjeti elektrostatičku silu, T_i , definiranu kao:

$$T_i = eE \quad (2.18)$$

gdje je e jedinični naboj, a naravno postoje jednake i suprotne sile na elektrodama. Ukupna sila svih iona na elektrodama tada je:

$$T = NT_i = NeE \quad (2.19)$$

gdje je N , ukupan broj iona u pražnjenju, jednostavno $N = n_i Ad$. Struja pražnjenja dana je:

$$I = n_i e v_i A \quad (2.20)$$

gdje je v_i prosječna brzina iona

$$v_i = \mu E \quad (2.21)$$

Slijedi da je ukupna sila na elektrodama:

$$\begin{aligned}
 T &= NeE \\
 &= n_i AdeE \\
 &= \frac{(n_i e v_i A) dE}{\mu E} \\
 &= \frac{Id}{\mu}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

što se poklapa s jednadžbom 2.15. Ovo pokazuje da je potisna sila povezana s ionskim vjetrom jednostavno elektrostatičko odbijanje anode odnosno privlačenje katode na oblak iona u pražnjenju. Drugi način za određivanje struje u mirnom zraku je korištenjem Townsendovog zakona koji glasi:

$$I = C \cdot V \cdot (V - V_0) \tag{2.23}$$

Gdje je C konstanta koja opisuje probojna svojstva fluida s mjernom jedinicom $A^3 s^6 / (m^4 kg^2)$, V_0 napon pri kojem počinje utjecaj ionizacije te V napon koji je doveden na zračni raspor. S ciljem numeričkog određivanja struje potrebno je provesti integraciju gustoće naboja kroz cijelo područje ionizacije no moguće je uvesti pojednostavljenje koje pretpostavlja uniformnu gustoću naboja u cijelom području ionizacije kao gustoću naboja danom s ρ_c u području površine A prema radu Sigmond (1982) te je zadana brzina iona označena kao v_i sukladno jednadžbi 2.20 gdje je gustoća zamijenjena pojedinačnim česticama.

$$I = \rho_c \cdot v_i \cdot A \tag{2.24}$$

Nadalje nužno je dodati i brzinu okolnog fluida unutar kojeg se kreće sam potisnika u tom slučaju ukupna brzina iona v_i tada je sastavljena kao zbroj brzina okolnog fluida v_f i ubrzanе čestice u polju E unutar fluida na temelju mobilnosti μ :

$$v_i = v_f + \mu E \tag{2.25}$$

Brzina iona u gore navedenom izvodu ovisila je o ionskoj mobilnosti, koja se određuje sudarima iona sa+ zrakom kroz koji putuju. Sam ionski vjetar stvara se pri svakom sudaru iona s molekulom zraka, što ometa kretanje iona prema katodi i ubrzava zrak. Ilustrirat će to jednostavan model sudara. Ioni su u uniformnom polju, pa će se ubrzavati pod konstantnim ubrzanjem a , dano kao:

$$a = eE/m_i \tag{2.26}$$

gdje je m_i masa iona. Na putu duljine λ , tj. srednje slobodne staze iona u zraku, ion će se sudariti s molekulom zraka. Ako se dodatno pretpostavi da će se u ovom sudaru ion dovesti

do zaustavljanja, a molekula zraka dobiti svu količinu gibanja koju je ion imao prije sudara, tada će ion prevaliti udaljenost λ u vremenu t tako da:

$$\lambda = at^2 \quad (2.27)$$

iz čega proizlazi prosječna brzina iona kao:

$$\begin{aligned} v_i &= \frac{\lambda}{t} \\ &= \frac{at}{2} \\ &= \frac{eE}{2m_i} \cdot \sqrt{\frac{2m_i\lambda}{eE}} \\ &= E \sqrt{\frac{e\lambda}{2m_iE}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

no v_i/E je mobilnost μ iz čega slijedi:

$$\mu = \sqrt{\frac{e\lambda}{2m_iE}} \quad (2.29)$$

Rezultat da je μ kao proporcionalan s inverznim korijenom polja podudara se s rezultatima za ione u zraku pod visokim električnim poljem prema navodu Sigmond (1982). Na udaljenosti puta d između emitera i kolektora, svaki ion će doživjeti d/λ sudara. Na svakom sudaru ion predaje zraku impuls $2m_iv_i$. To pretpostavlja sudare uglavnom s jednakom masom iona i molekulama zraka. Dakle, ukupni impuls sile koji se daje zraku uzevši u obzir vrijeme od moguće je tumačiti kao silu koja ubrzava zrak, F_{EHD} , je:

$$F_{\text{EHD}} = n \cdot 2m_iv_i \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (2.30)$$

pri čemu je n broj iona koji dolazi do kolektora u jedinici vremena (s) što je moguće prikazati kao promjenu naboja u vremenu odnosno po ionu $= I/e$. Uvrštavanjem te činjeice u jednadžbu 2.28 kao i jednadžbe 2.30 za v_i , u jednadžbu koja uvodi fizikalnu konstantu mobilnosti μ 2.29, sila koja ubrzava zrak je:

$$F_{\text{EHD}} = I \cdot d \sqrt{\frac{2m_i \cdot E}{e\lambda}} \quad (2.31)$$

Kompleksno određivanje mobilnosti elektrona u zraku nije moguće izbjeći samim uvrštavanjem mobilnosti 2.29 na odgovarajući član već je moguće izbjeći korištenje električnog polja uvrštavanjem u jednadžbu 2.31 te je takav rezultat vidljiv kao jednadžba 2.32:

$$F_{\text{EHD}} = \frac{I \cdot d}{\mu} \quad (2.32)$$

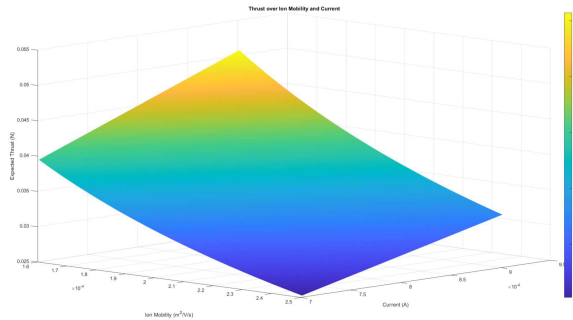
Dakle, vidi se da je sila koja ubrzava zrak, tj. sila koju stvara ionski vjetar, ista kao potisak na elektrodama, koji je sam reakcija na električnoj sili na ione.

2.3. Očekivani potisak

Prema jednadžbama opisanim u prethodnom poglavlju moguće je izvesti očekivani iznos potiska. Jednadžba 2.31 opisuje odnos razvijenog potiska u ovisnosti o struji, udaljenosti i svojstvima zraka. Udaljenost je lako izmjeriti dok je iznos mobilnosti iona kao i struju izvora teško odrediti pošto se radi o polju koje se izrazito brzo urušava uslijed izboja. Za visokonaponske generatore temeljene na *flyback* transformatorima očekivana je efikasnost η od 70% do 90%. Mjerenjem ulaznog napona i struje pokazano je da je pri radnom naponu iznosa 5 V, struja koja ulazi u visokonaponski sklop, iznosa 3.64 A. Iz napona i struje moguće je izračunati ulaznu snagu P_{in} te preko očekivane efikasnosti i izlaznog napona pretpostaviti iznos struje koji prolazi kroz ionizirani zrak. Napon je određen pri vlazi od 61% i temperaturi od 29°C uz tlak zraka od 1018.2 hPa. Elektrode su pomicanе s veće udaljenosti prema manjoj dok se električni luk nije zatvorio na 16 mm. Paschenov zakon (Paschen, 1889) opisuje električnu probojnost plinova kao funkciju tlaka i udaljenosti između elektroda. Matematički, zakon se izražava kao:

$$V_b = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma})]} \quad (2.33)$$

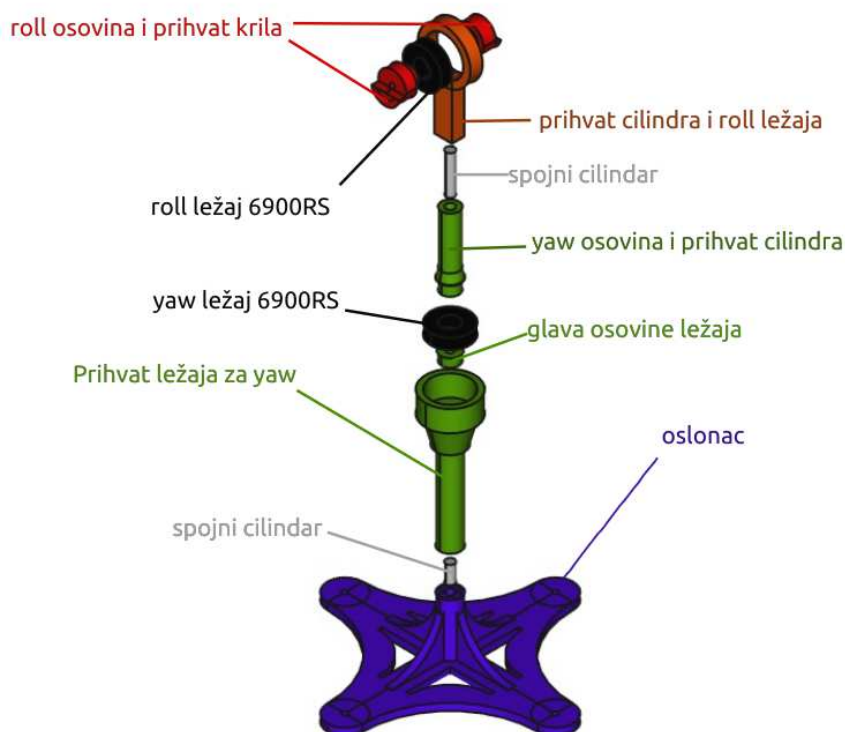
gdje su V_b napon proboja, p tlak, d razmak između elektroda, A i B konstante specifične za plin ovisne u trenutnom stanju plina te u mjernim uvjetima iznose $A \approx 75.5 \text{ Pa}^{-1} \text{ m}^{-1}$ i $B \approx 115.5 \text{ V Pa}^{-1} \text{ m}^{-1}$, te γ koeficijent sekundarne ionizacije koji se uobičajeno uzima za zrak u vrijednosti od oko 0.01. Ovaj zakon omogućuje predviđanje napona potrebnog za električni proboj ovisno o uvjetima tlaka i razmaku između elektroda te je prema tome određeno da izlazni napon pri 5 V iznosi $U_{out} = 18.46 \text{ kV}$. Time je određen izlazni napon, a uz poznatu efikasnost sustava, koristeći moguću efikasnost kao $I_{out} = P_{out} \cdot I_{out} \cdot \eta$. Iz ovog je izraza dobiven iznos u rasponu od 0.7 mA do 0.9 mA. Uvrštenjem tih podataka u 2.31 za cijeli raspon mogućih mobilnosti iona μ moguće je prikazati potisak kao funkciju tih dviju varijabli što je prikazano na slici 2.3. Ovaj izračun vrijedi za jedan izvor ionizacije i ravnu plohu okomitu na izboj dok će za ovaj postupak biti korištena ploha koja je usmjerena paralelno s izvorima ionizacije.



Slika 2.3: Vrijednost potiska za očekivane mobilnosti i struju

3. Mjerenja

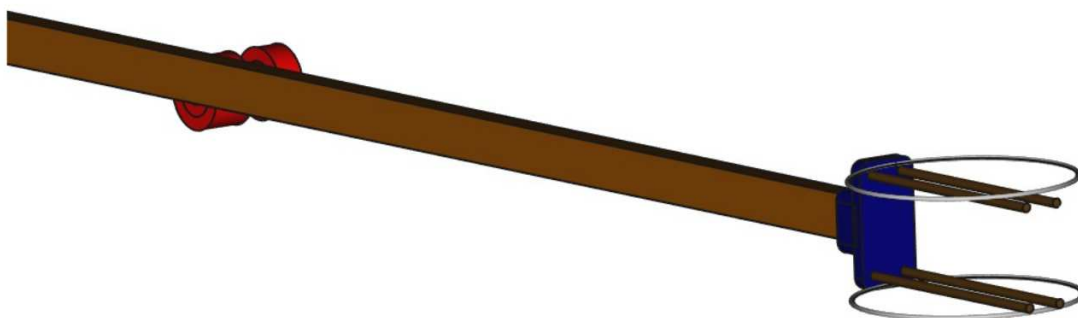
U svrhu mjerenja parametara sustava ionske propulzije u ovom će radu biti korišten postav s dva stupanja slobode. Jedan stupanj slobode može biti konfiguriran kao *pitch* ili *roll* (valjanje) koji će biti temelj ovog rada te dodatni stupanj slobode koji predstavlja *yaw* (zaošijanje) kako bi bilo moguće pratiti efekte sprege između valjanja i zaošijanja (*adverse yaw*). Postav je modularan te je moguće ukloniti komponentu koja dodaje zaošijanje u sustav. Postav se sastoji od oslonca u koji se umeće aluminijski valjak promjera 5 mm. Na njega se može staviti prihvat s ležajem koji je okomit na podlogu te predstavlja valjanje ili dodati komponenta koja omogućuje zaošijanje. U kuglični ležaj koji predstavlja valjanje se umeću dvije komponente koje služe, jedna kao osovina kroz ležaj, a druga kao oslonac modelu krila ili letvi klackalice. Detaljan prikaz postava sa svim dijelovima prikazan je na Slici 3.1 Potisnici



Slika 3.1: Dijelovi postava

moгу biti konfigurirani na krajevima letve klackalice, duž letve te duž krila. Potisnici na

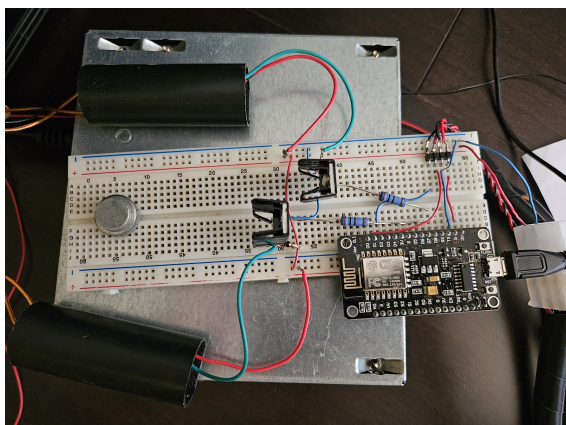
krajevima letve prikazani su na Slici 3.2 kao torus od kojih je jedna emiter, a drugi kolektor. Konfiguracija je simetrična oko oslonca tj. oko osovine za *roll*.



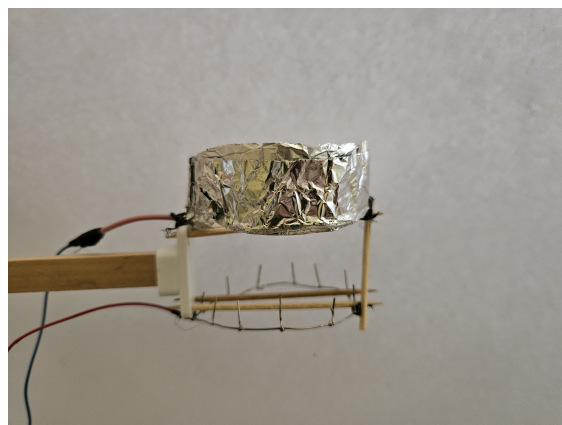
Slika 3.2: Letva s potisnikom na kraju

3.0.1. Mjerne komponente

Pokus se provodi mjerenjem kuta na kojem se postav nalazi te paralelnim snimanjem ulaznog signala. Za vezu između postava i računala koristi se razvojna ploča NodeMCU ESP8266. Komunikacija je izvedena putem serijskog terminala. Za određivanje kuta se koristi MPU6050 senzor koji u jednom kućištu sadrži žiroskop i akcelerometar. Visokonaponski su transformatori povezani u mikrokontroler ESP8266 u NodeMCU razvojnom kućištu. Na GPIO priključcima se generira PWM (*Pulse Width Modulation*) signal koji ulazi u tranzistore IRFZ44N kao upravljački signal, a uključuju i isključuju visokonaponske generatore. Programiranje sklopa i komunikacija s računalom je izvedeni su korištenjem programskog paketa Arduino IDE. Sustav je postavljen na tzv. *breadboard*. S ciljem smanjenja struje koju razvojna ploča mora dati za dovođenje MOSFET-a u vodljivo stanje postavljeni su otpornici iznosa $200\ \Omega$ i snage $2\ \text{W}$. Između *Gate*-a i *Source*-a postavljen je otpor iznosa $10\ \text{k}\Omega$ kako bi pomogao pri pražnjenju parazitnih kapaciteta kao i Zenerova dioda iznosa napona proboja (*breakdown voltage*) od $5.1\ \text{V}$ kako bi se sklop dodatno osigurao od induktivnih smetnji. MOSFET-i su postavljeni u hladnjake te je korištena termo-pasta s ciljem što boljeg prijenosa topline.



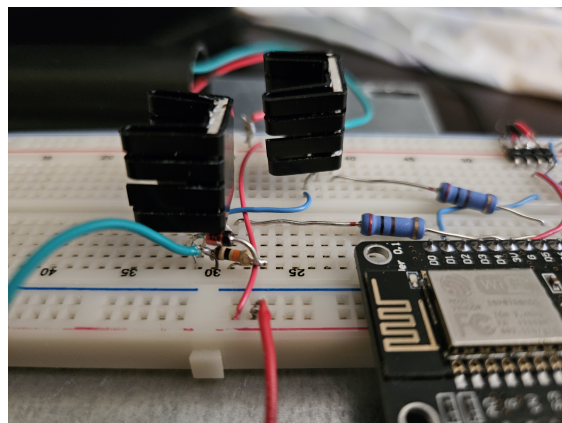
(a) Breadboard s komponentama



(b) Potisnik s 10 emitera i jednim kolektorom



(c) Postavljen akcelerometar

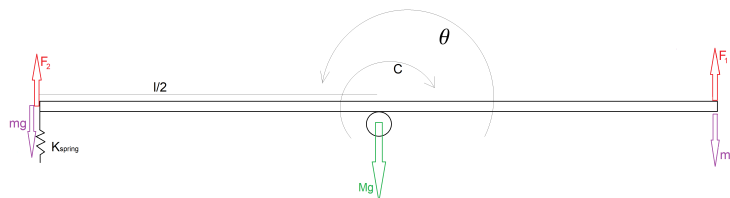


(d) Zaštita MOSFET-a

Slika 3.3: Razdioba tlaka po vremenskim trenucima u geometriji točke i plohe

3.1. Mjerni postav

Za izvod jednadžbe kretanja bit će korišten drugi Newtonov zakon za rotacijski pokret. Skica postava s označenim fizikalnim veličinama prikazana je na Slici 3.4.



Slika 3.4: Skica postava

- M = masa klackalice
- m = masa potisnika
- F_1 = sila potiska koju stvara lijevi potisnik
- F_2 = sila potiska koju stvara desni potisnik
- l = duljina klackalice
- g = ubrzanje slobodnog pada
- J = moment inercije klackalice oko njenog središta mase
- θ = kut zakreta klackalice u odnosu na ravninu podloge
- $\dot{\theta}$ = kutna brzina klackalice
- $\ddot{\theta}$ = kutna akceleracija klackalice
- C = koeficijent trenja
- K_{spring} = konstanta opruge

Prvo, ukupan moment sila koji djeluje na klackalicu je jednak momentu inercije pomnoženom s kutnom akceleracijom prema jednadžbi 3.1

$$\sum \tau = J \cdot \ddot{\theta} \quad (3.1)$$

Poznavajući moment τ je definiran kao sila na kraku te uvrštavanjem raspoloživih sila potisnika slijedi jednadžba 3.2 gdje su uvrštene sile potisnika, smetnja trenja i utjecaj opruge

$$J \cdot \ddot{\theta} = F_2 \frac{l}{2} - F_1 \frac{l}{2} - C\dot{\theta} - K\theta \quad (3.2)$$

Ovako postavljen sustav definiran je jednim izlazom no s dva ulaza *MISO* (sile F_1 i F_2). S ciljem pojednostavljenja sustava moguće ga je svesti sustav na *SISO* te zadržati jedan izlaz koji predstavlja kut nagiba θ te jedan ulaz definiran kao razliku sila u odnosu na neku točku (u ovom slučaju od $F_0 = 0N$ prema jednadžbi 3.3

$$\begin{cases} F_2 = F_0 + \delta f \\ F_1 = F_0 - \delta f \end{cases} \quad (3.3)$$

te δf označava razliku sile u diferencijalnom pogonu i time definira samo jednu ulaznu upravljačku varijablu za male promjene u lineariziranom režimu u rada aktuatora. Uvrštavanjem izraza za razliku sile od statične 3.3 u 3.2 slijedi:

$$\begin{aligned} J \cdot \ddot{\theta} &= \delta f \frac{l}{2} + \delta f \frac{l}{2} + C\dot{\theta} + K\theta \\ J \cdot \ddot{\theta} - C\dot{\theta} - K\theta &= l \cdot \delta f \end{aligned} \quad (3.4)$$

Prema definiciji, Laplaceova transformacija funkcije $f(t)$ definirana je kao:

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.5)$$

te su u početnom trenutku izlazna veličina i njene derivacije jednake 0 kao $y(0) == \dot{y}(0) = 0$ te time $\mathcal{L}\{y(t)\} = \bar{y}(s)$ kao i $\mathcal{L}\{\frac{dy(t)}{dt}\} = s\bar{y}(s)$. Primjenom Laplaceove transformaciju na diferencijalnu jednadžbu 3.4 slijedi:

$$s^2 J \bar{\theta}(s) + sC \bar{\theta}(s) + K \bar{\theta}(s) = l \cdot \bar{\delta} f(s) \quad (3.6)$$

Te je moguće izvesti prijenosnu funkciju $G(s)$ kao omjer izlaza i ulaza:

$$G_p(s) = \frac{\bar{\theta}(s)}{\bar{\delta} f(s)} = \frac{l}{Is^2 + Cs + K} \quad (3.7)$$

Prijenosna funkcija $G(s)$ bit će osnova za određivanje parametara postava. Određivanje prijenosne funkcije ionskog potisnika kao aktuatora bit će daljnji cilj ovog rada, no moguće je odrediti neke pretpostavke o samom sustavu na temelju već opisanog znanja u poglavlju Trenutne spoznaje (2.2).

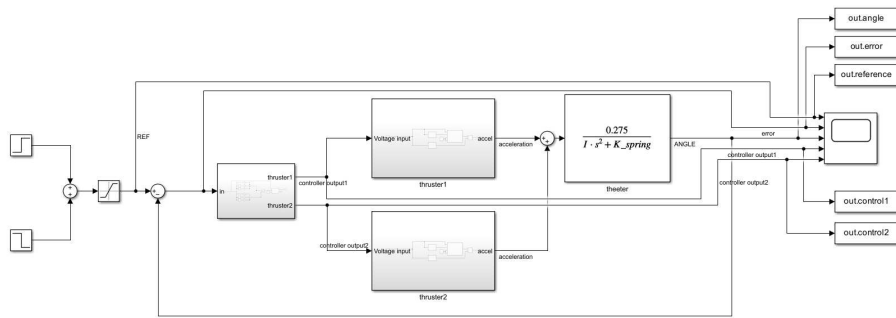
Gibanje iona počinje stvaranjem električnog polja u fluidu za koji se pretpostavlja da je u početnom trenutku miran bez ikakvih strujanja te iz ove pretpostavke slijedi da će takvo stanje fluida biti zadržano tijekom cijelog izvođenja pokusa, odnosno da neće biti vanjskih utjecaja i smetnji u fluidu što znači da će sav tok proizlaziti iz gibanja iona i njihovih sudara s neioniziranim dijelom zraka. Za očekivati je da će u početnom trenutku paljenja ionskog aktuatora biti potrebno određeno vrijeme da tok iona postigne brzinu koju je moguće mjeriti te koja će biti očitavana iz mjernog postava kao kašnjenje. Ovdje je veoma bitno naglasiti kako kašnjenje može proizaći iz mjerenja odnosno predstavlja kašnjenje senzora za vrijeme uzorkovanja i procesuiranja podatka kao vremensku veličinu τ_f te cijeli model definiran prijenosnom funkcijom kao:

$$H(s) = \frac{1 - e^{-\tau_f s}}{s} \quad (3.8)$$

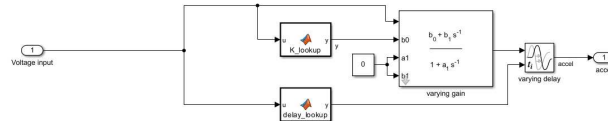
Upravljanje postavom je izvedeno na frekvenciji od 100 Hz dok je spremanje podataka izvedeno na frekvenciji od 40 Hz. Nakon uspostave toka fluida kroz ionski propulzor na određenom naponu dolazi do protoka određene struje kroz fluid što limitira izlaznu brzinu fluida iz propulzora te time postavlja vrijednost sile potiska koja predstavlja stacionarnu vrijednost. Na temelju ovog opisa moguće je usporediti vladanje ionskog propulzora s vladanjem električnog motora odnosno standardnog PT člana definiranoga kašnjenjem prvog reda (pol bez nule) i statičkim pojačanjem kao i transportnim kašnjenjem:

$$G_i(s) = K \cdot e^{-as} \cdot \frac{1}{s\tau_m + 1} \quad (3.9)$$

U jednadžbi 3.9 član K predstavlja statičko pojačanje, e^{-as} transportno kašnjenje za iznos vremena a te PT1 član $\frac{1}{1\tau_m+1}$ u kojem je τ_m odnosno konstanta motora. Ova pretpostavka uzima u obzir da je sustav linearan ili lineariziran u radnoj točki u kojoj se sustav nalazi. Ovo je pretpostavka te će daljnje spoznaje biti opisane u nastavku rada. Prethodno definiran sustav upravljanja modeliran u okruženju Simulink prikazan je na slici 3.5. Potisnici su odvojeni kako bi bilo moguće simulirati različite vrijednosti uslijed neujednačenosti u njihovoj izvedbi. Svaki je potisnik modeliran kao promjenjiva prijenosna funkcija i promjenjivog transportnog kašnjenja te se na temelju ulaznog napona određuju pojačanje i kašnjenje iz lookup tablice unutar *MATLAB Function* bloka. Regulator će biti opisan u nastavku rada vezanom za upravljanje.



Slika 3.5: Sustav upravljanja s odabranim modelom



Slika 3.6: Model potisnika

3.2. Izvođenje mjerenja

3.2.1. Programsko rješenje mjerenja

Pošto se radi o pokusu s izrazito visokim naponom prvo je bilo potrebno osigurati sigurnost izvođenja pokusa te je s tim ciljem definirana varijabla *stop_measurement* kako bi kontrolirala provođenje pokusa. Vrijednost varijable nije moguće vratiti u vrijednost *false* koje bi omogućilo ponovno pokretanje izvora visokog napona bez ponovnog pokretanja razvojne ploče. Varijabla *stop_measurement* prelazi u stanje *true* odnosno zaustavlja mjerenja u slučaju da je isteklo predviđeno maksimalno trajanje pokusa (u većini slučajeva 5 s) kako bi se zaštitili visokonaponski generatori te u slučaju da je otklon premašio maksimalnu vrijednost (u većini mjerenja postavljana na 40°) kako bi se izbjegao dodir visokonaponske elektrode s osloncem postava. Vrijednosti koje se pohranjuju su vrijeme od početka rada postava (oko 850 ms ovisno o trajanju inicijalizacije) koje se poslije uzima kao referentna 0, kut kao mjerena varijabla te napon na svakom od PWM izlaza. Kontinuirano ispisivanje je izvedeno programskim prekidom (*programme interrupt*) koji je vremenski aktiviran *printTicker.attach_ms* i osigurava kontinuiran i stabilan ispis podataka svakih 25ms odnosno na frekvenciji od 40 Hz uz moguće manje oscilacije od oko 1 Hz. Ovim je vremenom također određeno i vrijeme koje predstavlja kašnjenje sustava. Mjerenja kuta su diskretna na frekvenciji od 100 Hz te je vrijeme od 0.01 s postavljano kao konstanta koja vrši integraciju. S obzirom na izgled postava i rotacije u samo jednoj osi određeno je da će biti korištena *x* os žiroskopa dok će kut biti određen kao arkus tangens omjera negativne *y* i pozitivne *z* komponente mjerenja. Akcelerometar vrši mjerenja te omogućuje slanje svakog izvršenog mjerenja (frekvencija oko 40 kHz - ovisi o uvjetima mjerenja može doći do greške od oko 1 Hz) te postavljan za žiroskop na osjetljivost od ± 131 LSBs/dsp i mjernog područja akcelerometra od ± 2 g. Senzor također sadrži i temperaturni senzor za kompenzaciju unutarnjeg sata te nije korišten za dodatne svrhe. Kako bi bilo moguće precizno i točno odrediti kut, korišten je prošireni Kalmanov filter (Kalman, 1960) u svrhu povezivanja mjerenja kuta iz akcelerometra i žiroskopa. Na Slici 3.8 prikazana je usporedba signala koji proizlazi iz samog akcelerometra (plavo - *Raw_angle_deg*) te izlaz iz Kalmanovog filtera (crveno - *Angle_deg*). Pri mjerenju na slici ručno je uključivan i isključivan jedan potisnik te je time kut povećavan, dok je približavanje nuli utjecaj smetnja vodiča.

Podaci koji su spremeni tijekom mjerenja prate stalan oblik kao u tablici 3.1 odvojen zarezom (.csv formatom), a primjer podataka prikazan je na Slici 3.7

Tablica 3.1: Primjer spremljenih podataka

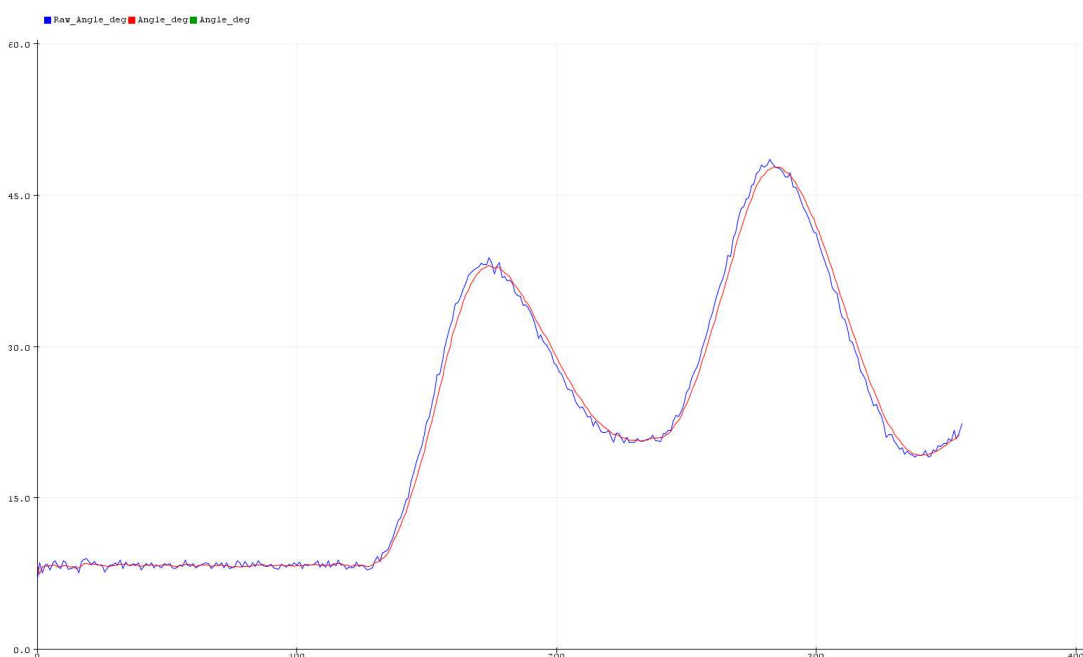
vrijeme	očitanje akcelerometra	filtriran	napon 1. potisnika	napon 2. potisnika
---------	------------------------	-----------	--------------------	--------------------

```

1 857,Raw_Angle_deg:0.75,Angle_deg:0.10,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
2 884,Raw_Angle_deg:-0.09,Angle_deg:0.33,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
3 907,Raw_Angle_deg:0.38,Angle_deg:0.33,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
4 934,Raw_Angle_deg:0.59,Angle_deg:0.41,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
5 957,Raw_Angle_deg:0.09,Angle_deg:0.34,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
6 984,Raw_Angle_deg:0.17,Angle_deg:0.33,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
7 1007,Raw_Angle_deg:0.14,Angle_deg:0.32,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
8 1034,Raw_Angle_deg:0.60,Angle_deg:0.35,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
9 1057,Raw_Angle_deg:0.28,Angle_deg:0.34,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
10 1084,Raw_Angle_deg:0.84,Angle_deg:0.40,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
11 1107,Raw_Angle_deg:0.40,Angle_deg:0.42,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
12 1134,Raw_Angle_deg:0.31,Angle_deg:0.44,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
13 1157,Raw_Angle_deg:0.26,Angle_deg:0.42,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
14 1184,Raw_Angle_deg:0.40,Angle_deg:0.40,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
15 1207,Raw_Angle_deg:0.29,Angle_deg:0.40,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
16 1234,Raw_Angle_deg:0.64,Angle_deg:0.44,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
17 1257,Raw_Angle_deg:0.26,Angle_deg:0.41,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
18 1284,Raw_Angle_deg:0.45,Angle_deg:0.41,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
19 1307,Raw_Angle_deg:0.29,Angle_deg:0.42,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
20 1334,Raw_Angle_deg:0.59,Angle_deg:0.43,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
21 1357,Raw_Angle_deg:0.07,Angle_deg:0.39,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
22 1384,Raw_Angle_deg:0.77,Angle_deg:0.44,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000
23 1407,Raw_Angle_deg:0.29,Angle_deg:0.45,voltage_1:0.000,voltage_2:0.000

```

Slika 3.7: Način spremanja podatka



Slika 3.8: Usporedba sirovih mjerenja akcelerometra i Kalmanovog filtera

3.2.2. Provođenje mjerenja

Mjerenja su provedena na postavu oslonjenom na stolu. Za stol je učvršćen drveni oslonac koji osigurava da sva mjerenja počinju s istog otklona. Ta je pozicija određena mjerenjem duljine do sredine osi valjanja te naknadno provjerena podacima s akcelerometra. Mjerenja su provedena na različitim naponima ulaza. Mjerenje se sastoji od napona praznog hoda

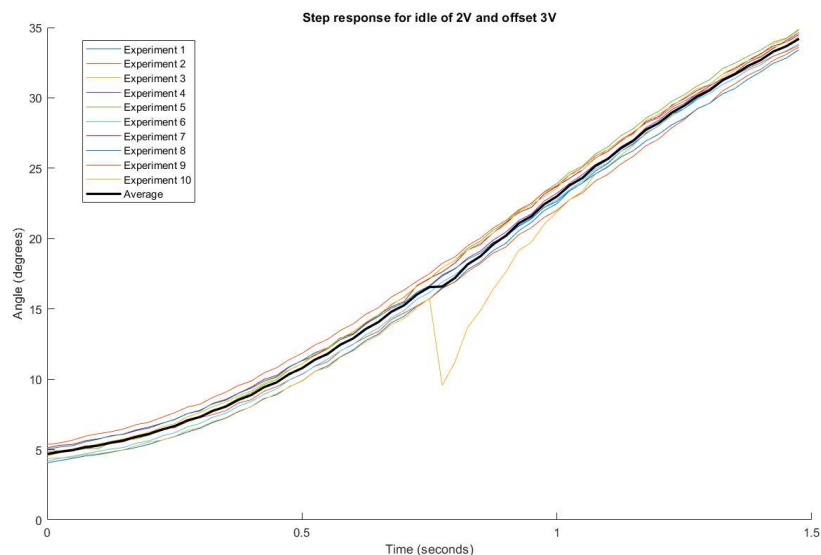
(*idle*) i pomaka (*offset*) jednog potisnika. Kombinacije napona za koja su mjerenja izvedena su prikazana u tablici 3.2. Pri izvođenju mjerenja bilo je slučajeva da dolazi do smetnji, pogotovo kada se radi o visokim naponima praznog hoda i pomaka kao što je npr. prikazana na Slici 3.9 gdje je pri jednom od pokusa s 3 V na jednom potisniku i 5 V na drugom potisniku došao do nagle promjene napona (žutom bojom) na eksperimentu 9. Takve smetnje nisu česte te su ručno uklonjene ponovnim mjerenjem.

Kako bi se osigurali što ujednačeniji uvjeti mjerenja između svakog skupa od 10 mjerenja po naponu, prostorija je prozračena te su transformatori ostavljeni da se ohlade dok su sami potisnici uzemljeni kako bi iz njih izbio sav nakupljeni elektricitet. Sva su mjerenja provedena na podjednakoj temperaturi u zamračenoj prostoriji kako bi se smanjio utjecaj UV zračenja na mobilnost iona i osigurali što bliži atmosferski uvjeti.

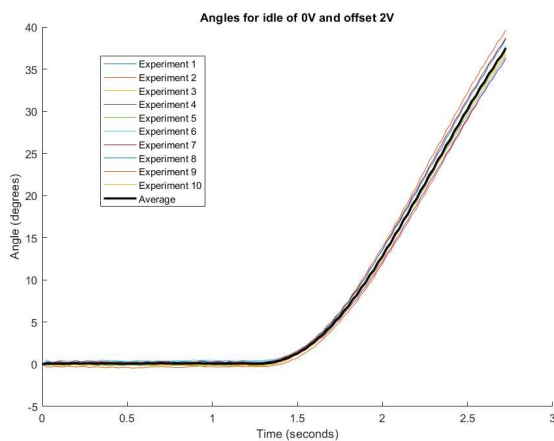
Pri malim razlikama u naponu bilo je zapaženo da ne dolazi do željenog otklona te su mjerenja zaustavljena na manjim otklonima od sigurnosnih 40° s ciljem zaštite transformatora od pregrijavanja i očuvanjem njihova radnog vijeka. Do ovoga je došlo zbog sile koju je na letvu uzrokuju vodiči, a u izvodu prijenosne funkcije i diferencijalne jednadžbe 3.2 i obuhvaćeni kao linearna funkcija ovisna o kutu s nagibom od K . Pri izvođenju pokusa uočeno je kako uslijed malih razlika u izvedbi lijevog i desnog potisnika, pri malim razlikama napona dolazi do velikog rasipanja rezultata te kao takvi nisu uključeni u neke od daljnjih proračuna. Takva su vladanja vidljiva na Slici 3.10 gdje je početni pomak podataka gotovo 5° te je već izraženo djelovanje opruge, a rezultati mjerenja su veoma rasuti.

Tablica 3.2: Kombinacije napona na kojima su mjerenja izvedena

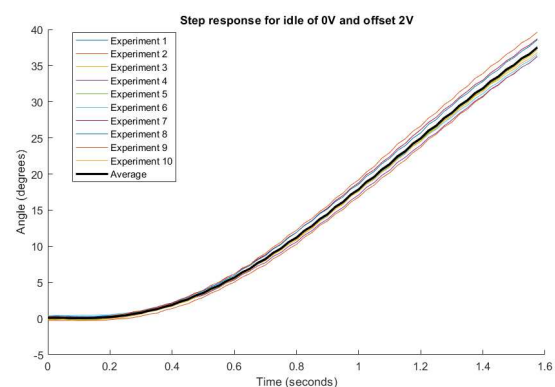
idle 0V	idle 2V	idle 2.5V
2	3	3.5
2.5	3.5	4
3	4	4.5
3.5	4.5	5
4	5	
4.5		
5		



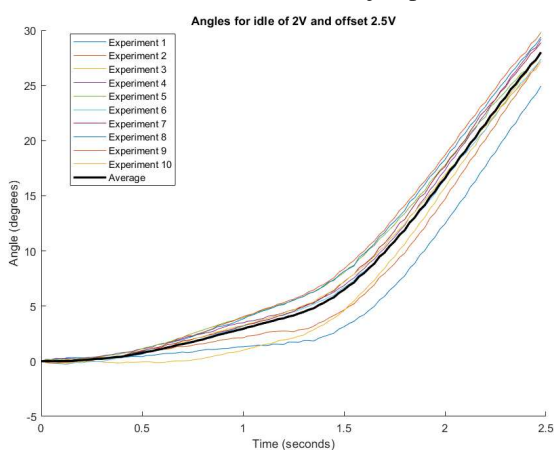
Slika 3.9: Usporedba mjerenja sa smetnjom i normalno provedenih mjerenja



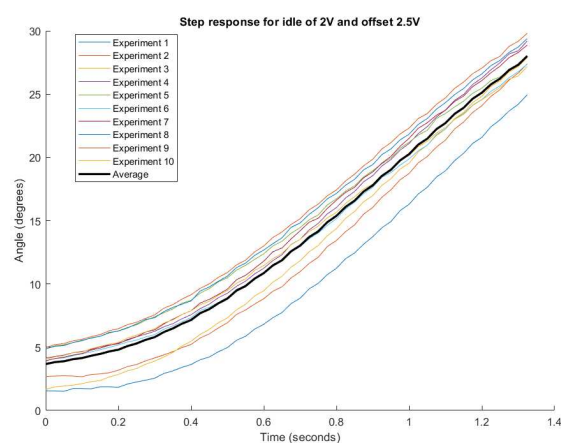
(a) idle = 0V, test = 2V cijeli pokus



(b) idle = 0V, test = 2V nakon primjene step-a



(c) idle = 2V, test = 4.5V cijeli pokus



(d) idle = 2V, test = 4.5V nakon primjene step-a

Slika 3.10: Mjerenja od početka pokusa i odvojen dio nakon primjene step funkcije

4. Postupak identifikacije

U svrhu određivanja parametara sustava potrebno je odrediti veličine koje opisuju sustav kao što su duljina, masa, inercija i koeficijent trenja uz vremena kašnjenja senzora i aktuatora. Neke je od ovih veličina veoma lako odrediti kao što su masa i duljina, jednostavnim mjerenjem, dok je za neke veličine potrebno provesti kompleksnija mjerenja ili identifikaciju.

4.0.1. Proračun inercije

Fizikalne veličine koje je moguće direktno izmjeriti uz njihove pripadajuće oznake koje će biti korištene u daljim proračunima slijede:

- M = masa letve = 15.28 g
- m = masa potisnika s nosačem = 5.5 g
- m_{MPU} = masa senzora = 2.9 g
- l = duljina klackalice = 0.25 m do kraja kraka, 0.275 m do središta potisnika
- g = ubrzanje slobodnog pada = 9.81 m/s²
- J = moment inercije klackalice oko njenog središta mase

Za ostale parametre potrebno je izračunati kao moment inercije ili odrediti mjerenjem kao koeficijent trenja, konstantu efekta opruge i kašnjenje potisnika. Za određivanje inercije moguće je koristiti aproksimativne metode i već izvedene modele te je tako moguće pretpostaviti da se postav sastoji od valjka koji je uhvaćen za osovinu i služi kao oslonac uniformno raspoređene mase od 5 g te se rotira u osi visine koja iznosi 0.0275 m i srednjeg polumjera od 0.012 m, letva kao kvadar koji se rotira oko svog središta najdulje stranice duljine 0.5 m, širine od 0.005 m te visine od 0.01 m, dok potisnici mogu biti također prikazani kao kocke na krajevima oslonca zbog zanemarivo male mase žice od koje su načinjeni te se uzimaju samo njihovi nosači mase 3 g, stranice 0.01 m i rotiraju se oko iste udaljene osi u osloncu klackalice. Zbrajanjem ovih veličina moguće je dobiti aproksimaciju momenta inercije. S ovim poznatim veličinama momenti inercije će biti izračunani prema formuli:

$$J = \iiint_Q \rho r^2 dV \quad (4.1)$$

u kojoj je tijelo Q volumena V kojem je infinitezimalno mala točka mase definirana gustoćom ρ udaljena od osi rotacije tijela za r te je uslijed rasporeda potrebno koristiti i teorem o paralelnim osima odnosno transformirati moment inercije iz koordinatnog sustava tijela u koordinatni sustav rotacije cijelog mjernog postava korištenjem teorema paralelnih osi koji glasi:

$$I = I_{cm} + md^2 \quad (4.2)$$

. Slijedi aproksimacija oblika u kvadratu i cilindri:

$$\begin{aligned} J_{\text{osovina}} &= \frac{1}{2}M(r^2) = 0.5 * (1.75 + 2.03) * 10^{-3} * (1.2 * 10^{-2})^{-2} = 0.000027216 \text{ kgm}^2 \\ J_{\text{letva}} &= \frac{1}{12}M(h^2 + w^2) = 1/12 * 15.28 * 10^{-3} * ((1 * 10^{-2})^2 + (0.5)^2) = 0.00031846066 \text{ kgm}^2 \\ J_{\text{senzor}} &= \frac{1}{12}M(h^2 + w^2) + M * d^2 \\ &= 1/12 * 2.9 * 10^{-3} * (2.5 * 10^{-2})^2 + (2 * 10^{-3})^2 + 2.9 * 10^{-3} * ((10 + 1.25) * 10^{-3})^2 \\ &= 0.00000450194 \text{ kgm}^2 \\ J_{\text{nosači}} &= \frac{1}{6}M(a^2 + h^2) + M * d^2 \\ &= 1/6 * 1.8 * 10^{-3} * (1 * 1^{-2} + 0.25^2) + 1.0 * 10^{-3} * 0.25^2 = 0.00008425 \text{ kgm}^2 \\ J_{\text{thruster}} &= \frac{1}{2}M(r^2) + M * d^2 \\ &= 0.5 * 3.7 * 10^{-3} * (2.5 * 10^{-2})^2 + 3.7 * 10^{-3} * 0.275^2 = 0.00028096875 \text{ kgm}^2 \\ J_{\text{postava}} &= J_{\text{osovina}} + J_{\text{letva}} + 2 * (J_{\text{nosači}} + J_{\text{thruster}}) \\ &= 0.0010806161 \text{ kgm}^2 = 1080.6161 \text{ gmm}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Numeričko rješenje dobiveno je korištenjem FreeCAD ekstenzije Flcom od:

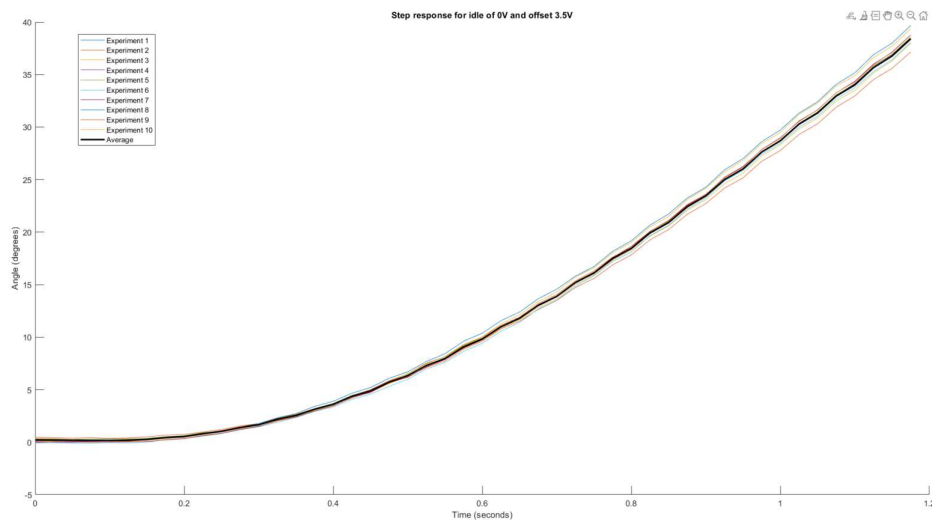
$$\begin{aligned} Jn_{\text{osovina}} &= 110.9311 \text{ gmm}^2 \\ Jn_{\text{letva}} &= 318.5 \text{ gmm}^2 \\ Jn_{\text{nosaci}} &= 93.7175 \text{ gmm}^2 \\ J_{\text{senzor}} &= 97.768 \text{ gmm}^2 \\ Jn_{\text{thruster}} &= 16.3215 \text{ gmm}^2 \\ Jn_{\text{postava}} &= Jn_{\text{osovina}} + Jn_{\text{letva}} + 2 * (Jn_{\text{nosači}} + Jn_{\text{thruster}}) \\ &= 747.2771 \text{ gmm}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Moment inercije u slučaju uzimanja postava kao jednog tijela ukupne mase i homogene gustoće iznosi $J_{\text{total}} = 815.296.657 \text{ gmm}^2$. Do ove razlike dolazi uslijed nemogućnosti odvajanja središta volumena od osi rotacije te je kompenzacija izvedena dodavanjem crte koja omogućuje postavljanje osi u središte rotacije kao što je to učinjeno i u stvarnom postavu. Dobivene vrijednost ne uključuju masu vodiča kao ni ljepilo korišteno za spajanje komponenata te je

zanemarena masa vodiča koji povezuju potisnike s visokonaponskim izvorima i senzorom. Usljed ovog nedostatka očekivano je da će rezultat identifikacije pokazati veći iznos momenta inercije.

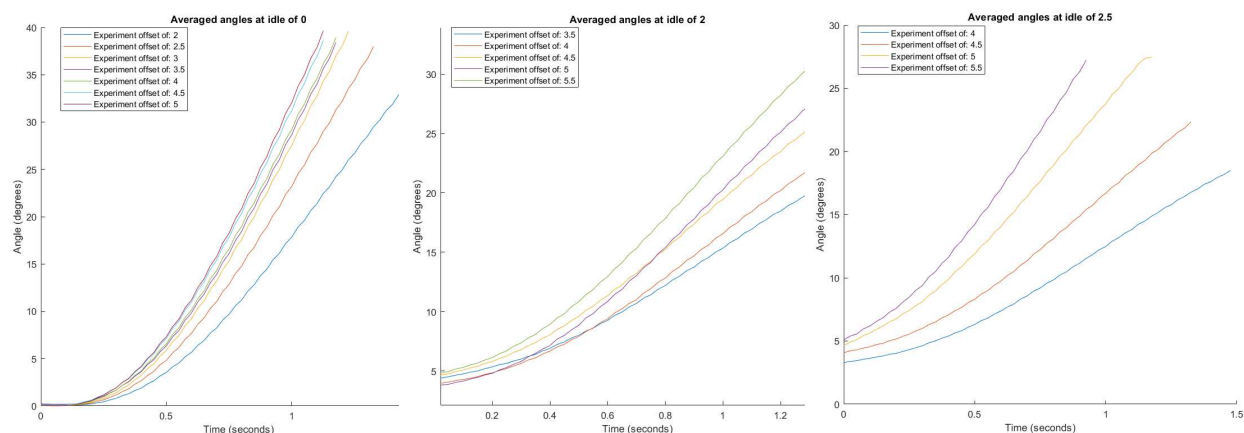
4.0.2. Određivanje početnih parametara

Za određivanje parametara prijenosne funkcije korišteno je programsko okruženje MATLAB. Prvi korak pri identifikaciji parametara bio je usrednjavanje mjerenja. Uz ovaj je postupak skup podataka podijele na dva na temelju početka utjecaja razlike između dvaju ulaznih signala odnosno skokovitu pobudu (*step* funkciju). Usrednjeni podaci o odzivu na skokovitu pobudu korišteni su za daljnje proračune. Na Slici 4.1 prikazana su mjerenja odziva na skokovitu pobudu od 3.5 V te su takva mjerenja izvedene i za ostale eksperimente. U podacima je moguće uočiti male oscilacije do kojih dolazi uslijed nekoliko efekata koji slijede iz obrade podataka. Do ovoga dolazi zbog različitog vremena prikupljanja podataka i izvođenja mjerenja te u slučaju poklapanja pisanja na serijski izlaz i mjerenja podataka dolazi do gubitka konzistencije u frekvenciji primanja podataka. U obradi se koristi vremenski razmak od 25 ms iako on varira između 23 ms i 26 ms u većini slučajeva.



Slika 4.1: Odziv otvorene pelje na skok od 3.5 V

Po pojedinim početnim naponima (*idels*) usrednjeni podaci pokazuju veoma izražene nelinearnosti sustava.



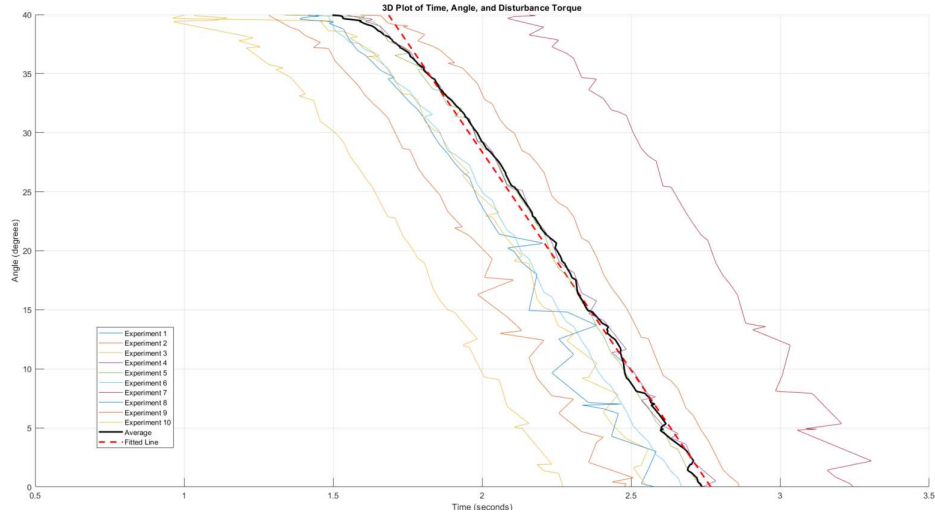
(a) Odzivi pri početnom naponu od 0 V

(b) Odzivi pri početnom naponu od 2 V

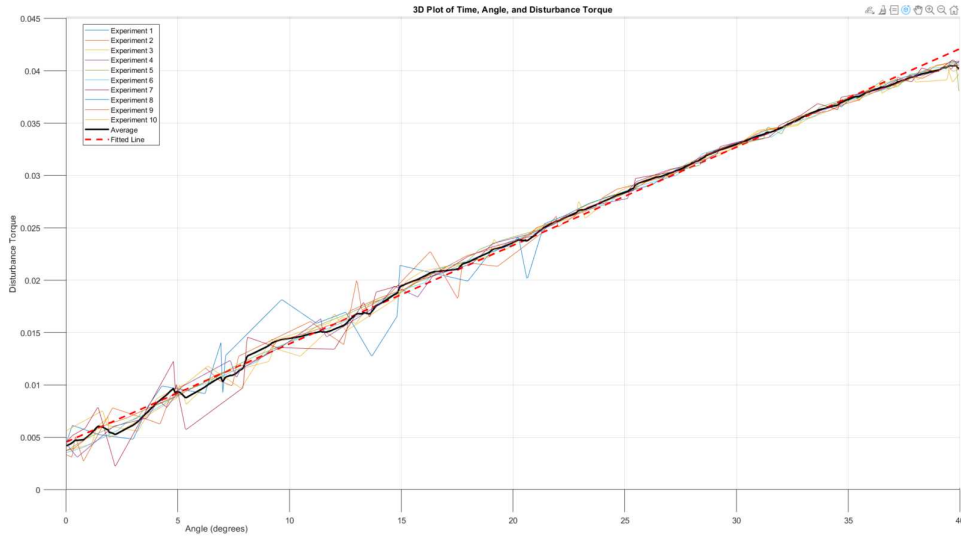
(c) Odzivi pri početnom naponu od 2.5 V

Slika 4.2: Usrednjavanje mjerenja odziva na *step* s različitim početnim naponima

Slika 4.3a prikazuje način na koji je određen početni parametar konstante opruge (ovisne o kutu). Mjerenje je izvedeno tako da su oba potisnika ugašena te je postav oslonjen tako da mu je kut otklona 40° . Zatim je postav pušten te je mjereno kut u pojedinim trenucima. Ovim je postupkom ustanovljeno je utjecaj kabela sumjerljiv sa silom koju je moguće modelirati linearno kao i oprugu. Isprekidanom crvenom crtom je prikazan pravac aproksimira silu koja djeluje na postav. Radi se od 3D grafu koji povezuje kut, moment i vrijeme te su ovdje prikazane pojedinačne osi.



(a) Mjerenja kuta za smetnju



(b) Linearna aproksimacija momenta (Nm) po kutu

Slika 4.3: Usrednjavanje mjerenja smetnje i linearna aproksimacija

Parametri su određeni usporedbom simuliranog odziva na skokovitu pobudu i usporedbom stvarnih podataka. Za proces iteriranja kroz funkcije i parametre korišten je optimizacijski postupak nelinearnog programiranja *fminsearch* za minimizaciju srednje kvadratne greške (MSE) te je pretpostavljano da će za najmanje odstupanje parametri biti najtočniji. Početni su parametri (*initial guesses*) postavljeni na temelju podataka koji su izračunati za moment inercije i nagib pravca za konstantu opruge. Linearna aproksimacija parametara koja opisuje utjecaj opruge je dana jednadžbom 4.5 gdje je τ moment, a θ kut otklona. Duljina na kojoj djeluje taj moment iznosi 0.285 m.

$$\tau = 0.00094113 * \theta + 0.0043999 \quad (4.5)$$

4.0.3. Usporedba modela identifikacije

S ciljem što boljeg opisa vladanja i provjere izvoda prijenosne funkcije prema 3.7 bit će izvedene funkcije s raznim parametrima. Modeli koji su izvedeni uključuju i pojednostavljenja te su uspoređeni razni oblici prijenosnih funkcija za estimaciju. Modeli koji su estimirani su:

- Puni model:

$$G(s) = K \cdot e^{-as} \cdot \frac{1}{s\tau_m + 1} \cdot \frac{l}{Is^2 + Cs + K_{\text{spring}}} \quad (4.6)$$

- PT2 član:

$$G(s) = \frac{Kl}{Is^2 + Cs + K_{\text{spring}}} \quad (4.7)$$

- Dvostruki integrator:

$$G(s) = \frac{Kl}{Is^2 + Cs} \quad (4.8)$$

- PT2 član bez prigušenja:

$$G(s) = \frac{Kl}{Is^2 + K_{\text{spring}}} \quad (4.9)$$

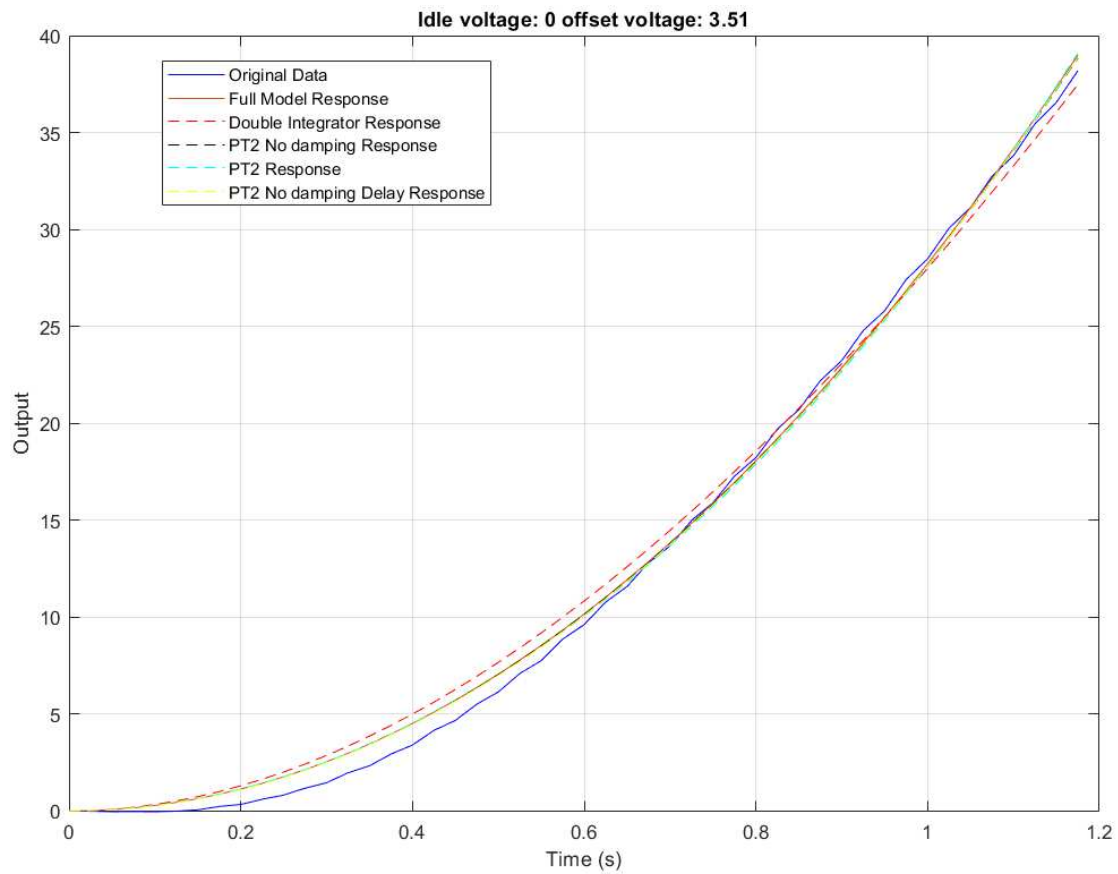
- PT2 član bez prigušenja s kašnjenjem:

$$G(s) = e^{-sT} \frac{Kl}{Is^2 + K_{\text{spring}}} \quad (4.10)$$

U gore navedenim funkcijama I predstavlja moment inercije postava, C prigušenje ovisno o brzini koje može uključivati otpor ležaja ili otpor zraka koji su ovisni o brzini kretanja te K_{spring} konstantu opruge koja predstavlja linearnu silu ovisnu o kutu zakreta. Funkcija koja se ovim postupkom estimira uključuje potisnik i mjerni postav te je potrebno načiniti distinkciju između tih modela. Pošto su sva mjerenja izvedena na temelju istih potisnika na postavu, moment inercije I kao i konstanta opruge K_{spring} trebaju ostati jednaki za svako od mjerenja, dok se pojačanje i kašnjenje mogu mijenjati uslijed utjecaja brzine koja prolazi kroz potisnike koji su opisani prema funkciji 3.9. Samo je u puni model uključeno vrijeme τ_m pošto je očekivana driftna brzina iona ono 200 m/s, a razmak između elektroda 9 mm što bi dalo vrijeme kašnjenja koje nije sumjerljivo mjerenim veličinama pošto iznosi oko 45 ms, no to se odnosi na pojedini ion. Područje ionizacije nije ograničeno samo na određenu točku same elektrode već je moguća i spontana ionizacija iona koji su bliže kolektorskoj elektrodi te oni omogućuju stvaranje ionskog vjetrova te se uslijed toga pretpostavlja da ova vremenska konstanta neće imati veći utjecaj na vladanje sustava.

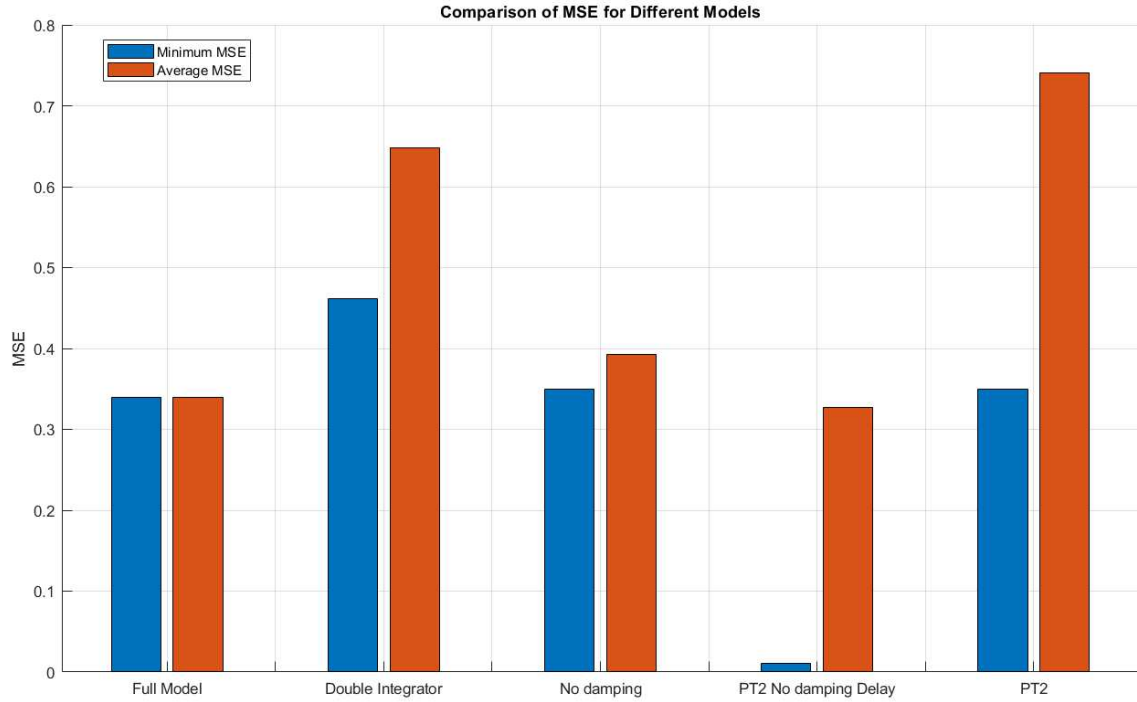
Identifikacija je provedena u dva koraka. Cilj prvog koraka je estimacija parametara postava dok je drugi korak estimacija parametara potisnika. Parametri prijenosnih funkcija su dobiveni kao izlazi zajedno s mjerom kvalitete (MSE) kako bi bilo moguće usporediti kvalitetu

estimacije. Izlaz je prikazan za svaki od korištenih pokusa dok je na Slici 4.4 prikazana identifikacija raznim modelima za podatke prikupljene pobudom od 3.5 V na jednom potisniku prema podacima sa Slike 4.1



Slika 4.4: Estimacije prijenosne funkcije na 3.5 V

Za prikaz kvalitete estimacije prvog koraka prikazana je usporedba grešaka svih modela usporedno tako da je prvo prikazana minimalna greška modela dok je nakon toga prikazana prosječna greška modela po svim naponima pomaka. Graf greške prikazan je na Slici 4.5. Usrednjeni podaci MSE određeni su kroz sve mjerne napone na određenom početnom naponu.



Slika 4.5: Srednja kvadratna greška modela

Prema gore prikazanoj grafici vidljivo je kako je PT2 član bez prigušenja s kašnjenjem najbolja aproksimacija dinamike sustava te je zbog toga korišten u nastavku estimacije. Parametri koje je potrebno identificirati kod svake od skupina mjerenja su moment inercije I i konstanta opruge K_{spring} . Ove je veličine moguće izračunati iz svih mjerenja te su s ciljem usrednjavanja vrijednosti odabrano težinsko usrednjavanje parametara, dok je za težinski faktor određen inverz kvadrata MSE modela koji je određen kao najbolji, odnosno PT2, član bez prigušenja s kašnjenjem. Prikazana je formula koja je implementirana u kodu te radi s vektorima.

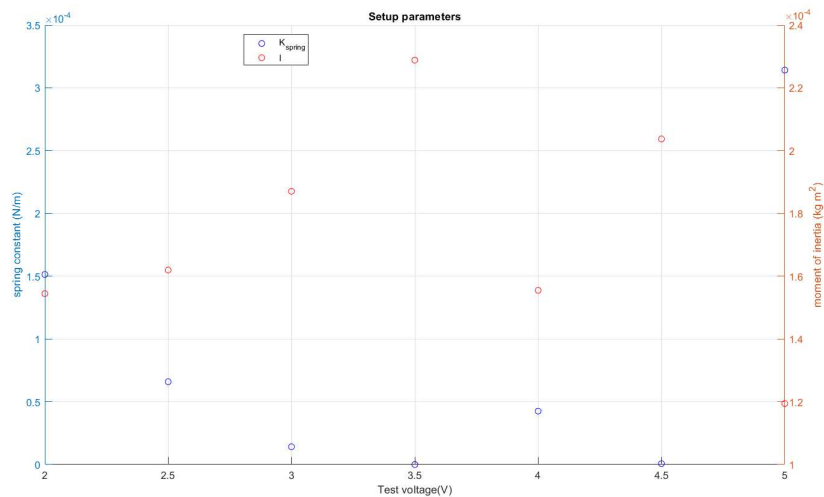
$$I_{avg} = \sum \left(\frac{\frac{1}{MSE^2}}{\sum \frac{1}{MSE^2}} * \vec{I} \right) \quad (4.11)$$

$$K_{springavg} = \sum \left(\frac{\frac{1}{MSE^2}}{\sum \frac{1}{MSE^2}} * K_{spring}^{\rightarrow} \right) \quad (4.12)$$

Dobiveno rješenje koje opisuje sustav je tada dano tako da je $I = 1.8548 * 10^{-4} \frac{kg}{m^2}$, a konstanta opruge $K_{spring} = 4.1132 * 10^{-5} \frac{N}{m}$, a pojačanje postava definirano putem duljine poluge je $l = 0.285 m$ i prijenosna funkcija postava tada glasi:

$$G_{postav}(s) = \frac{0.285}{1.8548 * 10^{-4} s^2 + 4.1132 * 10^{-5}} \quad (4.13)$$

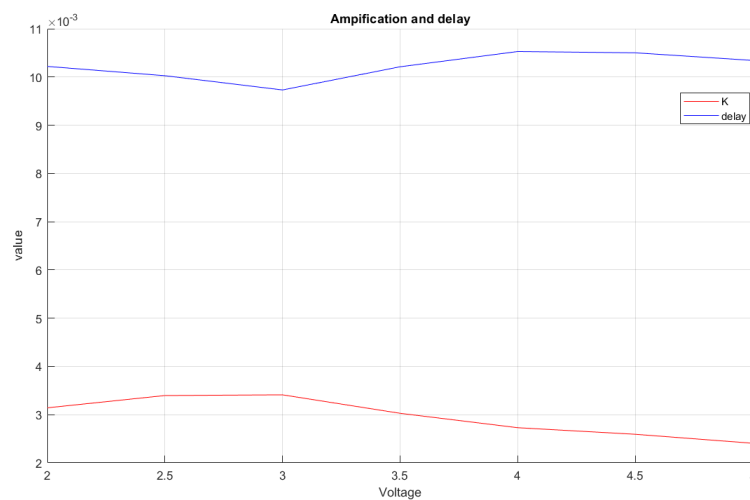
Vrijednosti su dobivene iz postupka estimacije pri početnom naponu od 0 V za sve mjerene razlike u naponu. Identificirani iznosi po pojedinom naponu mjerenja prikazani su na Slici 4.6 kao i na Slici 4.10a.



Slika 4.6: Identificirani parametri postava

4.0.4. Identifikacija parametara potisnika

S ovim je podatkom započet drugi korak identifikacije odnosno identifikacija pojačanja i kašnjenja potisnika. Potisnik je modeliran kao pojačanje s transportnim kašnjenjem. Za estimaciju tih parametara fiksirane su vrijednosti prethodno dobivenih veličina (I i K_{spring} dok su preostale vrijednosti optimirane. Funkcije u kojima je to izvedeno preuzimaju parametar koji određuje koji će se od postupaka koristiti.

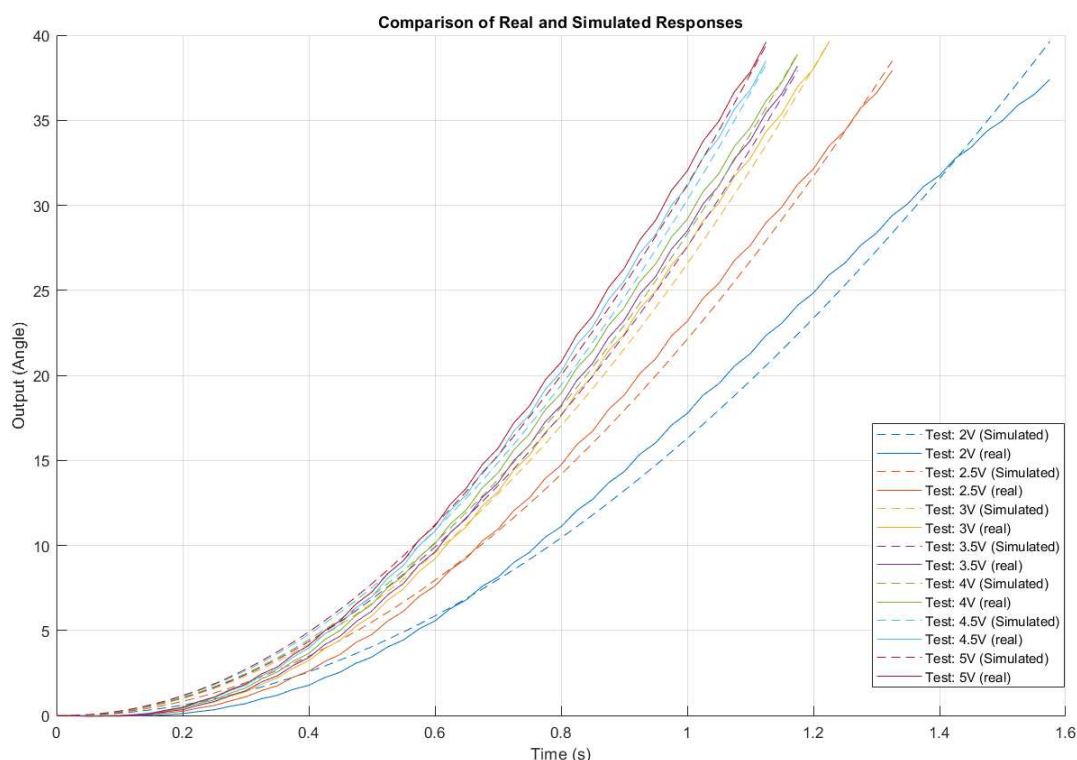


Slika 4.7: Parametri prijenosne funkcije potisnika ovisno o ulaznom naponu

Tablica 4.1: Pojaćanje kašnjenje po naponima mjerenja s početnim naponom od 0V

Napon (V)	Pojaćanje	Kašnjenje
2	0.0031	0.0102
2.5	0.0034	0.01
3	0.0034	0.0097
3.5	0.003	0.0102
4	0.0027	0.0105
4.5	0.0026	0.0105
5	0.0024	0.0103

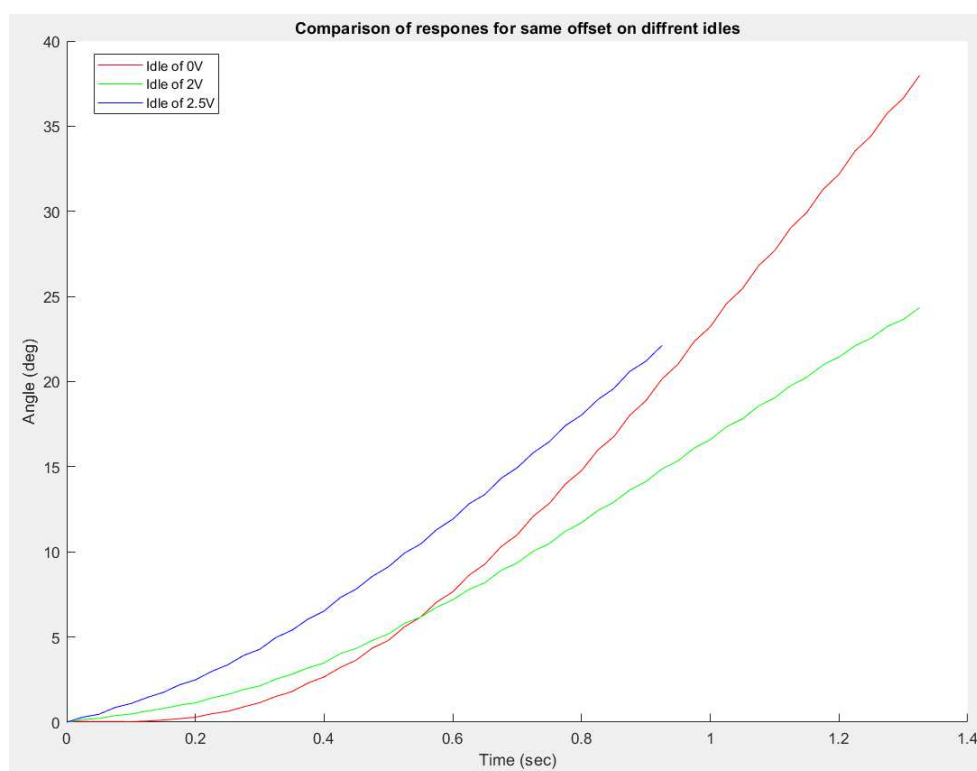
Kao što je vidljivo sa Slike 4.7 kašnjenje i pojaćanje se mijenjaju unutar reda velićine i to za izrazito mali iznos, no kao takve će biti uzete u daljnja razmatranja i implementaciju rješenja. Odzivi na skokovite pobude (isprekidane linije) otvorene petlje koji uključuje potisnike i postav, uspoređeni s pravim podacima (ispunjene linije) prikazani su na Slici 4.8



Slika 4.8: Usporedba simuliranih i stvarnih podataka potisnika

Nadalje, pri pokusima u kojima su oba potisnika aktivna nasuprotno usmjerenih potisnika odziv je očekivano sporiji uslijed oduzimanja razvijenih potisnika. Novi potisak kao takav u nekim slučajevima nije dovoljan kako bi bilo moguće zakrenuti postav letve na željeni kut te je zbog toga pokus ograničen na manji kut otklona. Kut otklona do kojeg je mjerenje

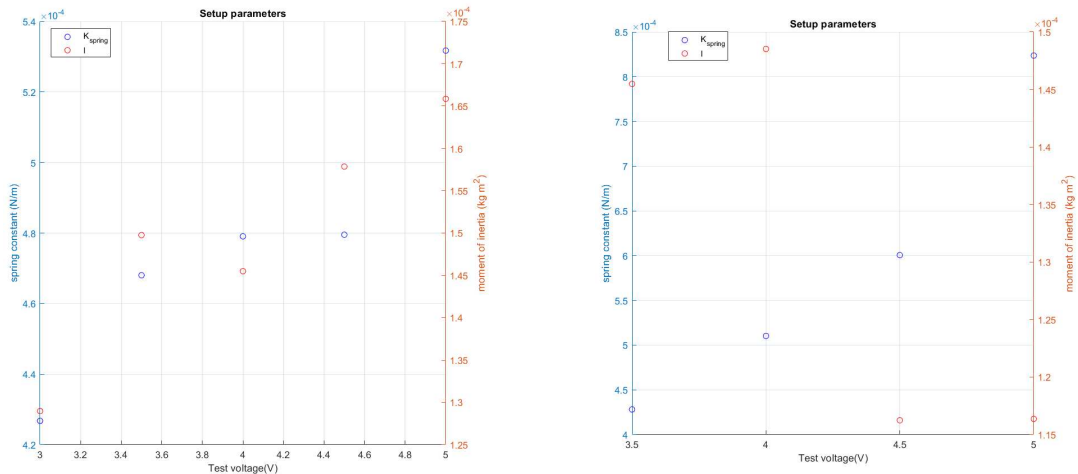
vršeno određen je eksperimentalno tako da je pokrenut pokus sa željenim naponom. Očitani kut u kojem se postav zaustavio (sila opruge se izjednačila sa silom potiska) umanjen je za 5° kako bi se uslijed potencijalnih smetnji ili greške u tom mjerenju osiguralo zaustavljanje mjerenja. Dobivanje ujednačenih parametara potisnika na temelju njihovih fizičkih izvedbi pokazalo se veoma izazovno te se dobiveni parametri razlikuju, a uz to dolazi do veoma velikog utjecaja nelinearnosti pri promjeni ulaznog napona što je vidljivo prema Slici 4.2a te na temelju toga nije za očekivati linearan odnos između pojačanja kada se u obzir uzme odmak. Uzevši za primjer odmak od 2.5 V iz početnog napona od 0 V ili početnog napona iz 2 V neće odgovarati pošto je tada na jednom potisniku napon 2 V dok je na drugom 2.5 V. Usporedba odziva na istom naponu pomaka po različitim početnim naponima prikazana je na sljedećoj Slici 4.9



Slika 4.9: Usporedba odziva pri jednakim naponima odnaka uz različitih početnih napone

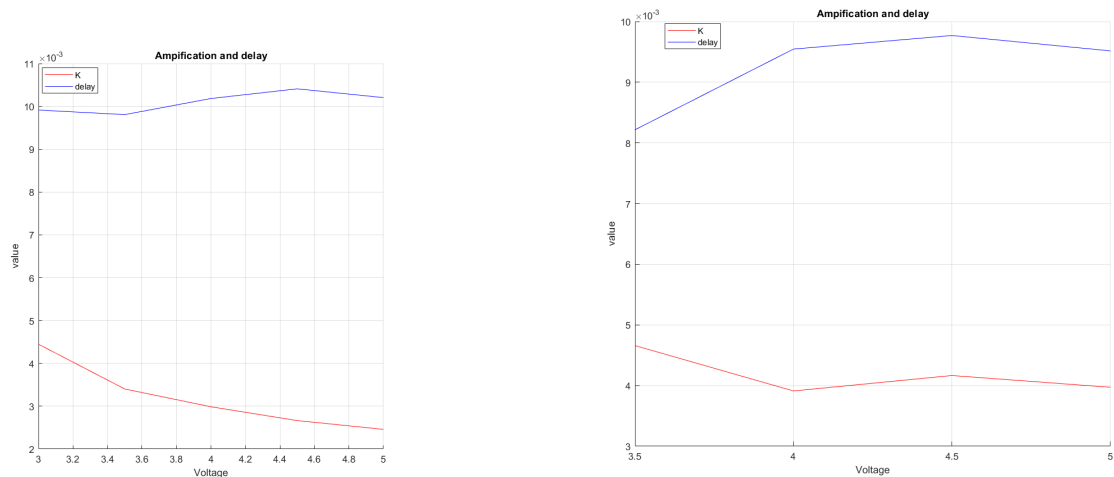
Za ova mjerenja su također provedeni postupci identifikacije parametara. Postupak je u potpunosti sukladan postupku koji je prethodno opisan za pokuse pri početnom naponu od 0 V. Iznos estimirane vrijednosti također je nanovo estimiran za svaki postav te je vidljivo kako se procijenjeni iznos i momenta inercije i konstanta opruge smanjuju. Ovo nije očekivano djelovanje te je razlika oko 50% u usporedbi s prvom estimiranom vrijednošću. Identificirani parametri postava prikazani su na slici 4.10a. Također, na slici 4.12b prikazani su i odzivi na temelju estimiranih funkcija, no uslijed velikog disbalansa pri izvođenju pokusa, dolazi do otklona koji pomiče postav tako da se u početnom trenutku (nakon *step* funkcije) već radi

o nekom otklonu pri kojem djeluje sila opruge te uslijed toga nije moguće dobro estimirati funkciju. Time su parametri identificirani pri početnom naponu od 2.5 V, zanemareni i neće biti izvođeni pokusi za taj početni napon za ostale potisnike. Ovi pokusi su također izvođeni do manjih kuteve otklona. Početno se razvijeni potisak iz suprotnih potisnika oduzima i konačni iznos potiska nije dostatan za daljnje zakretanje postava



(a) Parametri estimirani na početnom naponu od 2 V (b) Parametri estimirani na početnom naponu od 2.5 V

Slika 4.10: Identificirani parametri postava ovisno o početnim naponima

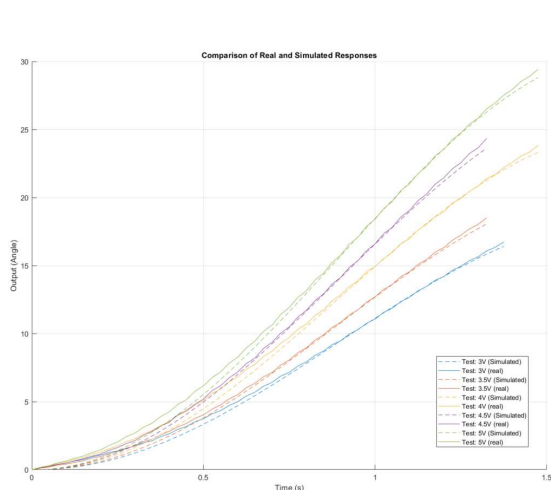


(a) Potisnika estimiran na početnom naponu od 2 V (b) Potisnik estimiran na početnom naponu od 2.5 V

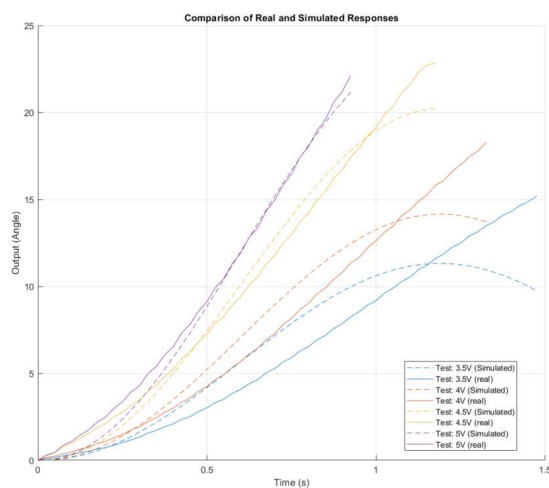
Slika 4.11: Identificirani parametri potisnika ovisno o početnim naponima

Tablica 4.2: Momenti inercije i konstante opruge po početnim naponima

Napon (V)	Inercija(kgm^2)	opruga(N/m)
0	$1.8548 \cdot 10^{-4}$	$4.1132 \cdot 10^{-5}$
2	$1.5002 \cdot 10^{-4}$	$4.7004 \cdot 10^{-4}$
2.5	$1.1637 \cdot 10^{-4}$	$8.2351 \cdot 10^{-4}$



(a) Iznos početnog napona je 2 V



(b) Iznos početnog napona je 2.5 V

Slika 4.12: Usporedba estimiranih prijenosnih funkcija pri različitim početnim naponima

4.1. Potisak

Sile koje utječu na otklon postava proizlaze iz protoka zraka koji u uzrokuje gibanje iona kroz neionizirani zrak. Ione koji putuju moguće je uočiti u mraku. Prikaz rada ionskog potisnika u mraku prikazan je na Slici 4.13. Zeleno svjetlo na slici potiče od upravljačke elektronike. Vidljivo je kako je područje ionizacije strogo ograničeno za zakrivljene i oštre dijelove elektroda kako emitterske tako i nekih dijelova kolektorske.

Potisak predstavlja silu koja djeluje na krajevima poluge. Moment koji zakreće polugu (koja posjeduje moment inercije) definiran je kao 4.14 dok je zatim sila potiska koja pomiče postav:

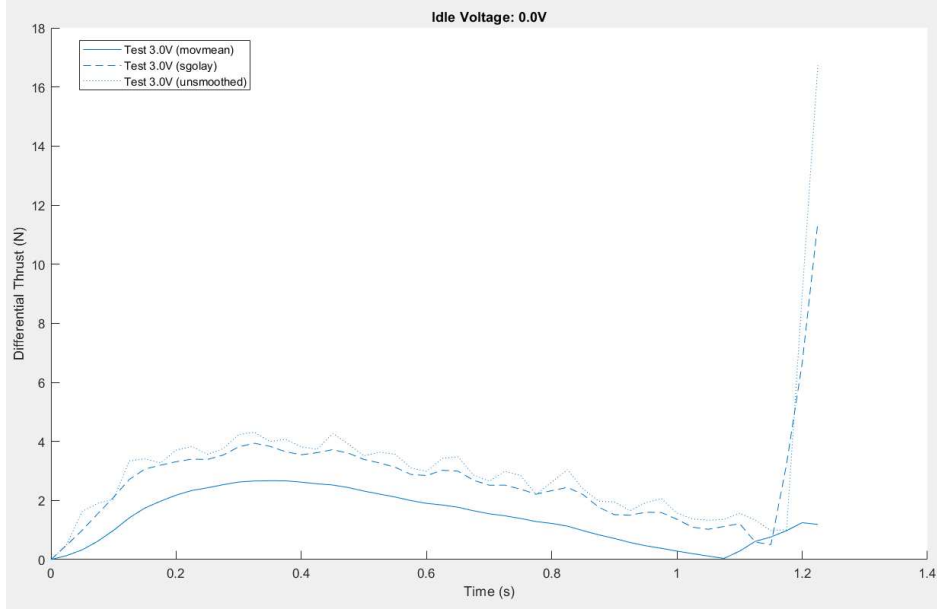
$$\tau = J\ddot{\theta} \quad (4.14)$$

$$F = \frac{\tau}{r} \quad (4.15)$$



Slika 4.13: Ionski potisnik pri punom naponu rada

Gdje je M moment na polugu, J moment inercije, $\dot{\theta}$ kutna brzina, a $\ddot{\theta}$ kutna akceleracija koje će biti prikazane u 4.17 i 4.18. Kutnu je brzinu moguće odrediti iz istih mjerenja koja su provedena za postupak identifikacije uzimajući gradijent nad mjerom kuta. Ovaj postupak ima visoke osjetljivosti i numerički je nestabilan za diskretne slučajeve poput ovog, uz to dolazi do problema koji proizlazi iz upravljačkog algoritma koji dovodi do nekonzistentnih periodičkih posmacima u podacima uslijed poklapanja prikaza podataka i prikupljanja signala. Kako bi se postiglo zaglađivanje podataka korišten je Savitzky i Golay (1964) (SG) filter podataka nad podacima dobivenim za kutnu brzinu $\dot{\theta}$ i kutno ubrzanje $\ddot{\theta}$. SG filter je digitalni filter koji omogućuje očuvanje viših redova distribucije podataka, a u ovom je slučaju korišten zbog svojstava smanjenju šuma uz zadržavanje obilježja izvornog signala. Ova karakteristika čini ga povoljnijim od jednostavnih filtera pokretnog prosjeka, koji mogu pretjerano izravnati podatke, što dovodi do značajnog gubitka kritičnih detalja te u ovom slučaju do podataka koji su neočekivano skalirani. Na Slici 4.14 prikazana je usporedba sirovih podataka, usrednjenih podataka korištenjem pomičnog prosjeka i SG filtera s redom polinom 2 nad slijedom od 7 podataka kao i kod podataka za filter pomičnog prosjeka.



Slika 4.14: Usporedba pomičnog prosjeka, Savitzky-Golay filtera i izvornih podataka

SG filter radi na način da prilagođava uzastopne podskupove susjednih točaka podataka polinomom niskog stupnja koristeći metodu linearnog najmanjeg kvadrata. Za zadani skup podataka, (y_i) filter računa izravnatu vrijednost, $\tilde{y}_i$, na sljedeći način:

$$\tilde{y}_i = \sum_{j=-m}^m c_j y_{i+j} \quad (4.16)$$

gdje je $(2m + 1)$ veličina prozora slijeda podataka, a (c_j) su koeficijenti filtera određeni polinomnom prilagodbom. Polinomni red, označen s k , definira složenost prilagodbe. Za ovu primjenu korištena je veličina prozora 7 i polinomni red 2. Ovi parametri su odabrani kako bi se postigla ravnoteža između smanjenja šuma i svojstava signala. Kutna brzina, $\dot{\theta}(t)$, i njezin filtrirani oblik $\dot{\theta}_s(t)$, izračunati su na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= \frac{d\theta(t)}{dt} \\ \dot{\theta}_s(t) &= \sum_{j=-m}^m c_j \dot{\theta}_{i+j} \end{aligned} \quad (4.17)$$

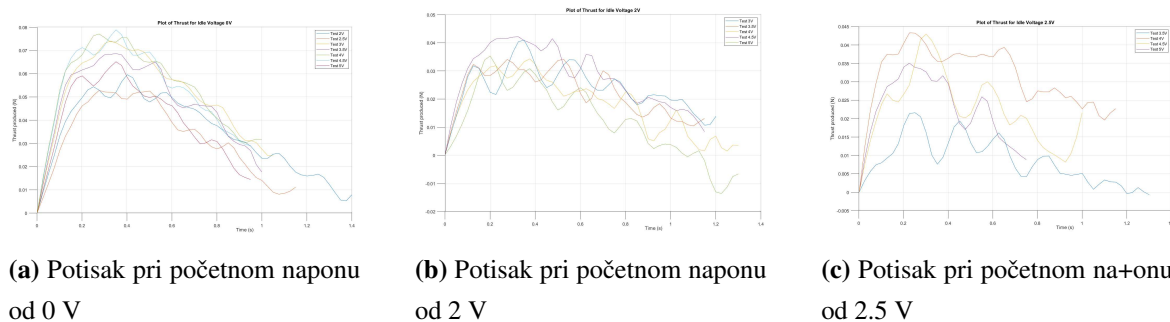
Zatim je izvedeno kutno ubrzanje $\ddot{\theta}(t)$ kao i filtrirani oblik $\ddot{\theta}_s(t)$:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}(t) &= \frac{d\dot{\theta}(t)}{dt} \\ \ddot{\theta}_s(t) &= \sum_{j=-m}^m c_j \ddot{\theta}_{i+j} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Primjenom Savitzky-Golay filtera na podatke o kutnoj brzini i ubrzanju, rezultirajući proračuni momenta sile i potiska pokazali su značajno smanjen šum, čime je povećana pouzdanost eksperimentalnih rezultata. Potisak F prikazan na Slici 4.15, izračunat iz momenta

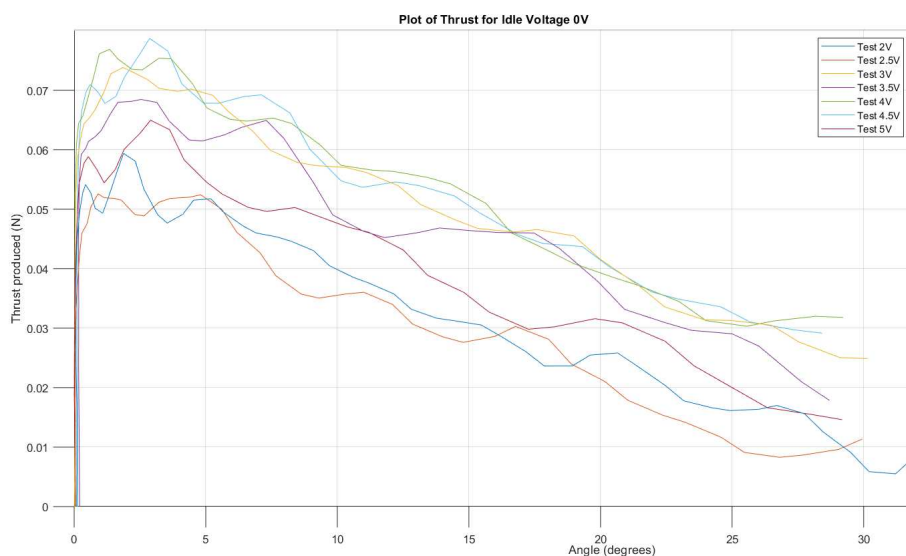
sile τ , dan je formulom 4.14.

Rezultirajuća sila koja proizlazi iz ovog proračuna prikazuje smanjenje potiska tijekom vremena odnosno povećanja kuta. S ciljem održavanja numeričke stabilnosti i željenog prikaza grafa uklonjeno je posljednjih 7 mjerenja pošto se upravo radi o duljini prozora podataka koji se obrađuje po pojedinom trenutku. Dobiveni potisak kroz vrijeme prikazan je skupno, ovisno o naponu na oba potisnika i po različitim naponima, koji su zatim primijenjeni na jedan od potisnika kao i u prethodnom slučaju. Proračunati potisak prikazan je na Slici 4.15a.



Slika 4.15: Potisak pri ulazu *step* signala s različitim početnim naponima

Uz ovisnost o vremenu radi se o trodimenzionalnom grafu te je treća dimenzija kut kako bi bilo moguće usporediti koliki se potisak razvija pri pojedinom kutu u svakom od slučajeva. Ovaj je pristup nužan kako bi bilo moguće odrediti radi li se o vezi s aerodinamičkim efektima otpora zraka uslijed povećane brzine gibanja ili su to očitavanja efekata opruge koje prouzrokuju žice. Na slici 4.16 prikazan je potisak po kutu pri početnim naponima od 0 V. Uslijed toga potrebno je provesti kompenzaciju za utjecaj opruge kako bi bilo moguće dobiti utrošak sile na sabijanje žica.



Slika 4.16: Potisak ovisan o kutu

Sila koja je potrebna za sabijanje opruge definirana je kao:

$$F_{\text{spring}}(\theta) = \theta * K_{\text{spring}} \quad (4.19)$$

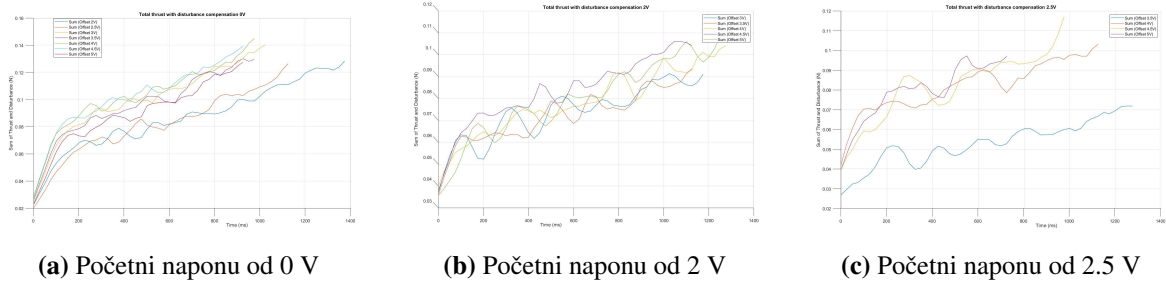
gdje je K_{spring} konstanta opruge. Zbog pojednostavljenja proračuna kao i činjenice da vodiči vode gotovo do kraja postava odnosno do potisnika uz vodove koji vode do akcelerometra, moment koji će utjecati na potisak uslijed linearne veze sile i konstante opruge moguće je opisati kao 4.20.

$$\tau_{\text{opruga}} = F * r \quad (4.20)$$

Potrebno je povezati moment na temelju kuta otklona θ te tom momentu ili konačnom proračunu sile pribrojiti dio sile koji je suprotnog smjera u odnosu na smjer gibanja. Jednadžbom je moguće rastaviti ovaj zapis na tri sile koje su rezultatna sila opruge koja uzrokuje pomak F_θ , silu opruge koja se suprotstavlja zakretu F_{spring} i silu potiska koju stvara ionski vjetar F_{EHD} dok je njihov odnos opisan kao:

$$F_\theta = F_{\text{EHD}} - F_{\text{spring}} \quad (4.21)$$

Postupak određivanje sile opruge izveden je iz eksperimentalnih podataka tako da je vrijednost utjecaja opruge linearno interpolirana između točaka u kojima postoje mjerenja s rezolucijom od 0.01° te je zatim za stvarno mjerenje kuta pronađena najbliža vrijednost F_{spring} koja utječe za taj kut otklona. Mjerenja sile smetnje prikazana su pri određivanju parametara i prikazana na Slici 3.9. Pribranjem sila dobiveni su potisci prikazani slijedećim slikama:

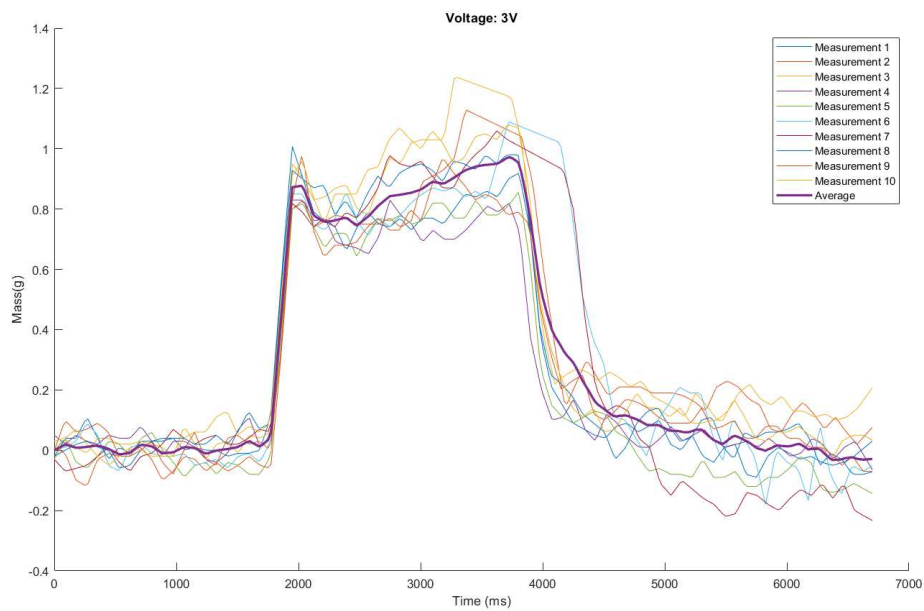


Slika 4.17: Potisak pri ulazu *step* signala s različitim početnim naponima kompenzirani za utjecaj opruge

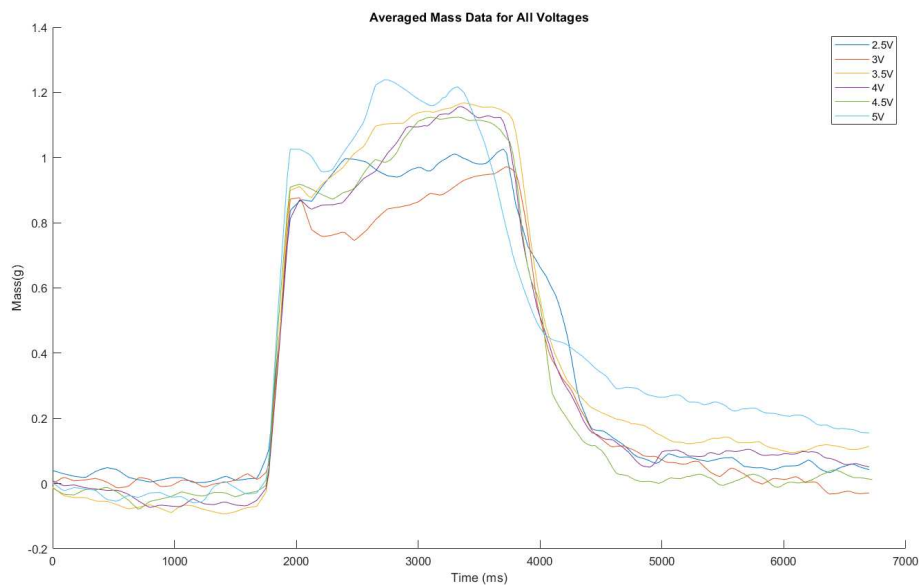
Uz ova mjerenja izveden je i niz mjerenje potiska na raznim ulaznim naponima, no uslijed velikog utjecaja elektrostatskog polja na komponente u mjerenjima je izrazito mnogo šuma. Mjerenje je izvedeno spajanjem potisnika na mjernu ćeliju (*load cell*) koja se sastoji od Wheatstone mosta s promjenjivim otporom. Signal je pojačan modulom HX711. Signal je procesuiran koristeći istu razvojnu ploču kao i postav. Vaga je kalibrirana prije svakog mjerenja utegom od 17 g. Mjerna ćelija koja je korištena ima 1 kg nosivosti i mjeri otklon od ravnotežnog položaja. Rezultati su ovdje prikazani ilustrativno, a potisak je dobiven sumjerljivim podacima o potisku nakon kompenzacije utjecaja opruge. Pokusi su izvođeni tako da je

nakon faze mirovanja pušten upravljački signal u rasponu 2.5 V do 5 V s korakom od 0.5V. Mjerenja su usrednjena te je za svaki ulazni signal uzeto 10 mjerenja. Primjer mjerenja s 3 V i uzimanje prosjeka prikazano je na slici 4.18. Prikaz svih usrednjenih podataka po različitim ulaznim naponima prikazani su 4.19. Kako bi sila i masa bila sumjerljiva veličini očitavanje mase koje mjeri ćelija potrebno je pretvoriti u silu potiska koristeći ubrzanje Zemljine sile teže i standardne formule za težinu gdje je $g = 9.81 \text{ m/s}^2$:

$$F_g = m * g \quad (4.22)$$



Slika 4.18: Mjerenja potiska terećenom ćelijom pri 3 V

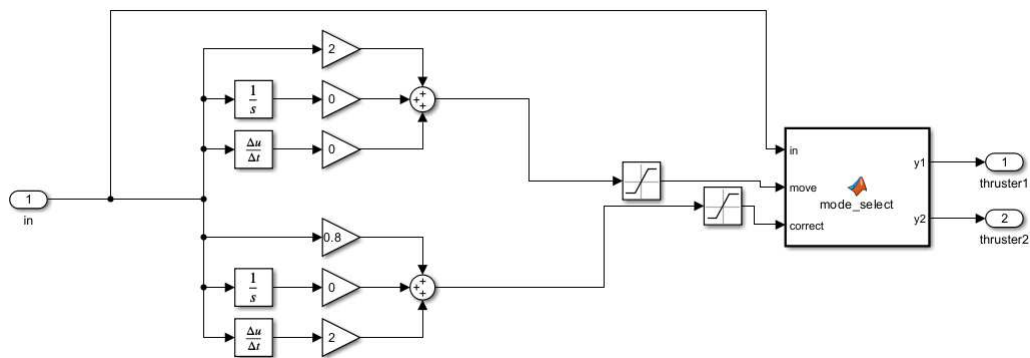


Slika 4.19: Mjerenja potiska terećenom ćelijom za različite napone

4.2. Upravljanje postavom

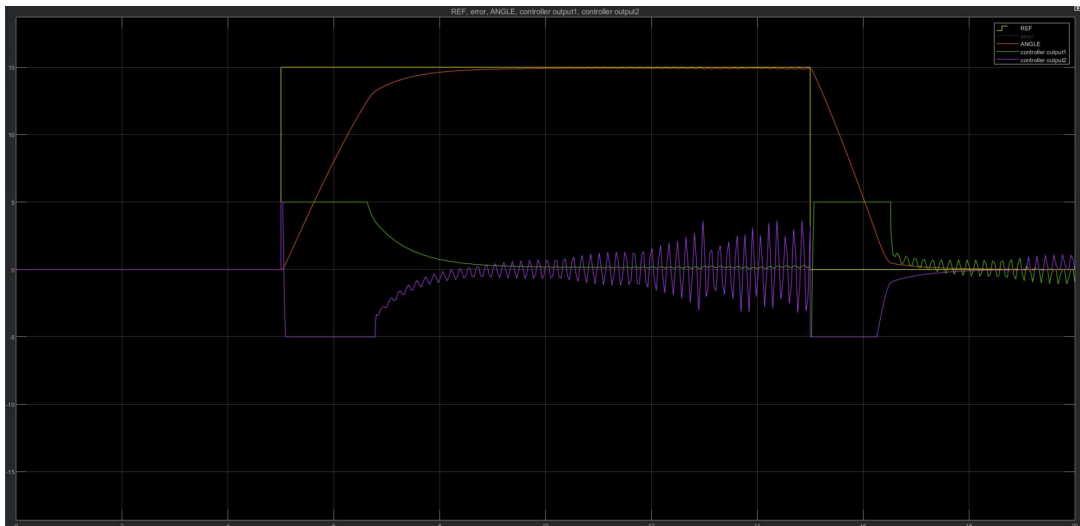
Zatvaranje petlje sustava jedna je od osnovnih tehnika upravljanja te je to učinjeno i u ovom primjeru. Cilj je upravljanje postavom te usporedba sa simulacijom vladanja kako bi bilo moguće što bolje uočiti kvalitetu procjene parametara. Upravljanje nije imalo posebne zahtjeve na vladanje sustava već je cilj bio pokazati kvalitetu provođenja estimacije prijenosne funkcije.

Za upravljanje potrebno je dovesti postav do željenog kuta otklona. Problem dolazi iz različite sile koja utječe na zakretanje postava pošto se iznos otpora koji stvara, mijenja ovisno o kutu otklona u danom trenutku. Pri upravljanju se uslijed toga javlja mrtva zona odnosno, napon koji je doveden na potisnik, ne može proizvesti dovoljno potiska za daljnje zakretanje, a ovisi isključivo o kutu otklona. Ovaj je problem riješen odvajanjem upravljanja potisnika. Regulatori su određeni tako da jedan vodi postav ka željenom otklonu dok drugi usporava postav s približavanjem željenom iznosu odnosno ima cilj zaustavljanja postava na željenoj referenci. Za upravljanje korišteni su P i PD regulatori te je na temelju željenog kuta određeno na koji će od potisnika upravljački signal biti upućen. P regulator osigurava približavanje referenci dok je PD zadužen za suprotni potisnik i usporavanje postava. Struktura upravljanja pokazana je na Slici 4.20. U MATLAB funkciji je izvedeno određivanje na koji će od potisnika biti usmjeren signal. Kriterij je iznos regulacijskog odstupanja (pozitivno ili negativno).



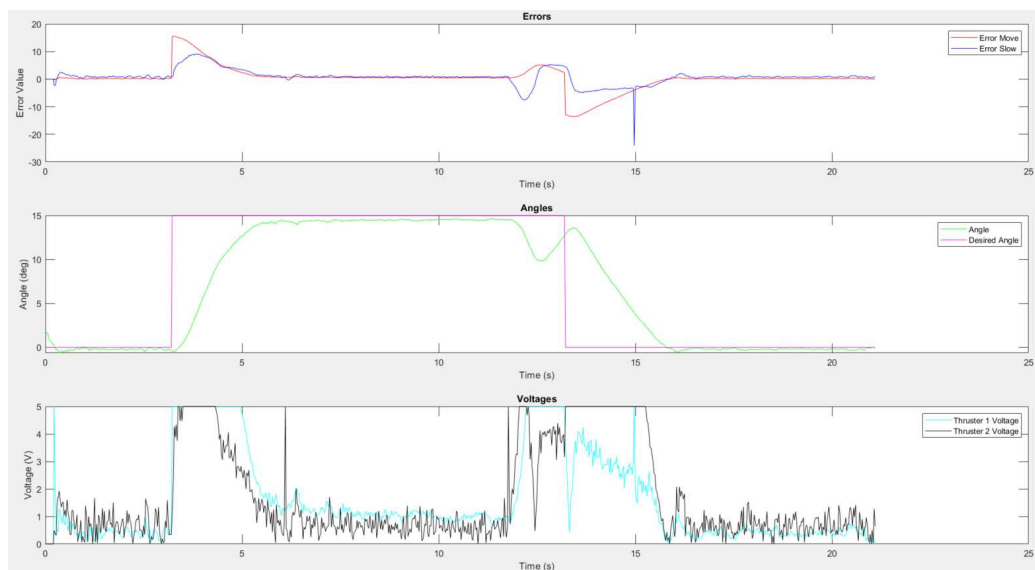
Slika 4.20: Struktura regulatora

Iz Simulink modela koji je prikazan na Slici 3.5 korišten je za simulaciju te je referenca postavljena na 15° , a zatim vraćena na 0° . Simulirani odzivi za odabranu referentnu vrijednost prikazan je na Slici 4.21 gdje je moguće pratiti upravljačke signale, referentnu vrijednost i odziv sustav. Simulacija je postavljena na 20 s.



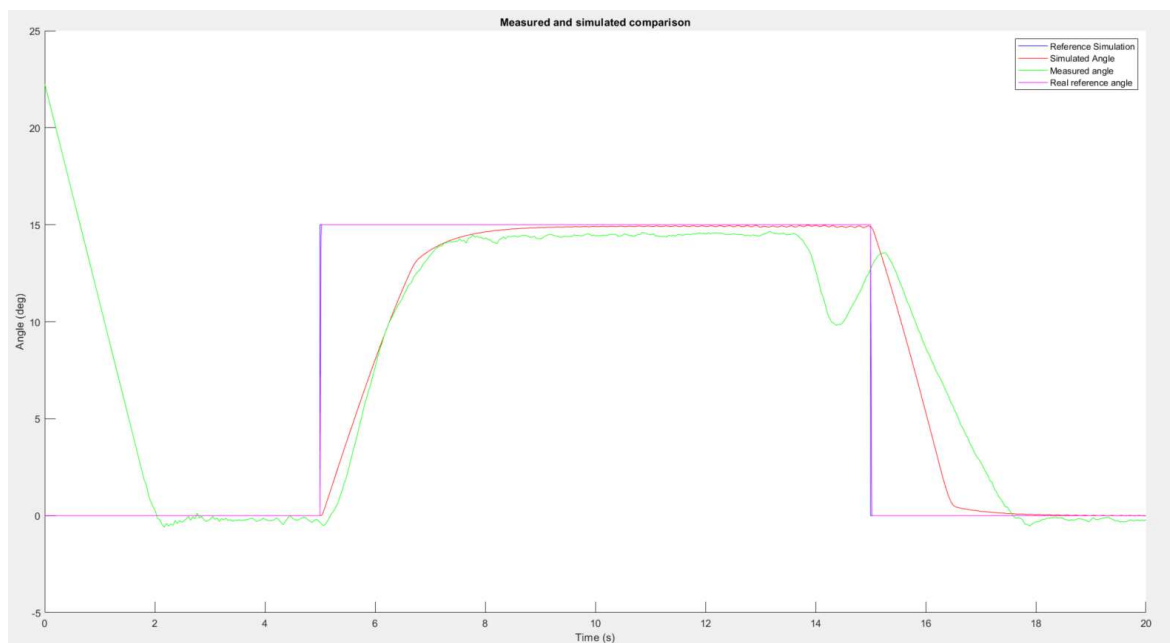
Slika 4.21: Simulacija odziva sustava

Mjerenje je izvedeno na postavu jednake pobude kao i u simulaciji. Izvedeno je nekoliko pokusa, no u nekima od njih su se javljale elektrostatske smetnje. U postupku mjerenja došlo je do smetnje zakreta od 5° te se vidi vladanje postava ne samo za odziva na referencu već i odbijanje smetnji. Mjereni signali prikazani su na Slici 4.22.



Slika 4.22: Mjereni signali na postavu

Kvalitetu simulacije moguće je vidjeti tek paralelnom usporedbom sa stvarnim mjerenim podacima te je takva usporedba prikazana na Slici 4.23. Mjerenja nisu potpuno jednaka pošto je pri ponovnom pokretanju postava došlo do neočekivanog otklona, no do početka promjene reference došlo je do ustabiljenja postava oko 0° te je zbog toga mjerenje uzeto u obzir.



Slika 4.23: Usporedba simuliranih i mjerenih podataka

5. Primjena na letjelici

Nakon provedenih ispitivanja potrebno je odrediti je li moguća primjena ovog tipa pogona za upravljanje valjanjem (*roll*) letjelice. Cilj je korištenje ionske propulzije za smanjenje broja pomičnih komponenti letjelice uz zadržavanje približno jednakih letačkih karakteristika. Za potencijalnu implementaciju potrebno je smjestiti elektroničke komponente unutar tijela letjelice te oduzeti masu koja bi inače bila korištena za izvođenje upravljanja. Pošto se radi samo o valjanju bez direktnog stvaranja potiska za uzgon te se ne upravlja kutem zaošijanja (*yaw*) ili direktno kutem incidencije (*pitch*) letjelice, bit će uzet u razmatranje optimalan slučaj. Daljnja će razmatranja biti zasnovana na jedrilicama (gliderima) koji se koriste natjecateljski, a lansiraju se ručno dok se uzgon oslanja na tokove toplog zraka (termale). Ovakve letjelice su izrazito lagane, visokog omjera (*aspect ratio*) krila te imaju veoma veliki omjer jedrenja (*glide ratio*). Jedna od takvih letjelica je Blaster3 te će biti korištena zbog lako raspoloživih podataka. Ovime nije cilj dobiti potpuno jednaku letjelicu već uzeti kao početnu točku dok će svojstva letjelice biti približna. Modeliran je u programu za izradu letjelica te jedini podaci koji nisu poznati su tranzicije između profila krila.

Potencijalni problem proizlazi iz promjene mase kao i njene distribucije te će uslijed toga masa biti postavljana kako bi osigurala što bolji balans letjelice. Masa koja se pretpostavlja da će biti dodana na letjelicu opisana je u tablici 5.2. Masa koja je potrebna za standardno upravljanje letjelicom dana je prema tablici 5.1 te su neke od navedenih masa procijenjene na temelju sličnih postava.

Tablica 5.1: Procijenjena masa elektroničkih komponenti na letjelici

Komponenta	Jedinična masa(g)	Ukupno(g)
JR 285 MG	12	36
Futaba R6106HFC	7.1	7.1
Baterija (2s 500mAh)	35	35
Vodiči i spojnice	17	17
Ukupno		95.1

Tablica 5.2: Masa dodatne elektronike

Komponenta	Jedinična masa(g)	Ukupno(g)
Mikrokontroler s komunikacijom (ESP8266)	2	2
IRFL44N	1.9	3.8
200Ω otpor	1	2
Visokonaponski modul	41	82
Hladnjaci (moguće ukloniti)	3.7	7.4
Vodiči i potisnici	8	16
10kΩ otpor	1	2
Zener dioda	0.3	0.6
Baterija (2s 500mAh)	35	35
Regulator napona (AMS1117)	1.5	1.5
Ukupno		156,7

Letjelica je izrađena od ugljičnih vlakana. Minimalna ukupna masa letjelice je 208 g. Raspored mase po pojedinim dijelovima prikazan je na stranici i u tablici 5.1. Ovi podaci bit će korišteni za simulaciju i određivanje vladanja letjelice u programu XFLR5 uz aproksimacije za podatke koji nisu točno specificirani te će to biti naglašeno u daljnjem radu.

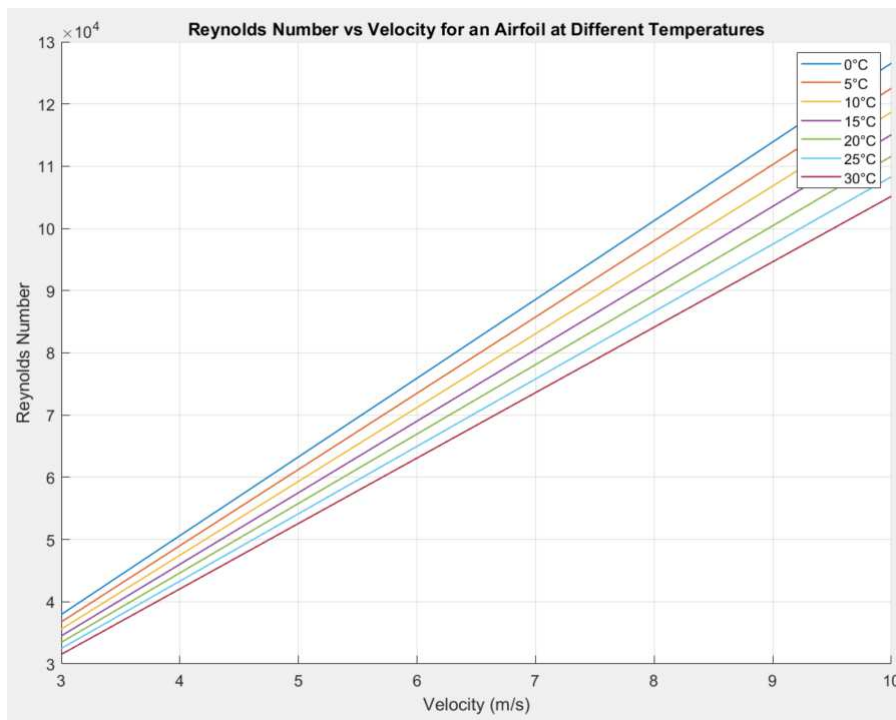
5.1. Profili krila

Letjelica se sastoji od šest različitih profila. Glavno se krilo sastoji od triju različitih profila koji su redom od korijena prema vrhu AG45, AG46, AG47. Vertikalni stabilizator se sastoji od HT12, HT13, dok je horizontalni dio repa sastavljen samo od HT22. Točna tranzicija između profila krila nije definirana te je uzeta uniformno na temelju duljine cijelog krila.

Simulacija toka zraka oko krila je provedena na malim Reynoldsovim brojevima pošto je očekivana brzina leta letjelice također relativno mala (oko 3 m/s s maksimumom od 10 m/s). Na temelju ovog podatka i činjenice da je srednja duljina krila oko 17 cm moguće je odrediti Reynoldsove brojeve za simulaciju prema formuli 5.1, te je prikazan iznos Reynoldsovih brojeva u ovisnosti o brzini leta kao i o temperaturi.

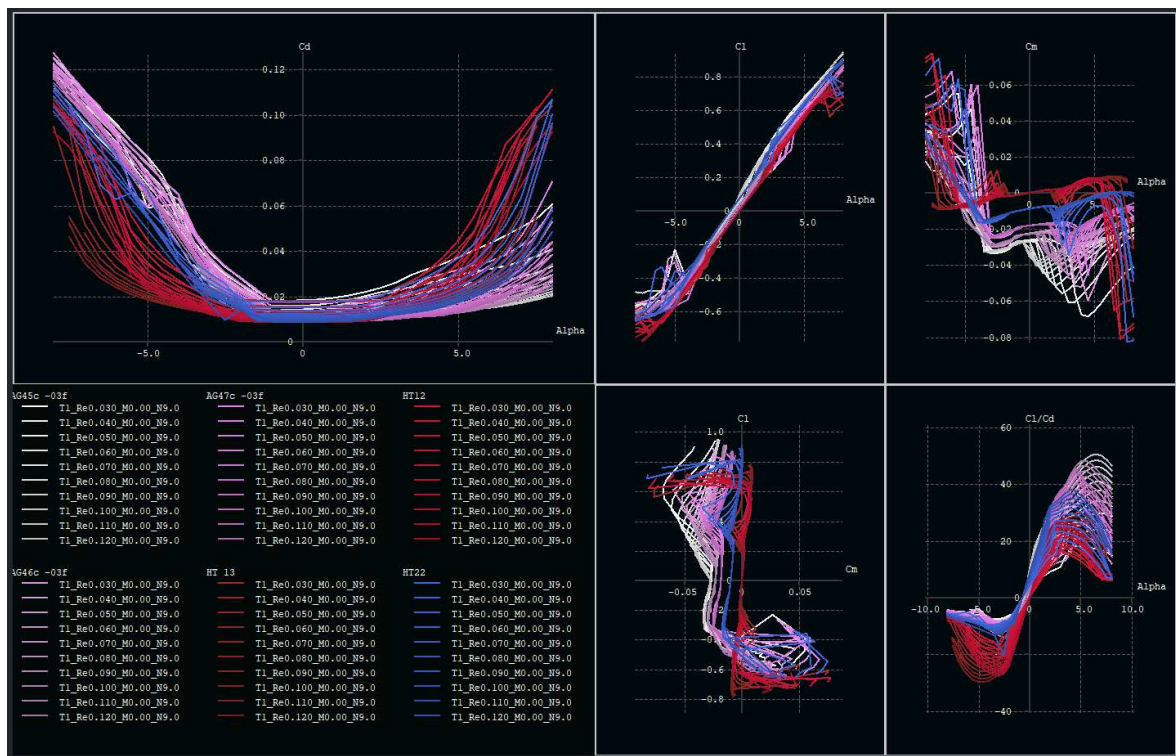
$$\begin{aligned}
 Re(T, V) &= \frac{\rho(T) \cdot V \cdot L}{\mu(T)} \\
 \mu(T) &= \mu_0 \left(\frac{T + 273.15}{T_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T_0 + S}{T + 273.15 + S} \right) \\
 \rho(T) &= \frac{P}{R \cdot (T + 273.15)}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Re predstavlja Reynoldsov broj od interesa, ρ je gustoća ovisna o temperaturi, V brzina fluida, L srednja duljina krila, a μ dinamički viskozitet zraka. Pri proračunu dinamičkog viskoziteta μ_0 i T_0 predstavljaju referentne vrijednosti pri 15°C dok je S Sutherlandova konstanta (110.4 K za zrak). Pri proračunu gustoće, R je specifična plinska konstanta zraka, iznosa 287.05 J/(kg·K), a P je atmosferski tlak uzet u proračun kao standardni, sveden na prosječnu razinu mora, od 1013325 Pa. Na temelju ovog proračuna izračunati su Reynoldsovi brojevi prikazani ovisno o brzini fluida i temperaturi prema Slici 5.1. Određeno je da će se simulacije provoditi od Re 30000 do 120000 u koracima od 10000. Dok će kut incidencije (*angle of attack* (α)) biti u rasponu od -8° do 8° sa korakom od 0.5°.

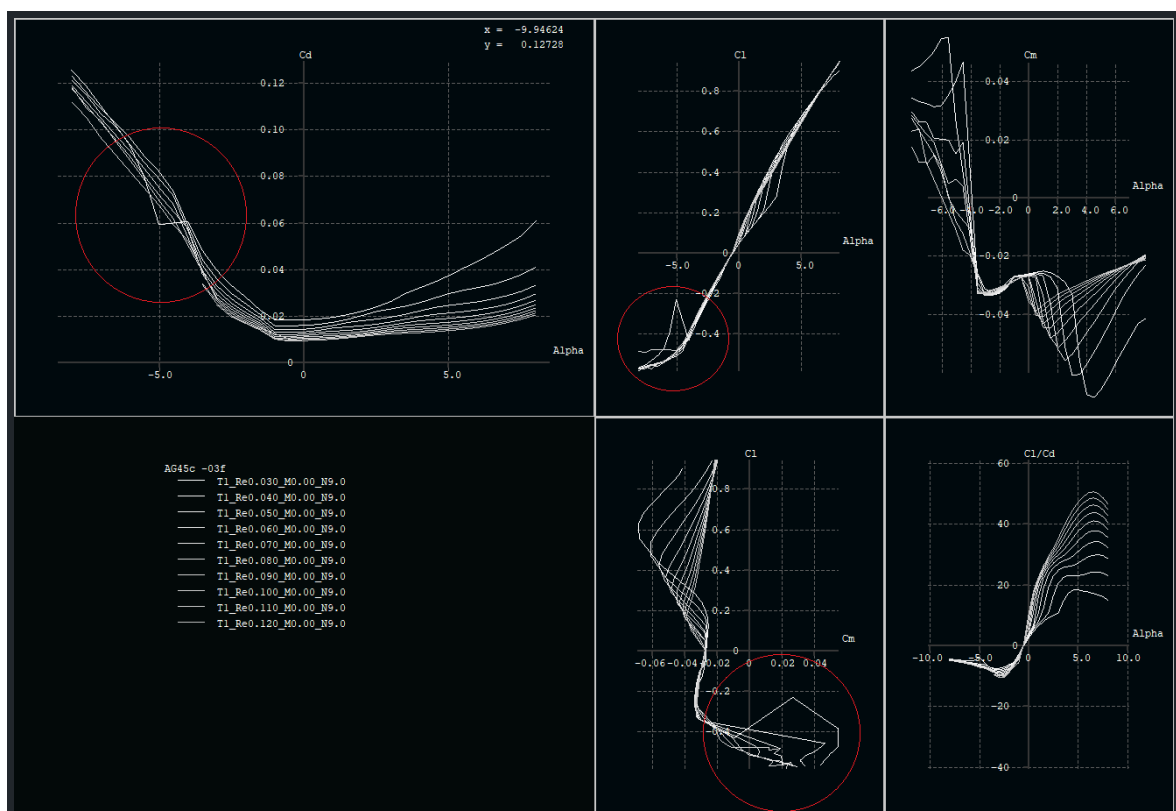


Slika 5.1: Reynoldsovi brojevi na temelju brzine i temperature

Nakon provedene skupne analize dobiven je rezultat koji će poslužiti za analizu stabilnosti letjelice u nastavku. Podaci koji su dobiveni imaju manjih numeričkih inkonzistencija što slijedi kao problem korištenih numeričkih metoda, no radi se o velikim kutevima otklona α koji neće biti korišteni u analizi stabilnosti letjelice. Ovo je moguće pošto je proračun postavljen da se rješavanje vrši slijedno od nule prema većim otklonima α , kako u slučaju negativnog α , tako i u slučaju pozitivnog. Dobiveni rezultata polara prikazan je na Slici 5.2 dok su greške prikazane na Slici 5.3.



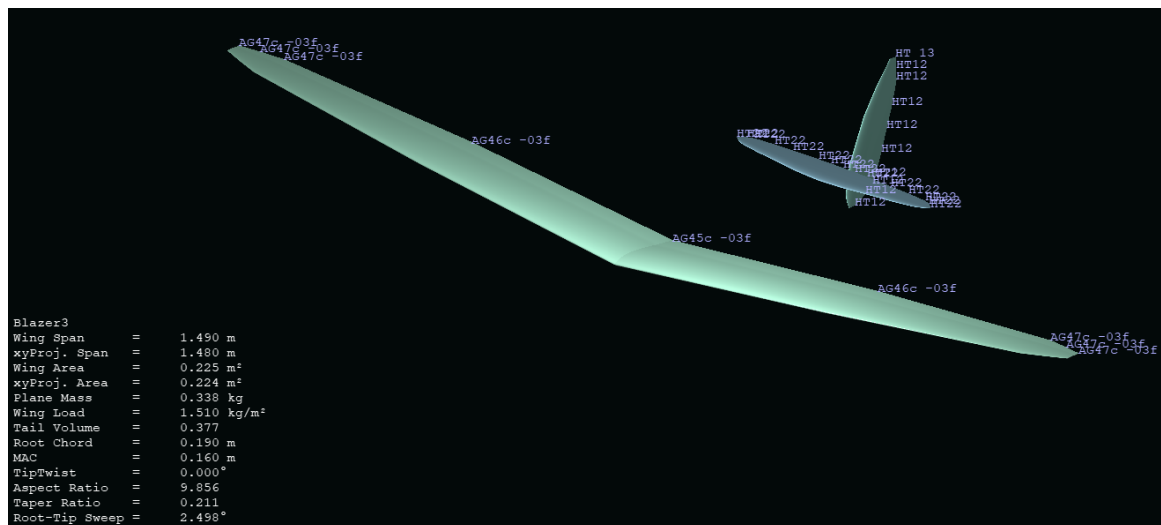
Slika 5.2: Prikaz polara profila krila letjelice



Slika 5.3: Numeričke nestabilnosti pri proračunu polara

5.2. Modeliranje letjelice

Dimenzije letjelice su određene na temelju podataka dostupnih na stranici proizvođača. Aproksimiran je dio krila kojeg određuje pojedini profil te je kut horizontalnog stabilizatora krila postavljen na -2° što je česta praksa kod ovakvih letjelica. Pošto XFLR5 nema posebnih benefita od dodavanja tijela letjelice (*fuselage*) u ovom je proračunu uključena isključivo masa tijela dok su svi aerodinamički utjecaji zanemareni. Zaobljeni krajevi krila nisu u potpunosti dobro aproksimirani pošto to iziskuje infinitezimalan broj profila, no oblik koji je korišten u usporedbi s pravom letjelicom prikazna je na Slici 5.4.

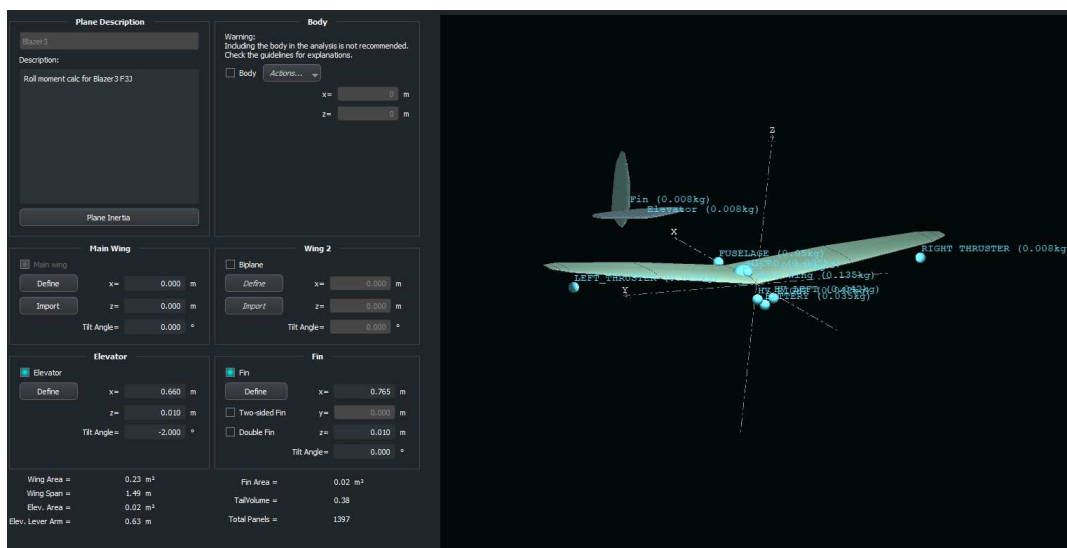


Slika 5.4: Raspored profila krila na letjelici

Centar mase je određen rasporedom komponenata dok je središte mase tijela letjelice postavljeno tako da što pesimističnije opiše njen utjecaj. Raspored mase na letjelici prikazan je na Slici 5.5a. Konačna svojstva letjelice u usporedbi s podacima proizvođača moguće je usporediti na Slici 5.5b. Centar mase i inercije prikazane su u tablici 5.2. Prikaz usporedbe nacрта prave letjelice i simulirane prikazan je na Slici 5.6. Centar mase je postavljen unutar tolerancije početnog modela.

Tablica 5.3: Raspored mase na letjelici i inercija

Centar mase		Os inercije	Iznos($kg \cdot m^2$)
Ukupna masa	0.338kg	Ixx	0.02251
X_CoG	0.081m	Iyy	0.01141
Y_CoG	1.977e-8m	Izz	0.03306
Z_CoG	0.004m	Ixz	0.00088

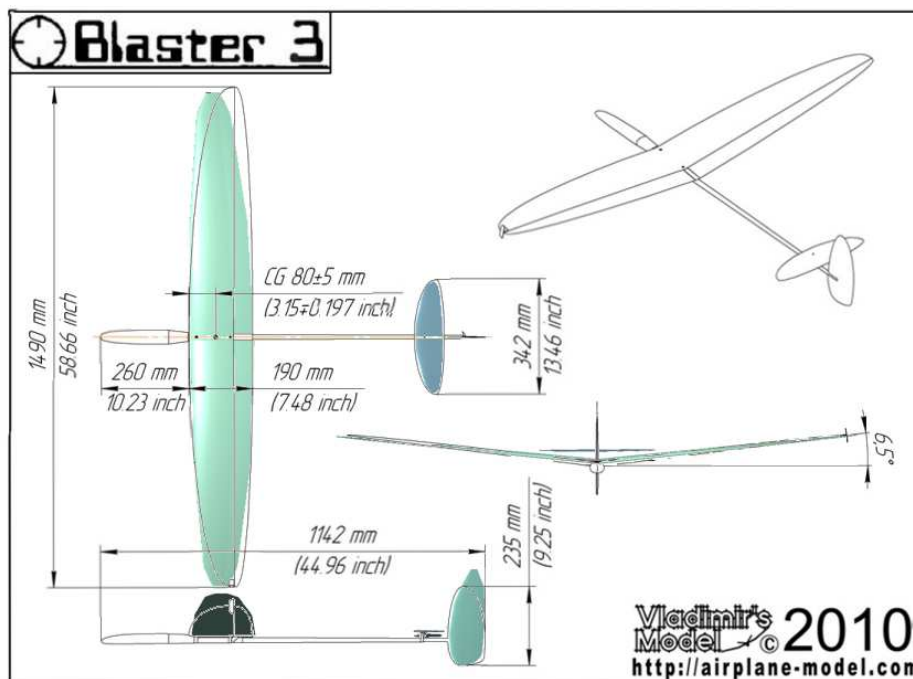


(a) Raspored masa na modelu letjelice i svojstva

Length	1142 mm (45 in)
Wing span	1490 mm (58.6 in)
Wing area	22.86 dm ² (354 in ²)
Wing airfoils	AG 45, AG46, AG47
Wing aspect ratio	9,77 %
Stabilizer area	2.39 dm ² (354 in ²)
Stabilizer airfoils	HT 22
Stabilizer aspect ratio	4.9%
Vertical Stabilizer area	2.13 dm ² (330 in ²)
Vertical Stabilizer airfoils	HT12, HT13
Vertical Stabilizer aspect ratio	2,6 %

(b) Podaci proizvođača

Slika 5.5: Usporedba podataka proizvođača i simulirane letjelice



Slika 5.6: Usporedni prikaz nacrtu letjelice i simulirane letjelice

5.3. Analiza letjelice

U nastavku će biti opisan postupak računanja sile i momenta potrebnih za ostvarivanje valjanja (*roll*) RC jedrilice korištenjem rezultata dobivenih iz XFLR5 simulacije. Korišteni su podaci iz simulacije za model Blaster3 koja je postavljena na 3.8 m/s dok je *aoa* bio u rasponu od -6° do 6° . Iz modela letjelice dobiveni su sljedeći parametri: referentna površina (S) iznosi 0.22525 m^2 , raspon krila b je 1.49 m, gustoća zraka ρ iznosi 1.225 kg/m^3 , brzina v je 3.8 m/s, masa m iznosi 0.338 kg, dok je moment inercije oko uzdužne osi I_{bxx} od $0.02265 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Aerodinamički koeficijenti dobiveni iz simulacije su C_{l_β} (moment valjanja zbog bočnog klizanja) -0.098391 , C_{l_p} (moment valjanja zbog brzine valjanja) -0.5382 te C_{l_r} (moment valjanja zbog brzine skretanja) 0.1029 . Za izračunavanje momenta valjanja L_{aero} koji proizlazi iz tlaka nakupljenog ispod površine kila koje sabija zrak (vrh mu se kreće prema tlu) korištena je formula prema (Phillips, 2004):

$$L_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho v^2 S b C_{l_p} \quad (5.2)$$

Uvrštavanjem vrijednosti:

$$\begin{aligned} L_{\text{aero}} &= \frac{1}{2} \times 1.225 \times (3.8)^2 \times 0.22525 \times 1.49 \times (-0.5382) \\ &= 0.6125 \times 14.44 \times 0.22525 \times 1.49 \times (-0.5382) \\ &\approx -1.5976 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Negativni moment valjanja ukazuje na to da se generirani moment suprotstavlja valjanju, što doprinosi stabilnosti letjelice, a kao takav pretežno proizlazi iz pozitivnog kuta krila (*dihedral*). Kako bi bilo moguće procijeniti silu potrebnu za stvaranje ovog momenta, uzimamo u obzir moment inercije letjelice oko uzdužne osi I_{bxx} i željenu brzinu valjanja. Prema Newtonovom zakonu za rotacijsko gibanje, moment potreban za postizanje određene kutne akceleracije $\dot{\omega}$ moguće je izračunati korištenjem jednadžbe 5.4:

$$L_{\text{mass}} = I_{bxx} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (5.4)$$

Željena akceleracija valjanja neće biti zadana kao kriterij već će biti uzeta kao akceleracija potrebna za suprotstavljanje sili koja vraća letjelicu iz otklona valjanja. Ovaj je postupak proveden na temelju simuliranog podatka tako da se letjelica postavi na željeni otklon kao npr. 10° te se uzima najveća apsolutna vrijednost akceleracije. Zatim se ta akceleracija uzima za izjednačavanje s onom koju može stvoriti potisnik. Određeno je da maksimalna akceleracija iznosi 1.0303 rad/s^3 :

$$L = L_{\text{aero}} + L_{\text{mass}} \quad (5.5)$$

$$L = -1.5976 + 0.02251 \cdot 1.0303 \quad (5.6)$$

$$L = -1.5744 Nm \quad (5.7)$$

$$(5.8)$$

Bitno je naglasiti da nije uzet u obzir dodatni otpor, koji stvaraju potisnici, pošto nije mjeren i uslijed nesimetričnosti između potisnika kao što su su nabori u foliji nije moguće bez daljnjeg istraživanja odrediti o kojem se iznosu radi, no moguće je u simulaciju dodati dodatan otpor te time kompenzirati za taj utjecaj. Ovaj postupak nije proveden u sklopu ovog rada. Druga bitna činjenica je da su potisnici postavljeni u smjeru djelovanja te je proračunata sila mjerena koaksijalno s ciljanim djelovanjem dok je kod letjelica uslijed djelovanja otpora zraka potrebno postaviti potisnike okomito na os rotacije te promjenom brzine toka zraka, koji uzrokuje ionski vjetar, mijenjati kut valjanja. Takav postupak nije proveden već je u obzir uzet najbolji mogući slučaj. Vidljivo je iz rezultata 5.8 kako je moment negativan što pokazuje da je letjelica stabilna nakon uključivanja mase. Idući je korak usporediti taj rezultat s maksimalnim mogućim momentom koji omogućuje izračun korištenjem 3.1 te prema tome slijedi proračun:

$$\tau_{\text{EHD}} = 0.14N \cdot 0.75m \quad (5.9)$$

$$\tau_{\text{EHD}} = 0.105Nm \quad (5.10)$$

Prema proračunu 5.10 vidljivo je da je veoma velika razlika između potrebnog potiska za održavanje letjelice pri odklonu od 10° što ukazuje na velike nedostatke ovog načina korištenje ionske propulzije. Rezultat simulacije je sustav koji opisuje dinamiku letjelice za longitudinalno i lateralno gibanje. Sustav je dan kao prostor stanja te su dodani izrazi pojedine dinamike. Ovi izrazi predstavljaju aerodinamičke derivacije za određeni zrakoplov, koje se koriste u stabilnosti i upravljivosti zrakoplova. Kako bi bilo moguće odrediti jednadžbe stanja u prostoru stanja za dane matrice, koristit ćemo opće formule za lateralni sustav:

$$\vec{\dot{x}} = A_{\text{lat}}\vec{x} + B_{\text{lat}}\vec{u}$$

$$\vec{y}_{\text{lat}} = C_{\text{lat}}\vec{x} + D_{\text{lat}}\vec{u}$$

Gdje su matrice $A_{\text{lat}}, B_{\text{lat}}, C_{\text{lat}}, D_{\text{lat}}$ definirane prema danim podacima iz simulacije XFLR5 programa (log file simulacije). Dok su izlazni vektor i vektor stanja

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} p - \text{brzina valjanja}(\text{roll rate}) \\ r - \text{brzina zaošijanja}(\text{yaw rate}) \\ \beta - \text{kut bočnog klizanja}(\text{sideslip angle}) \\ \phi - \text{kut valjanja}(\text{roll angle}) \end{bmatrix}, \vec{y} = \vec{x}$$

$$A_{lat} = \begin{bmatrix} -0.958107 & -0.444782 & -6.73007 & 9.81 \\ -6.93246 & -26.8847 & 5.41661 & 0 \\ 5.80007 & -1.38872 & -4.79494 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{lat} = \begin{bmatrix} \dot{p} & 0 \\ \dot{r} & 0 \\ F_{lat} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

B_{lat} je ulazni vektor za lateralni sustav. Ovdje su označene komponente ulaza kako slijedi:

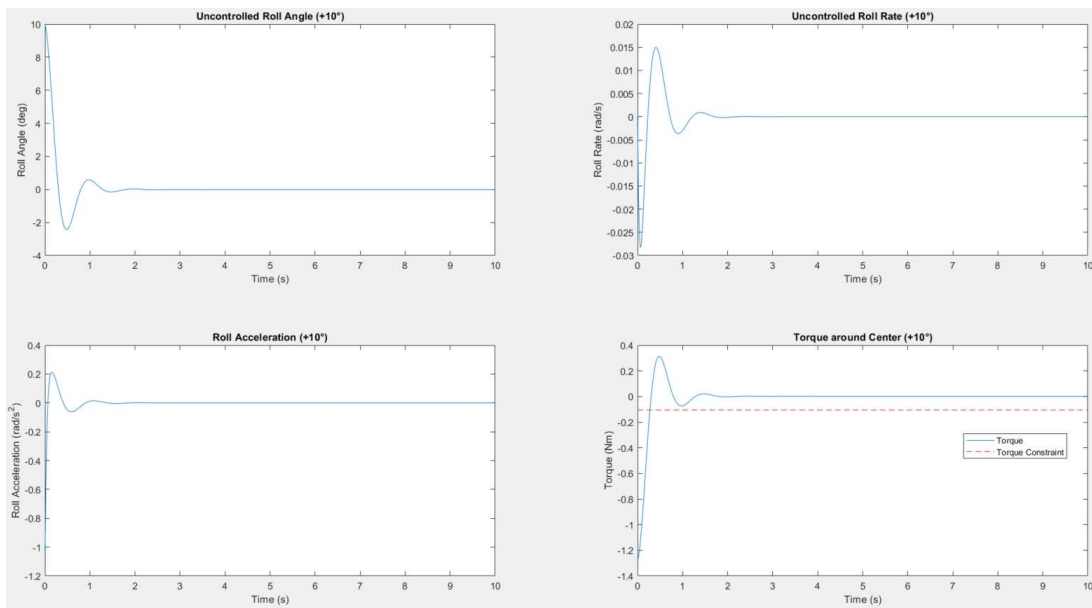
- p : Brzina valjanja (*roll rate*) zrakoplova.
- r : Brzina zaošijanja (*yaw rate*) zrakoplova.
- F_{lat} : Bočna sila koja djeluje na zrakoplov, koja se može postići diferencijalnim pogonom motora ispod krila.

Preostale komponente su nule jer ne postoji izravni ulaz koji bi utjecao na bočnu brzinu.

$$C_{lat} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{lat} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

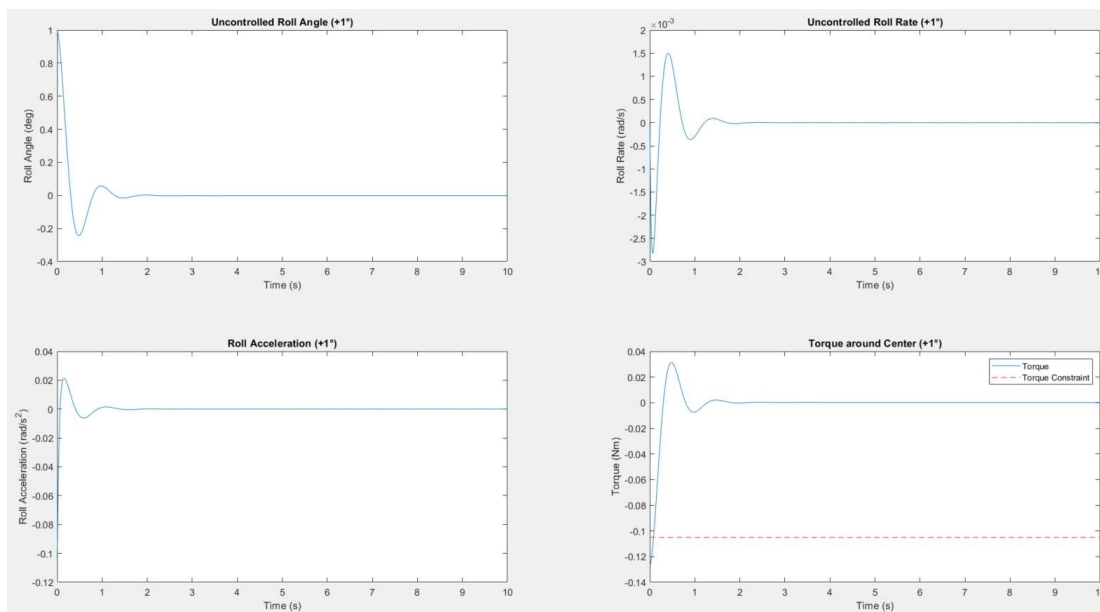
C_{lat} je jedinična matrica jer predstavlja mjerenja svih komponenti stanja dok je matrica D_{lat} nul matrica jer ulaz direktno ne utječe na izlaz u longitudinalnom smjeru. Za potrebe ovog rada u obzir će biti uzeta samo lateralna komponenta letjelice.

Radi se o letjelici stabilnoj na valjanje (dizajnirana kako kako bi sama smanjila otklon na 0° valjanja) što je vidljivo prema izračunu 5.8. Počevši od 10° otklona u pozitivnom smjeru valjanja, letjelica se vraća u 0° kao što je vidljivo prema Slici 5.7 te je raspoloživ moment koji bi ionski propulzori uzrokovali, prikazan crvenom isprekidanom linijom.



Slika 5.7: Vladanje letjelice s početnim otklonom od 10°

Cilj je održavanje letjelice pri određenom kutu valjanja određeno vrijeme. Time je potrebno dodavati silu na polugu krila (moment) koji se suprotstavlja aerodinamičkim efektima koji stvara letjelica i za koji je dizajnirana. S ciljem prikaza potrebne sile na Slici 5.8 prikazano je kako sila gotovo nije dostatna za održavanje kuta od samo 1° .

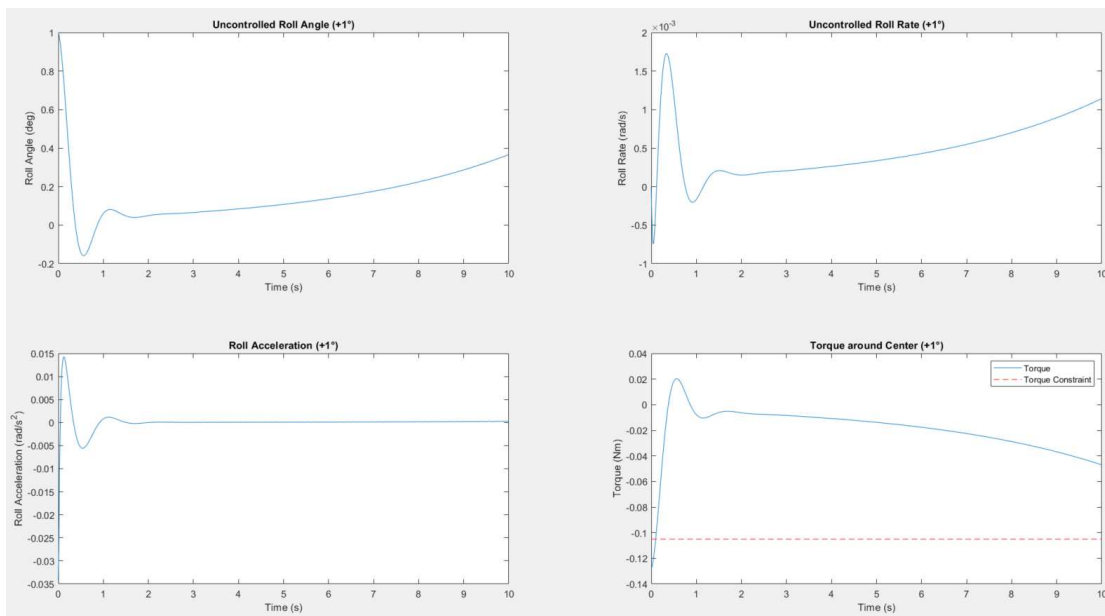


Slika 5.8: Vladanje letjelice s početnim otklonom od 1°

Eksperimenti su nastavljani smanjenjem kuta krila (*dihedral*) do postizanja nestabilnosti te se pokazalo da se radi o oko 4° . Simulacija je odrađena na lagano nestabilnom sustavu čija amplituda oscilacija na početku iznosi od 2.5° . Rezultat je pokazao da neovisno o tom,

sila potrebna za vraćanje letjelice iz samo 1° otklona valjanja i dalje nadilazi dostupan moment koji ionska propulzija može dati. Vidljivo je kako je za postizanje stabilnosti potrebno dodatno upravljanje te je u ovom slučaju moguće dovesti letjelicu u stabilan let pri malom otklonu pošto dolazi do prigušenog osciliranja oko željenog položaja od 0° .

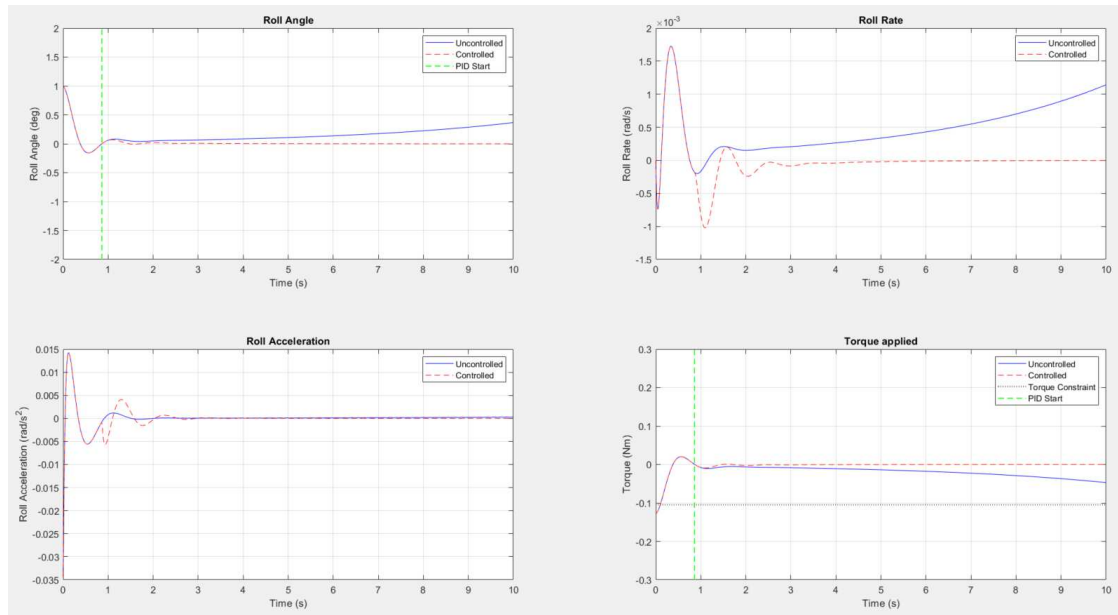
$$A_{lat} = \begin{bmatrix} -0.710074 & -0.128168 & -5.73147 & 9.81 \\ -2.36828 & -23.4491 & 6.1191 & 0 \\ 5.06893 & -1.88915 & -4.13937 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



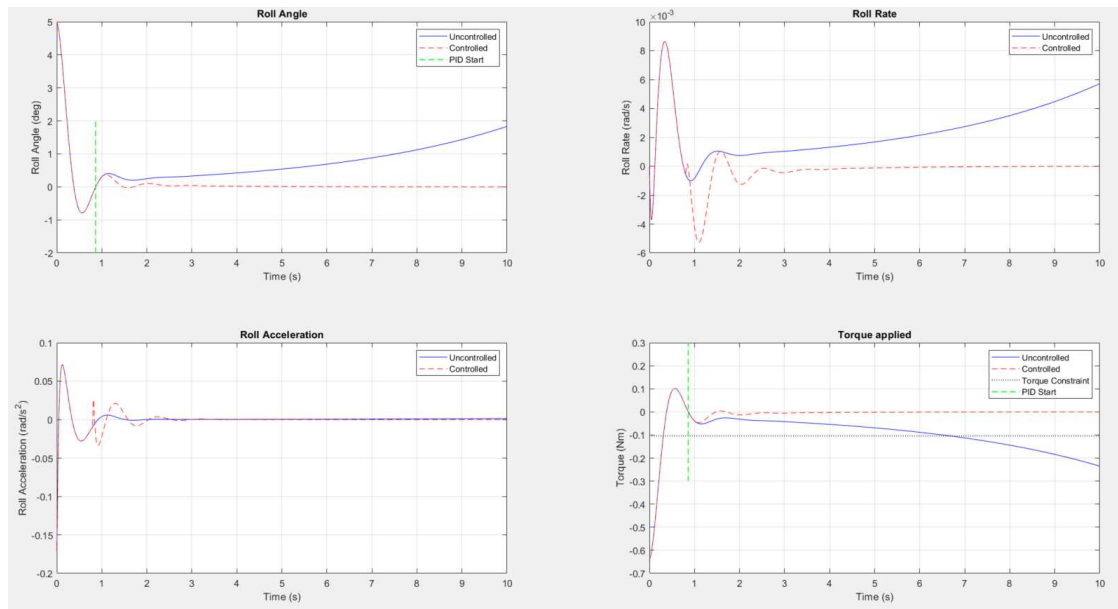
Slika 5.9: Vladanje letjelice s manjim kutem krila pri početnim otklonom od 1°

Odziv koji zatvara petlju i uključuje PID regulator parametara $K_p = 1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.03$. Pokazano je da dodatni moment koji će biti korišten za potrebe ustaljivanja neće izaći iz granica koje može dati potisnik. Izvedena usporedba odziva letjelice koja je kontrolirana regulatorom za valjanje i one koja nije, prikazana je na Slici 5.10. Ideja upravljanja se svodi na činjenicu da će letjelica pri kraju djelovanja smetnje početi smanjivati apsolutnu vrijednost otklona te će se nakon određenog vremena približiti stabilnom položaju, a u tom će trenutku sila, koju je moguće razviti na potisnicima, početi djelovati i stvarati moment koji će zaustaviti daljnje valjanje. Za početni kut valjana od 5° promijenjena su pojačanja regulatora te u tom slučaju iznose: $K_p = 0.8$, $K_i = 0.08$, $K_d = 0.03$ te su dani odzivi prikazani na Slici 5.11. S ciljem određivanja ovog sustava pod logikom koja uključuje PID upravljanje tek nakon djelomičnog ustaljivanja prikazan je na Slici 5.12 te pokazuje kako je moguće zaustaviti nestabilnost letjelice i ustabiliti ju korištenjem ionske propulzije oko kuta valjanja od 0° . Granični kut nakon kojeg nije moguć ovaj način kontrole s danim parametrima je oko

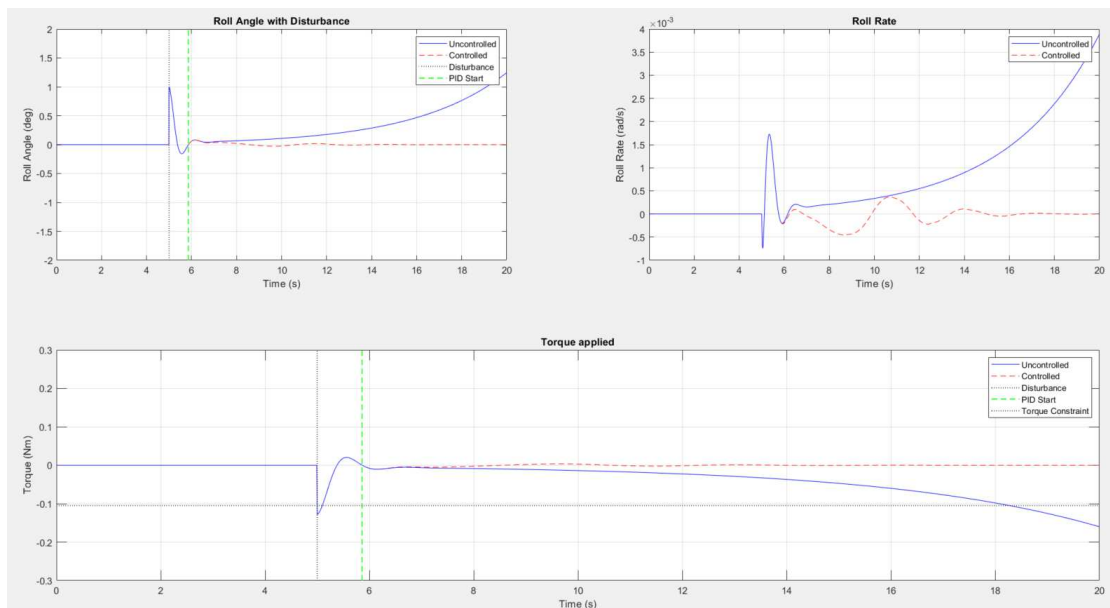
10° pošto je nakon toga potreban već moment kojega na polugu duljine krila nije moguće proizvesti ovakvim postavom ionskog propulzora. Odziv s početkom od 10° i upravljanje danim PID regulatorom dana je na Slici 5.13.



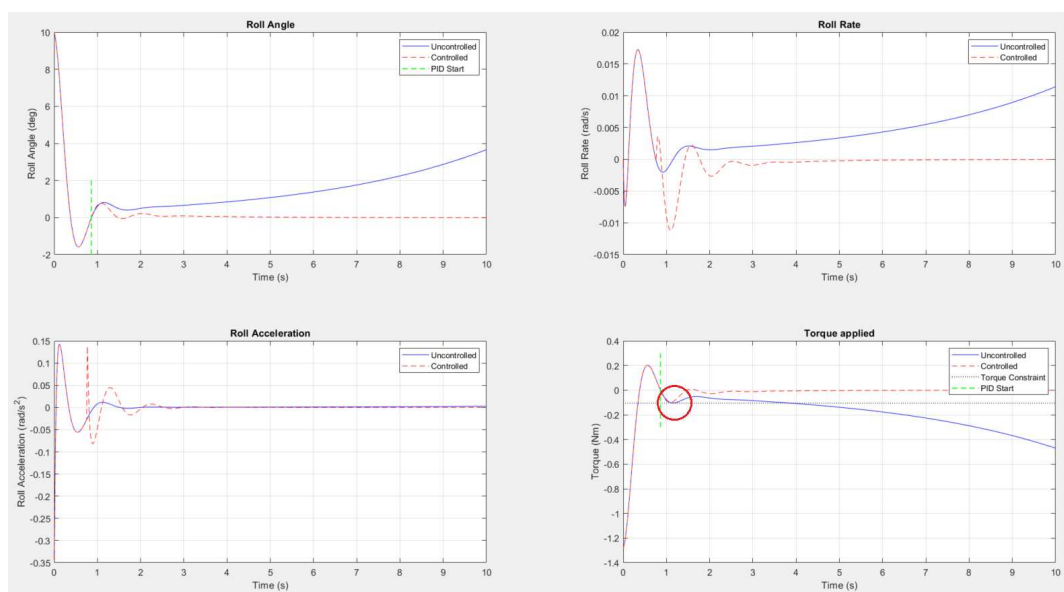
Slika 5.10: Odziv primjenom ionske propulzije za ustaljivanje letjelice pri otklonu od 1°



Slika 5.11: Odziv primjenom ionske propulzije za ustaljivanje letjelice pri otklonu od 5°



Slika 5.12: Odziv primjenom ionske propulzije za ustaljivanje smetnji od 1°



Slika 5.13: Maksimalni kut s kojeg je moguće zaustaviti valjanje

6. Zaključak

U ovom je radu prikazana analiza parametara ionske propulzije. Korištene komponente i postav omogućili su značajan uvid koronalne izboje i ionskog vjetra koji proizlazi iz njih te je uz to detaljno opisan matematički model koji opisuje gibanje iona kroz fluid, a ti efekti proučavani su na makroskopskoj skali. Za određivanje potiska kojeg je moguće dobiti korištenjem visokonaponskog izvora korišten je model poluge te je proveden postupak identifikacije nad mjernim podacima. S ciljem provjere kvalitete izvedeno je osnovno upravljanje sustavom kako bi bilo moguće odrediti radi li se o kvalitetnoj estimaciji te se pokazalo kako je identifikacija veoma blisko opisivala gibanje postava i omogućila upravljanje kutem otklona.

Idući je korak bio određivanje potiska koji daje mjereni ionski propulzor. Cilj ovog podatka je određivanje sile koju će biti moguće primijeniti na krilo letjelice te time upravljati kutem valjanja. Podaci potiska su dodatno validirani mjerenjem potiska vatom. Dobiven je maksimalan potiska od 1.4 g pri ulaznoj snazi od oko 16 W.

Konačno, nad modelom komercijalne letjelice, provedena je analiza koja je dala podatke o dinamičkom vladanju letjelice. Na temelju dobivenog prostora stanja provedene su daljnje simulacije koje pokazuju vladanje letjelice pri raznim otklonima. Provjerena je stabilnost letjelice i pokazano je kako potisak, koji je moguće dobiti iz ionskog propulzora, niti u najoptimističnijem slučaju ne može držati kut valjanja pošto je sila koja smanjuje otklon daleko veća od raspoloživog potiska.

Promjenom nagiba krila moguće je smanjiti stabilnost letjelice te zatim je moguće dovesti letjelicu u kut valjanja od 0° i omogućiti ravan i stabilan let u osi valjanja.

Pri simulaciji letjelice korišteno je mnogo optimističnih pretpostavki te je za primjenu ovog načina upravljanja letjelicom nužno daljnje razvijati ovaj način pogona.

LITERATURA

- Christenson E.A. i Moller P.S. Ion-neutral propulsion in atmospheric media. *AIAA Journal* vol. 5, no. 10, pp. 1768–1773, 1967.
- R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Fluid Engineering*, 1960. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
- N. A. Kaptsov. Elektricheskie yavleniya v gazakh i vakuume. *OGIZ, Moscow*, 1947.
- A.K.M. Monayem H. Mazumder i F.C. Lai. Performance of a multiple stage ehd gas pump in a square channel. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (277-284)*, 2011.
- A.K.M.M.H. Mazumder, X.B. Zhao, i F.C. Lai. Effects of grounded electrodes size on the performance of ehd gas pump in a square channel. *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2011.
- Friedrich Paschen. Ueber die zum funkenübergang in luft, wasserstoff und kohlendioxid bei verschiedenen drucken erforderliche potentialdifferenz. *Annalen der Physik*, 1889. doi: <https://doi.org/10.1002/andp.18892730505>.
- F. W. Peek. Dielectric phenomena in high voltage engineering. *McGraw Hill, New York*, 1929.
- Warren P. Phillips. *Mechanics of flight, 2nd edition*. Wiley, 2004.
- Abraham. Savitzky i M. J. E. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *American Chemical Society*, 1964.
- R.S. Sigmond. Simple approximate treatment of unipolar space-charge-dominated coronas: The warburg law and the saturation current. *Journal of Applied Physics*, vol. 53, 1982.
- Martin Seeger Thomas Christen. Current interruption limit and resistance of the self-similar electric arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005.
- J.S. Townsend. Electricity in gases. *Clarendon Press*, 1915.

J.S. Townsend i John Sealy Edward. The theory of ionization of gases by collision. *London, Constable*, 1910.

A.M. Tyndall i G.C. Grindley. The mobility of ions in air. part i. negative ions in moist air. *Proceedings of the Royal Society (London)*, vol. 110, no. 754, pp. 341–358, 1926.

Identifikacija parametara ionske propulzije za upravljanje kutem valjanja letjelice

Sažetak

Ionska propulzija, iako često povezana sa svemirom, također pruža značajne mogućnosti za poboljšanje performansi letjelica u atmosferskim uvjetima. Jedna od ključnih komponenti ovog tehnološkog pristupa je koronalni izboj, koji igra centralnu ulogu u stvaranju potiska bez pokretnih dijelova. Uz to, korištenje kombinacije potisnika na postavu koji predstavlja letjelicu dodatno otvara puteve za upravljanje valjanja letjelice, što je bitno za njenu stabilnost i kontrolu.

U ovom je radu izveden postav koji omogućuje Postupak izračuna parametra ionskog propulzora te na temelju toga omogućuje upravljanje zakreta postava. Pokazano je kako ionska propulzija stvara dovoljno potiska za stvaranje kuta zakreta postava kao i upravljanja kuta zakreta istog.

Na temelju podataka odziva i provedene identifikacije bilo je moguće odrediti potisak koji se razvija na postavu i kao takav upravlja postavom. Također u radu je uspoređen stvarni i simulirani odziv kao validacija podataka.

Na temelju danog postava i modela letjelice simulirano je vladanje valjanja letjelice pod utjecajem potisnika na krilima i pokazano je kako sila razvijena u ovom radu nije dostatna za upravljanje kutem valjanja već je dovoljna isključivo za ustabiljavanje sustava koji je već dovoljno blizu stabilnom letu u odnosu na kut valjanja.

Ključne riječi: Letjelica, ionska propulzija, ionski potisak, ionski vjetar, propulzija bez pomičnih dijelova

Abstract

Ion propulsion, although often associated with space, also offers significant opportunities to improve the performance of aircraft under atmospheric conditions. One of the key components of this technological approach is the corona discharge, which plays a central role in generating thrust without moving parts. Additionally, the use of a combination of thrusters on the aircraft configuration further opens pathways for roll control of the aircraft, which is essential for its stability and control.

In this paper, a setup is presented that enables the calculation process of ion thruster parameters and, based on that, allows for roll control of the setup. It is demonstrated how ion propulsion generates sufficient thrust to create and control the roll angle of the setup.

Based on the response data and conducted identification, it was possible to determine the thrust developed on the setup, which in turn controls the setup. The paper also compares the actual and simulated responses as a validation of the data.

Using the given setup and aircraft model, the behavior of aircraft rolling under the influence of wing-mounted thrusters was simulated, and it was shown that the force developed in this study is not sufficient for roll angle control but is adequate solely for stabilizing the system that is already close to stable flight with respect to the roll angle.

Keywords: aircraft, ionic propulsion, ionic thrust, ionic wind, solid state propulsion