



UNIVERZITET U SARAJEVU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
ODSJEK ZA AUTOMATIKU I ELEKTRONIKU

Adaptivno upravljanje laboratorijskim modelom helikoptera

ZAVRŠNI RAD
- PRVI CIKLUS STUDIJA -

Student:
Asija Boračić

Mentor:
Red. prof. dr Jasmin Velagić

Sarajevo,
juli 2023.

Sažetak

Završni rad se bavi sintezom i primjenom adaptivnog regulatora na laboratorijski model helikoptera CE150. Rad predstavlja arhitekturu laboratorijskog modela helikoptera, pojašnjava princip njegovog rada, daje jednačine koje opisuju dinamiku modela helikoptera. Na osnovu simulacijskog modela helikoptera obavlja se sinteza regulatora. Nadalje, u radu je dat kratak teoretski uvod u princip rada PID regulatora i adaptivnog upravljanja, pri čemu se u radu od struktura adaptivnog upravljanja koristi regulator sa promjenljivim pojačanjem postojećeg PID regulatora. Na kraju je izvršena verifikacija sistema upravljanja i dobiveni simulacijski i eksperimentalni rezultati za obje vrste regulatora, te je izvršena njihova komparativna analiza. Na osnovu dobijenih rezultata izvedeni su odgovarajući zaključci o valjanosti performansi regulatora.

Abstract

The final paper covers the topic of synthesis and application of an adaptive controller on the laboratory model of a helicopter CE150. The paper presents the architecture of the laboratory model of the helicopter, explains the principle of its operation, and provides equations describing the dynamics of the helicopter model. Based on the simulation model of the helicopter, the controller is synthesized. Furthermore, the paper gives a short theoretical introduction to the working principles of PID controllers and adaptive control, whereby in the work of the adaptive control structure uses a variable gain controller of the existing PID regulator. At the end, the control system was verified and the obtained simulation and experimental results for both types of regulators, and their comparative analysis was performed. Based on the obtained results, appropriate conclusions were drawn about the validity of the performance of the regulator.

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Odsjek za automatiku i elektroniku
Red. prof. dr Jasmin Velagić, dipl.el.ing
Sarajevo, 18.7.2023.

Postavka zadatka završnog rada I ciklusa:

U ovom radu je potrebno:

- opisati dinamiku nelinearnog laboratorijskog modela helikoptera CE150 i izvršiti modeliranje modela u programskom alatu MATLAB/Simulink,
- obaviti sintezu adaptivnog regulatora sa promjenljivim pojačanjem u različitim režimima leta, odnosno promjene uglova elevacije i azimuta,
- verificirati efikasnost razvijenog adaptivnog regulatora kroz simulaciju i eksperimente.

Polazna literatura:

- [1] Åström, K.J. and Wittenmark, B., *Adaptive Control*, Dover Publications, 2008.
- [2] Osmić Nedim (2009). *Sinteza fuzzy viševarijabilnog sistema upravljanja i stabilizacije laboratorijskog modela helikoptera*, Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Red. prof. dr Jasmin Velagić, dipl. ing. el.

Izjava o autentičnosti radova

Završni rad I ciklusa studija

Ime i prezime: Asija Boračić

Naslov rada: Adaptivno upravljanje laboratorijskim modelom helikoptera

Vrsta rada: Završni rad Prvog ciklusa studija

Broj stranica: 42

Potvrđujem:

- da sam pročitao dokumente koji se odnose na plagijarizam, kako je to definirano Statutom Univerziteta u Sarajevu, Etičkim kodeksom Univerziteta u Sarajevu i pravilima studiranja koja se odnose na I i II ciklus studija, integrirani studijski program I i II ciklusa i III ciklus studija na Univerzitetu u Sarajevu, kao i uputama o plagijarizmu navedenim na web stranici Univerziteta u Sarajevu;
- da sam svjestan univerzitetskih disciplinskih pravila koja se tiču plagijarizma;
- da je rad koji predajem potpuno moj, samostalni rad, osim u dijelovima gdje je to naznačeno;
- da rad nije predat, u cjelini ili djelimično, za stjecanje zvanja na Univerzitetu u Sarajevu ili nekoj drugoj visokoškolskoj ustanovi;
- da sam jasno naznačio prisustvo citiranog ili parafraziranog materijala i da sam se referirao na sve izvore;
- da sam dosljedno naveo korištene i citirane izvore ili bibliografiju po nekom od preporučenih stilova citiranja, sa navođenjem potpune reference koja obuhvata potpuni bibliografski opis korištenog i citiranog izvora;
- da sam odgovarajuće naznačio svaku pomoć koju sam dobio pored pomoći mentora i akademskih tutora/ica.

Sarajevo, 18.7.2023.

Potpis:

Asija Boračić

Sadržaj

Popis slika	vi
Popis tabela	vii
1 Uvod	1
1.1 Opis problema	1
1.2 Pregled područja istraživanja	1
1.3 Motivacija	1
1.4 Zadaci i ciljevi istraživanja	2
1.5 Struktura rada	2
2 Laboratorijski model helikoptera	3
2.1 Uvod	3
2.2 Arhitektura sistema	4
2.3 Matematski model helikoptera	5
3 Sinteza adaptivnog regulatora	9
3.1 Uvod	9
3.2 PID regulator	9
3.2.1 O regulatoru	9
3.2.2 Određivanje parametara PID regulatora	11
3.3 Adaptivni regulator	12
3.3.1 Regulator s promjenljivim pojačanjem - Gain scheduling	12
3.3.2 Određivanje parametara regulatora korištenjem lookup tabela	13
3.4 Određivanje parametara regulatora korištenjem polinomskih funkcija	14
4 Verifikacija sistema upravljanja	16
4.1 Uvod	16
4.2 Simulacijski rezultati	16
4.2.1 PID regulator	18
4.2.2 Adaptivni regulator - elevacijski ugao	19
4.2.3 Adaptivni regulator - azimutni ugao	21
4.3 Eksperimentalni rezultati	24
4.3.1 PID regulator	25
4.3.2 Adaptivni regulator - elevacijski ugao	26
4.3.3 Adaptivni regulator - azimutni ugao	29

Popis slika

2.1	Laboratorijski model helikoptera	3
2.2	Prikaz uglova helikoptera	4
2.3	Konačni model helikoptera u okruženju Simulink	8
3.1	Blokovska struktura sistema automatskog upravljanja sa PID regulatorom	9
3.2	Struktura PID regulatora sa podešenim parametrima	11
3.3	Blok dijagram gain scheduling regulatora	12
3.4	Upotreba Curve Fitting Tool-a za određivanje funkcije	15
4.1	Shema u Simulinku za PID regulator	16
4.2	Shema u Simulinku uz korištenje lookup tabela	17
4.3	Shema u Simulinku uz korištenje funkcija za određivanje parametara	17
4.4	Odzivi dobijeni simulacijom za elevacijski ugao	18
4.5	Odzivi dobijeni simulacijom za azimutni ugao	18
4.6	Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj lookup tabela	19
4.7	Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj funkcija	20
4.8	Poređenje rezultata dobijenih simulacijom na dva različita načina	20
4.9	Prikaz svih dobijenih signala za elevacijski ugao	21
4.10	Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj lookup tabela	22
4.11	Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj funkcija	22
4.12	Poređenje rezultata dobijenih simulacijom na dva različita načina	23
4.13	Prikaz svih dobijenih signala za azimutni ugao	23
4.14	Simulink shema za snimanje odziva	24
4.15	Shema upravljanja modelom helikoptera	25
4.16	Odziv elevacijskog ugla korištenjem PID-a	25
4.17	Odziv azimutnog ugla korištenjem PID-a	26
4.18	Odziv elevacijskog ugla	27
4.19	Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć lookup tabela	27
4.20	Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć funkcija za određivanje parametara	28
4.21	Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla za različite regulatore	28
4.22	Odziv azimutnog ugla sa koeficijentom $k=0.7$	29
4.23	Odziv azimutnog ugla sa koeficijentom $k=0.685$	30
4.24	Poređenje odziva sa dva različita koeficijenta	30
4.25	Poređenje stvarnog odziva azimutnog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć lookup tabela	31
4.26	Poređenje stvarnog odziva azimutnog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć funkcija za određivanje parametara	31

4.27 Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla za različite regulatore	32
--	----

Popis tabela

3.1	Parametri PID regulatora	11
3.2	Lookup tabela za elevacijski ugao	14
3.3	Lookup tabela za azimutni ugao	14

Poglavlje 1

Uvod

1.1 Opis problema

Završni rad bavi se problematikom upravljanja helikopterom, koji je predstavnik jednog više-varijabilnog, složenog, nelinearnog sistema. Upravljanje njime kao takvim je dosta zahtjevno. Sistem je sam po sebi inherentno nestabilan i u njegovoj dinamici su prisutne velike varijacije. Da bi bio stabilan, njime se mora upravljati. U sistemu su osim toga prisutni jaki međusprežni efekti između dva ugla, elevacijskog i azimutnog, koji ujedno predstavljaju i veličine od interesa za upravljanje u ovom slučaju. Uzimajući sve navedeno u obzir, adaptivno upravljanje je teoretski jako pogodno za ovakve sisteme. Ono je primarno orijentisano na eliminisanje poremećaja na performanse sistema upravljanja. Adaptivni regulator je pogodan jer mijenja svoje parametre u zavisnosti od trenutne radne tačke i rezultati pokazuju da se nakon adaptivnog prijelaza (procedure namještanja parametara regulatora) postiže zahtijevana nominalna performansa [5].

1.2 Pregled područja istraživanja

Kada je riječ o adaptivnom upravljanju, u literaturi se mogu pronaći razne teorije i algoritmi koji se baziraju na sposobnosti sistema da samostalno procijeni i prilagodi svoje parametre ili strukturu na temelju informacija koje prikuplja iz okoline ili unutar sistema. Glavna svrha adaptivnog upravljanja je da se osigura stabilnost i preciznost u promjenljivim uslovima, kao i da se poboljšaju performanse sistema. Svi adaptivni algoritmi kontinuirano procjenjuju ili mijenjaju parametre sistema na osnovu povratnih informacija o stanju i izlazu sistema. Neki od najpoznatijih tipova adaptivnih regulatora su: regulator sa promjenljivim pojačanjem (engl. gain scheduling), adaptivni regulator sa referentnim modelom (engl. MRAC), samopodesivi regulatori (engl. self-tuning controllers) te adaptivni regulator sa postavljanjem polova [8]. Primjena ovakvih regulatora na nelinearni sistem koji predstavlja helikopter, ne samo konkretno model CE150 već i razni drugi, tema je od interesa i na nju je napisano dosta radova. Zaključak većine njih je da su adaptivni regulatori dobar odabir za ovakve sisteme i da daju dobre rezultate, odnosno da sistem s njima postiže odgovarajuće performanse.

1.3 Motivacija

S obzirom da adaptivni regulatori nude fleksibilnost i prilagodljivost u upravljanju sistemima koji su izloženi promjenljivim uslovima i nesigurnostima, te da njihova primjena može unaprijediti stabilnost, performanse i pouzdanost sistema u različitim industrijama, djeluju kao jako

dobar izbor za primjenu nad sistemom helikoptera. Implementacija jednog ovakvog regulatora dobra je prilika da se teoretska znanja stečena na predmetu Mehatronika nadograđe praktično. Regulator sa promjenljivim pojačanjem koji će se razmatrati u nastavku je odabran kao relativno jednostavna metoda koja počiva na PID regulatoru, o kojem je već bilo riječi u toku osnovnih akademskih studija, a za koju se očekuje da da bolje rezultate i da će poboljšati performanse sistema i obezbijediti mu stabilnost.

1.4 Zadaci i ciljevi istraživanja

Cilj rada je uspješno implementirati jednu vrstu adaptivnog regulatora, konkretno regulator sa promjenljivim pojačanjem (tzv gain scheduling) kojim će se uspješno upravljati nelinearnim sistemom koji zapravo predstavlja helikopter. Da bi se to postiglo, prvo se mora upoznati model helikoptera odnosno njegova arhitektura i način rada. Također je neophodno imati matematski model sistema, kako bi se na osnovu istoga mogla vršiti sinteza regulatora. Drugi od ciljeva je uporediti rezultate koje daje adaptivni regulator sa rezultatima običnog PID regulatora, te pokazati da je i zašto je adaptivni regulator bolji izbor u odnosu na PID regulator. Implementacija i verifikacija će se vršiti u softverskom alatu MATLAB/Simulink.

1.5 Struktura rada

Završni rad je organizovan u četiri poglavlja, čiji će kratki opisi biti dati u nastavku.

U uvodnom dijelu je pojašnjen problem koji se razmatra te je data motivacija za rješavanjem istog. Predočen je pregled područja istraživanja koji je usko vezan za temu, predstavljeni su zadaci kao i ciljevi istraživanja i još je opisana struktura rada.

U drugom poglavlju je opisan laboratorijski model helikoptera CE150. Opisana je arhitektura sistema, relacije koje opisuju njegovu dinamiku te je predstavljen model sistema pogodan za daljnju sintezu regulatora.

Treće poglavlje daje teoretsku osnovu o PID i adaptivnom regulatoru koji će biti implementirani na sistemu. Pokazan je način i proces određivanja parametara regulatora za oba slučaja i dati su rezultati sinteze. Sa ovim rezultatima kreće se u proces verifikacije sistema upravljanja

Četvrto poglavlje prikazuje sheme u simulacijskom okruženju koje su korištene za verifikaciju sistema i u simulacijskom i u eksperimentalnom okruženju. Prikazani su rezultati i za PID i za adaptivni regulator te njihova međusobna poređenja. Na osnovu ovih rezultata doneseni su zaključci o kakvoći regulatora.

Na samom kraju izveden je zaključak te je dat popis korištene literature.

Poglavlje 2

Laboratorijski model helikoptera

2.1 Uvod

Sistem upravljanja laboratorijskim modelom helikoptera Humosoft CE150 sastoji se od procesorski baziranog sistema MF 624, napojne jedinice, DC motora koji su zapravo izvršni organi pozicioniranja helikoptera u dvije ravni (vertikalna i horizontalna), enkodera (koji daju informaciju o trenutnim uglovima) i upravljačkog softvera (Real-time toolbox). Pozicioniranje helikoptera vrši se upravljanjem elevacijskim i azimutnim uglom. Ovi uglovi ujedno predstavljaju i dva stepena slobode sistema. Na slici 2.1 je prikazan ovaj sistem. U nastavku će biti ukratko pojašnjena arhitektura i način upravljanja samim sistemom, te će se predložiti njegov matematski model.



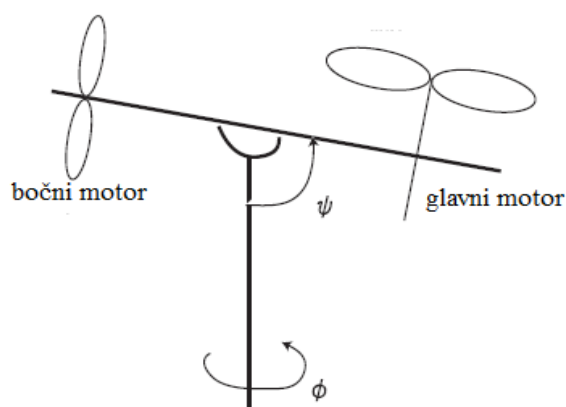
Slika 2.1: Laboratorijski model helikoptera

2.2 Arhitektura sistema

Model se sastoji od tijela koje sadrži dva DC motora, koja pogone dva propelera. Senzori, u ovom slučaju enkoderi, su zaduženi za određivanje uglova elevacije(ψ) i azimuta(ϕ). Slika 2.2 ilustrativno prikazuje simplificirani model helikoptera sa naznačenim uglovima. Analizirani sistem je multivarijabilni odnosno MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) sistem, u smislu da posjeduje dva ulaza i dva izlaza. Ulazi i izlazi su međusobno spregnuti. Karakteristike tijela navedenog helikoptera preuzete su iz kataloga [10] a to su:

- dužina modela: 300 mm (bez propelera) odnosno 370 mm (sa propelerom),
- visina modela: 440mm,
- osnova modela: kvadratna baza dimenzija 300 x 300 mm, uz sigurnosni kavez dimenzija 800 x 800 x 800 mm,
- težina modela: 3.5kg,
- moguća rotacija za elevaciju: $\pm 45^\circ$,
- moguća rotacija za azimut: $\pm 135^\circ$.

Za normalan rad helikopteru je neophodno električno napajanje 100-240 VAC, 400W, 50Hz, te prostor od 1.5m x 900mm. Optimalan rad moguć je u laboratorijskim uslovima, sa temperaturnim rasponom 5-40°.



Slika 2.2: Prikaz uglova helikoptera

Upravljanje sistemom u realnom vremenu vrši se uz pomoć PC računara korištenjem softverskog okruženja MATLAB/Simulink. Ovo je moguće uz pomoć RTW (Real-time Workshop), koji obavlja funkciju prevođenja vrijednosti upravljačkih varijabli u podatke razumljive sistemu za rad u realnom vremenu. Osnovni dio za komunikaciju između računara i objekta upravljanja je višefunkcionalna kartica MF 624. Upravljanje motorima se zasniva na širinsko impulsnoj modulaciji (engl. PWM-Pulse Wave Modulation). Upravljački sklop koji ostvaruje širinsko impulsnu modulaciju je H-most. [11]

2.3 Matematski model helikoptera

Da bi se mogli vršiti sinteza regulatora i samo upravljanje modelom helikoptera, neophodno je modelirati sistem. Model sistema je pojednostavljena reprezentacija stvarnog sistema ili procesa koja se koristi za analizu, predviđanje ili simulaciju njegovog ponašanja. To je apstraktni koncept koji omogućava razumijevanje, planiranje i upravljanje sistemom. Model može biti matematski model koji koristi jednačine i algoritme za opisivanje ponašanja sistema, ili može biti grafički model koji koristi dijagrame, simbole i veze za predstavljanje različitih komponenti sistema i njihovih odnosa. Za dobivanje matematskog modela pored jednačina koje opisuju sami sistem potrebno je i identificirati parametre koji opisuju sistem. Međutim, proces identifikacije sistema zahtijeva znanja koja nisu stečena na prvom ciklusu studija i dosta je komplikovan. Zbog toga će se koristiti već gotov model, preuzet iz [11], ali će biti data generalna pojašnjenja da bi bilo jasno kako se zapravo došlo do modela.

Do matematskog modela sistema može se doći teoretskim ili eksperimentalnim putem. Teoretski put je dosta izazovan i često ne daje rezultate prikladne za primjenu, tako da je ovdje korišten eksperimentalni put. Za modeliranje dinamike sistema pretpostavljeno je da se centar mase ne može pomjerati. Poznato je da tijelo helikoptera ima dva stepena slobode, elevacijski i azimutni ugao (ψ i ϕ , respektivno), da su ose dva propelera ortogonalne jedna na drugu i da sistem ima dva izlaza (sami uglovi) i dva ulaza (naponi glavnog i bočnog motora, u_1 i u_2). Eksperimenti su vršeni u Simulink okruženju i korišten je opis pomoću diferencijalnih jednačina (II Njutnov zakon).

Kretanje helikoptera u vertikalnoj i horizontalnoj osi definirano je jednačinom momentne ravnoteže:

$$I\ddot{\psi} = \tau_1 + \tau_\phi + \tau_G - \tau_m - \tau_{f_1} \quad (2.1)$$

gdje je:

I - moment inercije tijela helikoptera uslijed rotacije oko horizontalne osi [kg/m^2],

τ_1 - moment stvoren rotacijom glavnog propelera [Nm],

τ_ϕ - centrifugalni moment [Nm],

τ_G - žiroskopski obrtni moment [Nm],

τ_m - gravitacijski obrtni moment [Nm],

τ_{f_1} - momenti viskoznog i Coulombovog trenja [Nm].

Momente iz jednačine 2.1 opisuju izrazi:

$$\tau_1 = k_{\omega_1} \omega_1^2 \quad (2.2)$$

$$\tau_\phi = ml\dot{\phi}^2 \sin\psi \cos\psi \quad (2.3)$$

$$\tau_G = k_G \dot{\phi} \omega_1 \cos\psi \quad (2.4)$$

$$\tau_m = F_m l \sin\psi = mgl \sin\psi \quad (2.5)$$

$$\tau_{f_1} = C_\psi \text{sign}\dot{\psi} + B_\psi \dot{\psi} \quad (2.6)$$

Jednačina koja modelira dinamiku azimuta glasi:

$$I_\psi \ddot{\phi} = \tau_2 - \tau_r - \tau_{f_2} \quad (2.7)$$

gdje vrijedi:

τ_2 - moment uslijed stabilizacije motora [Nm],

τ_r - reakcioni moment glavnog motora,

τ_{f_2} - momenti viskoznog i Colombovog trenja [Nm].

pri čemu su izrazi koji opisuju nepoznate:

$$I_\psi = I \sin \psi \quad (2.8)$$

$$\tau_{f_1} = C_\phi \text{sign} \dot{\phi} + B_\phi \dot{\phi} \quad (2.9)$$

$$\tau_{f_2} = k_2 l_2 \sin \psi \omega_2^2 \quad (2.10)$$

Dinamiku DC motora opisuju sljedeći izrazi:

$$i = \frac{1}{R}(u - K_b \omega) \quad (2.11)$$

$$\tau = K_i i \quad (2.12)$$

$$\tau_c = C \text{sign} \omega \quad (2.13)$$

$$\tau_p = B_p \omega + D_p \omega \quad (2.14)$$

$$I \dot{\omega} = \tau - \tau_c - \tau_p - B \omega \quad (2.15)$$

gdje je:

i - trenutna struja [A],

u - upravljački ulazni napon[V],

R - otpornost armature motor [Ω],

K_b - konstanta protuelektromotornesile [Vs],

ω - ugaona brzina rotora [rad/s],

τ - pogonski moment motora [Nm],

K_i - momentna konstanta [Nm/A],

τ_c - moment tereta i moment uslijed Coulombovog trenja [Nm],

C - koeficijent Coulombovog trenja [Nm],

τ_p - moment otpora zraka [Nm],

B_p - koeficijent otpora zraka (laminarni tok),

D_p - koeficijent otpora zraka (turbulentni tok),

I - moment trenja rotora i propelera [kgm^2],

B - koeficijent viskoznog trenja [Nms].

Momente jednačine koje opisuju karakteristike propelera, koje sadrže cijeli skup ugaonih brzina glase:

$$\tau_1 = K_{\omega_1} \omega_1^2 \text{sign}(\omega_1) \quad (2.16)$$

$$\tau_2 = K_{\omega_2} \omega_2^2 \text{sign}(\omega_2) \quad (2.17)$$

gdje je:

ω_1 - ugaona brzina glavnog propelera [rad/s],

τ_1 - ugaoni moment uslijed rada glavnog propelera [Nm],

ω_2 - ugaona brzina stabilizirajućeg propelera [rad/s],

τ_2 - azimutni moment uslijed djelovanja repnog propelera [Nm].

Izrazi koji opisuju apsolutni enkoder, koji se smatra kao linearan u cijelom opsegu uglova od interesa slijede u nastavku, pri čemu treba napomenuti da je MU zapravo oznaka za mašinske jedinice:

$$y_\psi = k_\psi \psi + y_{\psi_0} \quad (2.18)$$

$$y_\varphi = k_\varphi \varphi \quad (2.19)$$

gdje je:

ψ - elevacija [rad],

y_ψ - elevacija [MU],

k_ψ - elevacijska konstanta [MU/rad],

y_{ψ_0} - senzor elevacije sa pomjerajem od $\psi = 0$,

φ - azimut [rad],

y_φ - azimut [MU],

k_φ - azimutna konstanta [MU/rad].

Pojačala koja se koriste za pokretanje DC motora imaju linearnu funkciju koju opisuje jedna-kost:

$$u_a = Ku \quad (2.20)$$

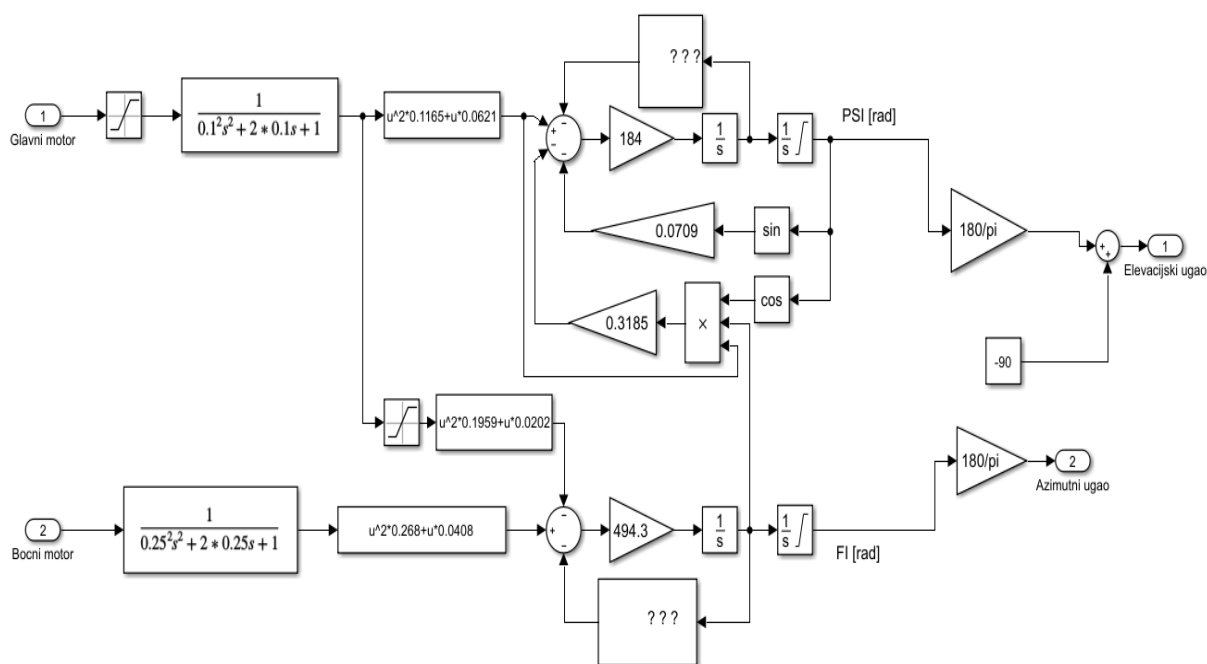
gdje je:

u - izlazna vrijednost iz računara [MU],

u_a - napon armature [V],

K - vrijednost pojačanja [V/MU].

Na osnovu ovih jednačina dobijen je teoretski model sistema čije je parametre potrebno odrediti putem identifikacije. Identifikacija parametara motora vršena je na više načina: direktnim mjerenjem parametara, posmatranjem odziva sistema na unaprijed poznate ulaze, te primjenom jednostavnih genetskih algoritama. Uvedena su i određena zanemarenja i izmjene, konkretno linearizacija elevacijskog i azimutnog ugla, sa ciljem pojednostavljivanja modela sistema ali bez opasnosti da naruše dinamiku sistema. Krajnji rezultat ovih zahtjevnih postupaka je model već spojen u Simulink okruženju koji je prikazan na slici 2.3 i kao ovakav će biti korišten nadalje za sintezu regulatora, kao i simulacijski rad. Bitno je napomenuti da su blokovi vidljivi na slici, koji su označeni sa ???, zapravo podsistemi koji predstavljaju skaliranje određenih veličina i tako su odvojeni zbog preglednosti sheme.



Slika 2.3: Konačni model helikoptera u okruženju Simulink

* * *

U ovom poglavlju je predstavljen izgled laboratorijskog modela helikoptera te je opisana njegova arhitektura. Predstavljene su jednačine u formi II Njutnovog zakona koje opisuju dinamiku modela helikoptera, koje daju teoretski model motora. Taj složeni model je djelimično reduciran zbog jednostavnijeg modeliranja uvođenjem zanemarenja koja ne narušavaju dinamiku. Ukratko je opisan način identifikacije parametara sistema i način na koji je ista vršena, te je dat finalni model sistema. Uz ovaj model sistema može se pristupiti sintezi regulatora za potrebe upravljanja sistemom.

Poglavlje 3

Sinteza adaptivnog regulatora

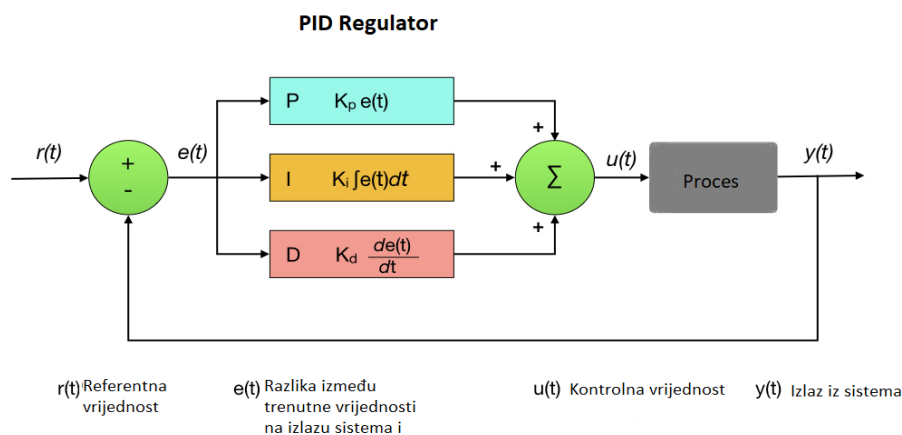
3.1 Uvod

Budući da je matematski model helikoptera predložen u prethodnom poglavlju, može se pristupiti sintezi regulatora. Ukratko će se teoretski pojasniti oba tipa regulatora. Prvo će biti određeni parametri PID regulatora elevacijskog i azimutnog ugla, da bi se rezultat mogao poređiti sa adaptivnim regulatorom. Adaptivni regulator biti će realiziran kao PID regulator, ali sa promjenljivim parametrima. To zapravo znači da će biti određene vrijednosti parametara PID regulatora za više radnih tačaka na načine koji će biti opisani u nastavku.

3.2 PID regulator

3.2.1 O regulatoru

Upravljanje se može definisati kao proces primjene algoritama i tehnika kako bi se postigla željena performansa, stabilnost i preciznost sistema. Različite metode kontrole procesa koriste se za manipulaciju procesima, ali najjednostavniji i često najučinkovitiji je PID regulator. Regulator pokušava ispraviti grešku između izmjerene procesne varijable i željene zadane vrijednosti računanjem razlike, a zatim provođenjem korektivnih radnji kako bi prilagodio proces. PID regulator kontroliše proces kroz tri parametra: proporcionalni (P), integralni (I) i derivativni (D) [1]. Ovi se parametri mogu kvalitetno podesiti kako bi se prilagodio njihov uticaj na proces.



Slika 3.1: Blokovska struktura sistema automatskog upravljanja sa PID regulatorom

Veza između izlaza i ulaza jednog PID regulatora je data relacijom:

$$x(t) = K_p \cdot [u(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t u(t)dt + T_d \cdot \frac{du(t)}{dt}] \quad (3.1)$$

Gdje su parametri dati kao:

- K_p - koeficijent pojačanja
- T_i - integralna vremenska konstanta
- T_d - derivativna vremenska konstanta

Komponenta P regulatora osigurava linearni odnos između greške sistema i izlaza regulatora. Regulator izračunava razliku između zadane i trenutne vrijednosti signala (grešku sistema) i šalje tu vrijednost algoritmu. Algoritam određuje radnju koju bi kontroler trebao poduzeti. Proporcionalni regulator je pogodan jer je potrebno odrediti vrijednost samo jednog parametra. Karakteriše ga dobra stabilnost i može ubrzati spor odziv sistema. S druge strane, nakon djelovanja regulatora uvijek postoji razlika između željene i stvarne vrijednosti izlazne veličine.

Zbog ograničenja P-regulatora, gdje uvijek postoji razlika između procesne varijable i zadane vrijednosti, potreban je I-regulator, koji obezbjeđuje neophodnu akciju za eliminaciju greške stacionarnog stanja. Integrira grešku u određenom vremenskom periodu dok vrijednost greške ne dostigne nulu. Proporcionalno povezuje grešku $e(t)$ sa brzinom promjene upravljačke promjenjive $u(t)$. Mana ovog regulatora je što povećava inertnost sistema. Uspješno otklanja grešku stacionarnog stanja, ali sistem sporije reaguje na ulaze. U većini slučajeva, I regulator se koristi tamo gdje nije potreban brzi odziv. Oni mogu vratiti kontrolisanu varijablu na tačno zadatu tačku nakon poremećaja, zbog čega su poznati kao reset regulatori.

Kako I-kontroler nema sposobnost predviđanja budućeg ponašanja pogreške, tako da normalno reaguje nakon promjene zadane vrijednosti, D-kontroler prevladava ovaj problem predviđanjem budućeg ponašanja greške. Poboljšava stabilnost sistema kompenzacijom faznog kašnjenja uzrokovanog I-kontrolerom. Povećanjem T_d povećava se i brzina odgovora [2]. Kao što i naziv implicira, u D regulatoru izlaz (koji se također naziva pokretački signal) direktno je proporcionalan derivaciji signala greške.

Kao što je prikazano u gornjoj jednačini 3.1, PID regulator je kombinacija sve tri vrste upravljanja. PID kontrola se koristi kada proces mora biti precizan i imati jako brz odziv. Kada se govori o podešavanju parametara PID regulatora moguće je izdvojiti nekoliko metoda:

- **Eksperimentalno podešavanje**

Veoma se često koristi i podrazumijeva ručno podešavanje parametara regulatora dok se ne postigne željeno ponašanje. Postupak se zasniva na subjektivnom osjećaju automatičara.

- **Podešavanje na temelju prethodno obavljenih simulacijskih eksperimenata**

Princip dolaženja do vrijednosti parametara je isti kao za prethodno navedenu metodu, ali se eksperiment ne vrši na stvarnom, fizičkom sistemu, već u simulacijskom okruženju.

- **Analitičko podešavanje**

Ovaj način zahtjeva detaljan i precizan matematički model koji vjerodostojno opisuje dinamiku sistema. Upotrebljavaju se neke od provjerenih metoda sinteze iz područja algebarske teorije sistema.

• Automatsko podešavanje

Novi način podešavanja koji se obavlja u stvarnim uslovima rada sistema. Eksperiment se obavlja potpuno automatizovano, na temelju dobivenih parametara iz eksperimenta računaju se parametri regulatora koji se automatski i postavljaju.

Ovisno o režimu rada odabir parametara bi trebao da ima dvojak uticaj na sistem:

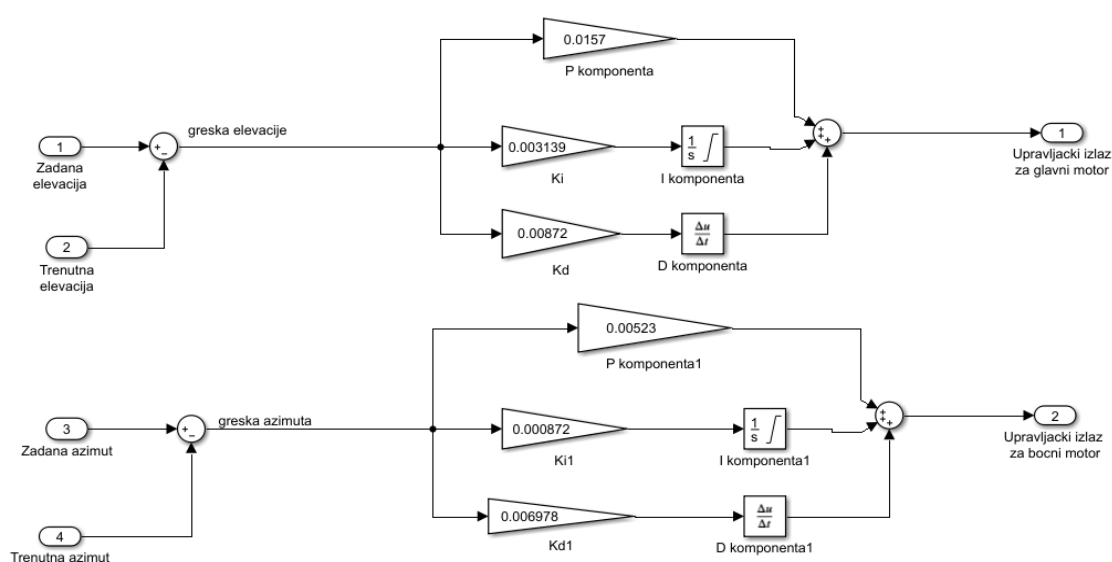
- brz odziv na promjenu referentne veličine sa što manjim prebačajem i vremenom smirivanja
- brz oporavak od poremećaja, što podrazumijeva brz povratak na stacionarno stanje u kojem se sistem nalazio prije poremećaja [3].

3.2.2 Određivanje parametara PID regulatora

Određivanje parametara PID regulatora vršeno je eksperimentalno, metodom pokušaj-pogreška. Postavljane su vrijednosti za dva PID regulatora, jedan za elevacijski i jedan za azimutni ugao. Konačne vrijednosti parametara za PID regulatore predočene su u tabeli 3.1. Slika 3.2 prikazuje konačni izgled PID regulatora u Simulink okruženju.

Tabela 3.1: Parametri PID regulatora

	K_p	K_i	K_d
elevacijski	0.0157	0.003139	0.00872
azimutni	0.00523	0.000872	0.006978



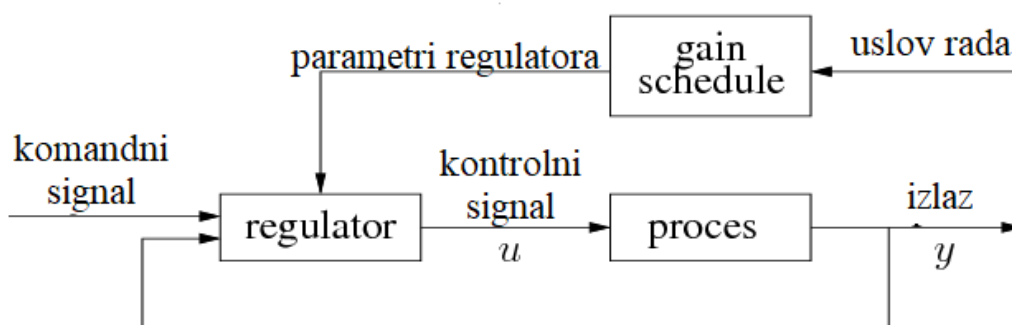
Slika 3.2: Struktura PID regulatora sa podešenim parametrima

3.3 Adaptivni regulator

3.3.1 Regulator s promjenljivim pojačanjem - Gain scheduling

Adaptivno upravljanje predstavlja sistematičan pristup automatskom podešavanju (namještanju) regulatora u realnom vremenu s ciljem održavanja željene razine upravljačkih performansi kada su parametri dinamičkog modela procesa nepoznati i/ili se vremenski mijenjaju. Ovakav sistem upravljanja mjeri određeni indeks performansi (u nastavku IP) sistema upravljanja korištenjem ulaza, stanja, izlaza i poznatih poremećaja. Na osnovu poređenja izmjerene IP-a i zadanog skupa IP-ova, adaptacijski mehanizam modifikuje parametre podesivog regulatora i/ili generiše pomoćno upravljanje da bi održao IP sistema upravljanja bliskim zadanom skupu IP-a (unutar skupa prihvatljivih IP-ova). Adaptivno upravljanje se često primjenjuje u situacijama gdje su parametri sistema nesigurni, promjenljivi ili ih je teško modelirati. To može uključivati situacije gdje se sistem suočava s promjenljivim uslovima okoline, varijacijama u dinamici procesa ili nepredvidivim smetnjama. Adaptivni kontroleri mogu se prilagoditi na te promjene i optimizirati svoje parametre kako bi se održalo dobro upravljanje sistemom.

Regulatori s promjenljivim pojačanjem (gain scheduling regulatori) su vrsta upravljačkih sistema koji koriste više setova kontrolnih parametara, nazvanih i "gainovi", i automatski prebacuju između njih na osnovu promjene radnih uslova ili promjene u dinamici sistema. Ova tehnika se koristi kada je sistem nelinearan ili se ponaša različito u različitim radnim uslovima.[6] Umjesto da koristi fiksne kontrolne parametre, kao što je u slučaju tradicionalnih regulatora, gain scheduling regulator koristi više setova parametara, gdje svaki set parametara odgovara određenom radnom uslovu ili dinamici sistema. Predstavlja pristup upravljanju nelinearnim sistemima putem skupa linearnih kontrolera, pri čemu svaki pruža zadovoljavajuće upravljanje za različite radne tačke sistema. Blok dijagram sistema upravljanja zasnovanog na gain schedulingu prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3: Blok dijagram gain scheduling regulatora

Upravljanje se obično implementira korištenjem regulatora čiji se parametri automatski prilagođavaju kao funkcija promjenljivih parametara koji opisuju trenutnu radnu tačku. Dizajniranje se najčešće vrši odabirom malog skupa radnih tačaka i određivanjem parametara linearnog kontrolera za svaku tačku. Za zadanu radnu tačku i , regulator s konstantnim pojačanjima θ_i može se dizajnirati tako da postiže zahtijevane performanse za odgovarajući linearni model. Na ovaj način se dobiva regulator $C(\theta)$ sa skupom pojačanja $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_N$ koji pokrivaju N radnih tačaka. Kada se u toku rada detektuje radna tačka, tada regulator mijenja svoja pojačanja θ_i na iznose koji odgovaraju toj radnoj tački, a koji se nalaze u prethodno određenom skupu

pojačanja. Ukoliko vrijednosti za danu radnu tačku nisu prethodno određene, tada se radi interpolacija između dvije najbliže pohranjene radne tačke.[4]

Za implementaciju ovog regulatora neophodna su dva elementa: tabela (lookup) u koju se pohranjuju vrijednosti pojačanja θ_i , i pomoćna mjerenja iz procesa koja koreliraju sa promjenama radnih tačaka. Prema tome, GS regulator sadrži tabelu sa prethodno određenim parametrima regulatora za korespondentnu radnu tačku i odgovarajuću logiku za detekciju radne tačke i izbor odgovarajućih pojačanja θ_i iz tabele. Lookup tabela se sastoji od dva osnovna dijela: ključeva (u ovom slučaju vrijednosti tzv. tačaka prekida) i odgovarajućih vrijednosti pojačanja. Kada vrijednosti promjenljivih parametara padnu između vrijednosti ključeva, lookup tabela interpolira između odgovarajućih vrijednosti pojačanja[7]. Ključevi su jedinstveni identifikatori (indeksi), dok su vrijednosti podaci koji su pohranjeni uz svaki ključ. Kada se želi dobiti vrijednost na osnovu ključa, sistem pretražuje tabelu i pronalazi odgovarajuću vrijednost. Prednosti ovih tabela su brzo pretraživanje i pristupanje podacima na osnovu ključeva, neovisno o veličini tabele.

Gain scheduling regulatori se često koriste u složenim industrijskim sistemima, kao što su postrojenja za proizvodnju, procesna postrojenja, robotski sistemi i slično. Primjenjuju se za upravljanje industrijskim procesima koji su osjetljivi na promjene opterećenja, promjene uslova okoline ili varijabilnost sirovina. Prednosti ovog tipa regulacije uključuju sposobnost prilagođavanja parametara u skladu sa promjenama u sistemima koji su nelinearni ili se ponašaju različito u različitim radnim uslovima. To može rezultovati boljom kontrolom sistema i poboljšanim performansama u usporedbi sa fiksiranim parametrima regulacije. Međutim, implementacija ovakve regulacije zahtijeva dobro razumijevanje sistema, identifikaciju radnih uslova i odgovarajuće postavljanje lookup tabela i/ili algoritama za odabir parametara.

3.3.2 Određivanje parametara regulatora korištenjem lookup tabela

Za sintezu adaptivnog regulatora originalno je odabran pristup korištenjem lookup tabela, koje su već spomenute. Tabele 3.2 i 3.3 sadrže sve parametre koji su korišteni za sintezu regulatora. Svi parametri su određeni eksperimentalnim putem za vrijednosti uglova koje su također date u tabeli. Za implementaciju regulatora pomoću lookup tabela koristiti će se istoimeni blok dostupan u Simulink okruženju, kao i parametar *PID controller*, koji će primati parametre eksterno odnosno preuzimati iste iz lookup tabela.

Tabela 3.2: Lookup tabela za elevacijski ugao

R.broj	Vr.elevacijskog ugla	Kp	Ki	Kd	N
1.	-40	0.0172547	0.0047584	0.0075	10
2.	-35	0.0169214	0.00512312	0.0065	10
3.	-33	0.0169214	0.00512312	0.0065	10
4.	-26	0.008754	0.00266	0.004	10
5.	-19	0.016	0.00314	0.0075	10
6.	-12	0.016	0.00314	0.0075	10
7.	-10	0.00987	0.0013654	0.004	10
8.	-5	0.00987	0.004254	0.004	10
9.	2	0.0169	0.0013654	0.005	10
10.	9	0.00987	0.00155	0.004	10
11.	16	0.00888	0.00155	0.0045	10
12.	23	0.00888	0.00354	0.0015	10
13.	30	0.00867	0.004879	0.0015	10
14.	37	0.0354	0.004231	0.005	10
15.	45	0.05478	0.004454	0.005	10

Tabela 3.3: Lookup tabela za azimutni ugao

R.broj	Vr.azimutnog ugla	Kp	Ki	Kd	N
1	-115	0.004	0.001843	0.0045	1
2	-100	0.00365	0.001375698	0.004	1
3	-80	0.00757	0.0010011	0.0047	1
4	-50	0.003757	0.001212	0.005	1
5	-22	0.003642	0.00189	0.0042	1
6	0	0.003528	0.001454	0.0041	1
7	20	0.004875	0.001234	0.0037	1
8	50	0.00456	0.00112	0.0041	1
9	80	0.00445	0.001	0.004	1
10	100	0.00474	0.00098	0.0042	1
11	115	0.003987	0.00098	0.0042	1

3.4 Određivanje parametara regulatora korištenjem polinomskih funkcija

Kako je na računar s kojim je povezan laboratorijski model helikoptera dostupna verzija MATLAB-a R2010, koja je dosta starija, nije bilo moguće pokrenuti originalno napravljenu shemu koja je uz pomoć lookup tabela mijenjala parametre PID regulatora. Konkretno je problem nastao u činjenici da blokovi PID regulatora u verziji R2010, za razliku od novijih verzija (shema je rađena u verziji R2017b), nema mogućnost postavljanja parametara regulatora uz korištenje eksternih izvora. S obzirom na ovaj problem, morao se naći neki drugi pristup za postavljanje parametara. Odabrana je varijanta u kojoj će se, uz pomoć alata Curve Fitting Tool (kao što je prikazano na slici 3.4) tražiti funkcija koja bi računala parametre u zavisnosti od trenutne vrijednosti ugla. Funkcije su proračunate za svaki od parametara **Kp**, **Ki** i **Kd** za i

elevacijski i azimutni ugao. Sve funkcije su polinomske, neke su četvrtog a neke petog stepena i prikazane su relacijama 3.2 - 3.7

$$Kp_e = 3.69e^{-9} \cdot u^4 + 3.456e^{-7} \cdot u^3 + 6.938e^6 \cdot u^2 - 0.0002047 \cdot u + 0.009773 \quad (3.2)$$

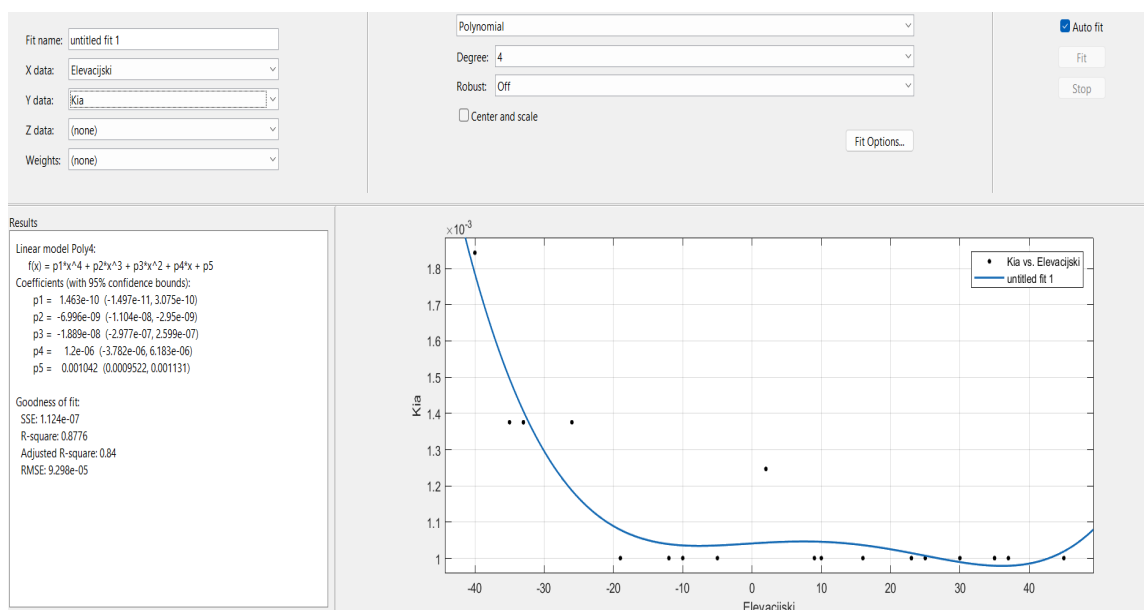
$$Ki_e = -2.128e^{-11} \cdot u^5 - 3.016e^{-10} \cdot u^4 + 5.158e^{-8} \cdot u^3 + 2.417e^{-6} \cdot u^2 - 3.68e^{-5} \cdot u + 0.001851 \quad (3.3)$$

$$Kd_e = 1.071e^{-9} \cdot u^4 + 1.598e^{-8} \cdot u^3 - 1.17e^{-6} \cdot u^2 - 6.158e^{-5} \cdot u + 0.004915 \quad (3.4)$$

$$Kp_a = -3.363e^{-11} \cdot u^4 + 4.184e^{-10} \cdot u^3 + 4.458e^{-7} \cdot u^2 - 5.306e^{-6} \cdot u + 0.003763 \quad (3.5)$$

$$Ki_a = 1.067e^{-11} \cdot u^4 - 2.069e^{-10} \cdot u^3 - 1.482e^{-7} \cdot u^2 - 3.74e^{-7} \cdot u + 0.001533 \quad (3.6)$$

$$Kd_a = -4.001e^{-12} \cdot u^4 + 6.369e^{-10} \cdot u^3 + 6.182e^{-8} \cdot u^2 - 8.23e^{-6} \cdot u + 0.004113 \quad (3.7)$$



Slika 3.4: Upotreba Curve Fitting Tool-a za određivanje funkcije

* * *

Nakon što su pojašnjeni pojmovi PID i regulatora sa promjenljivim pojačanjem, određeni su parametri za oba regulatora. Za PID regulator je to urađeno eksperimentalnim putem, dok su se u slučaju gain scheduling regulatora parametri odredili na dva različita načina: uz pomoć lookup tabela te korištenjem polinomske funkcije. Parametri dobijeni u procesu sinteze oba regulatora u nastavku će se iskoristiti za verifikaciju sistema upravljanja snimanjem kako simulacijskih, tako i eksperimentalnih odziva. Svi rezultati biti će predloženi te će se izvršiti njihova analiza i usporedba, kako bi se mogao donijeti zaključak o uspješnosti sinteze regulatora.

Poglavlje 4

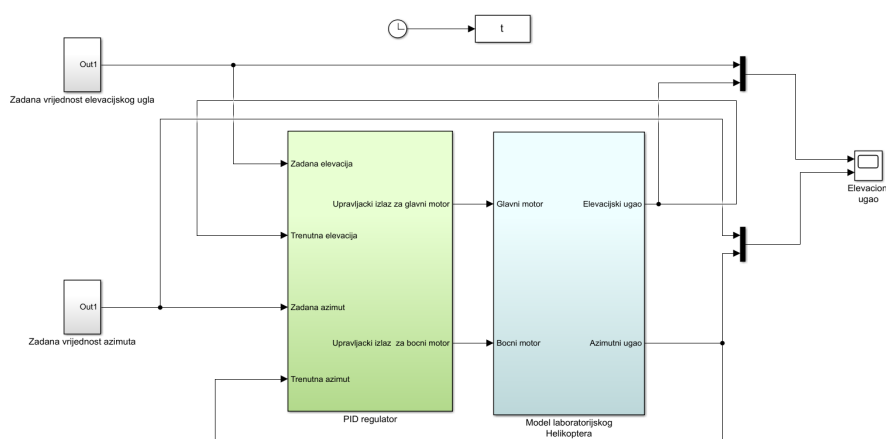
Verifikacija sistema upravljanja

4.1 Uvod

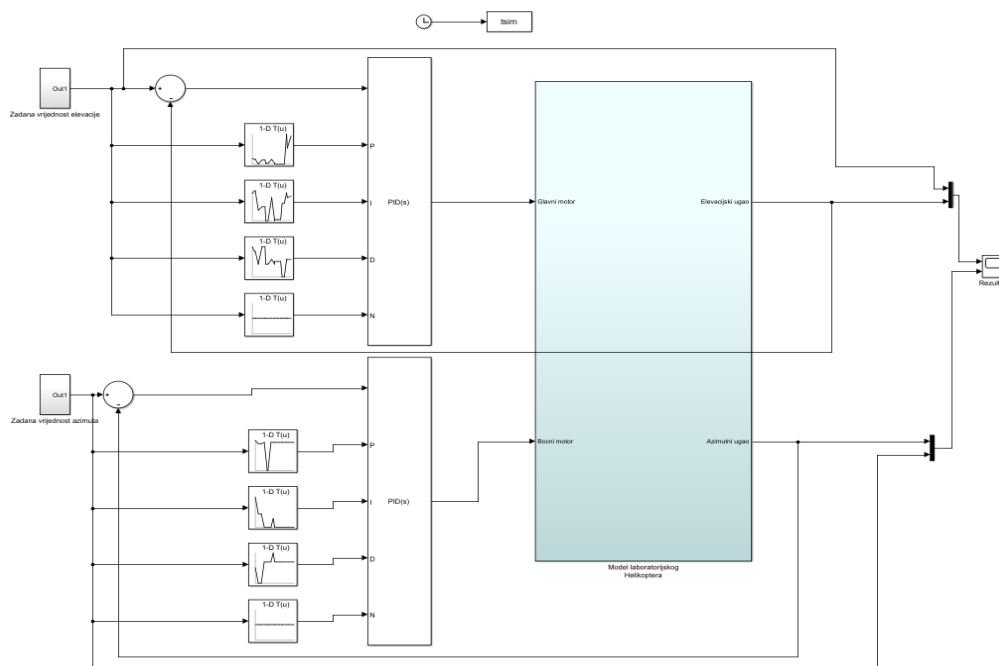
U prethodnom poglavlju vršena je sinteza PID i adaptivnog regulatora (regulator sa promjenljivim pojačanjem). PID regulator pokazuje jako dobre performanse kod upravljanja linearnim sistemima ali se kod upravljanja nelinearnim sistemima ne pokazuje kao dobar. Za očekivati je da se adaptivni regulator pokaže boljim, s obzirom da isti ima sposobnost da samostalno procijeni i prilagodi svoje parametre. Prvo će se predstaviti rezultati dobijeni u simulacijskom okruženju a zatim oni dobijeni eksperimentalnim putem. Svi rezultati će se uporediti kako bi se došlo do finalnog zaključka. Treba napomenuti da su referentni signali za testiranje performansi regulatora nasumično odabrani iz opsega moguće rotacije elevacijskog i azimutnog ugla.

4.2 Simulacijski rezultati

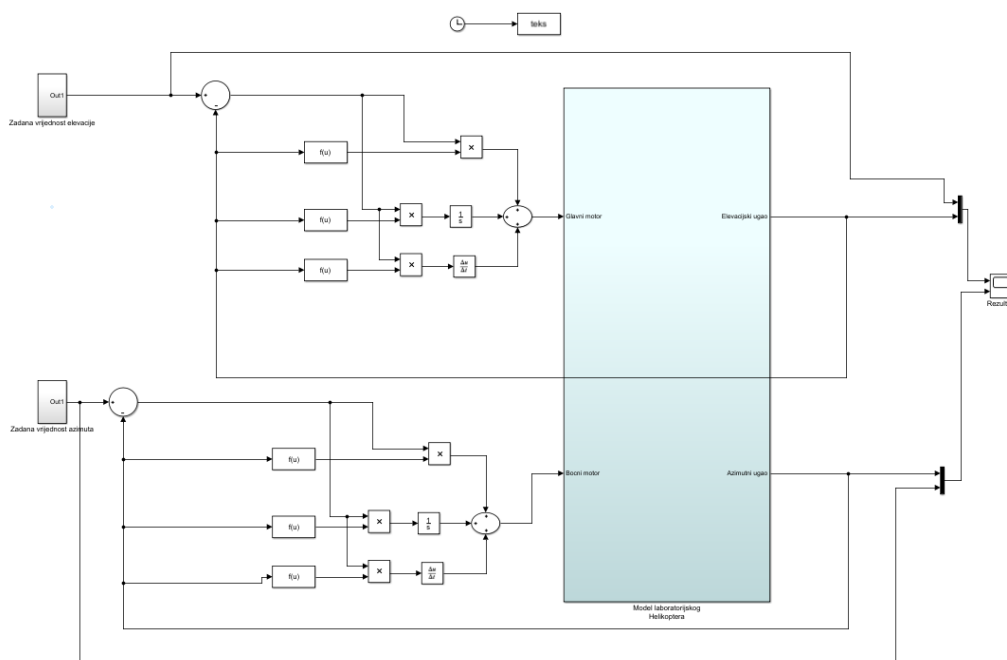
Rezultati dobijeni u simulacijskom okruženju biti će predloženi u nastavku. Slika 4.1 prikazuje shemu u kojoj je korišten PID regulator, na slici 4.2 prikazana je shema spojena u Simulink okruženju koja koristi lookup tabele za određivanje parametara PID regulatora, dok je na slici 4.3 prikazana shema u kojoj se za određivanje parametara PID regulatora koriste polinomske funkcije, kao što je već objašnjeno u prethodnom poglavlju.



Slika 4.1: Shema u Simulinku za PID regulator



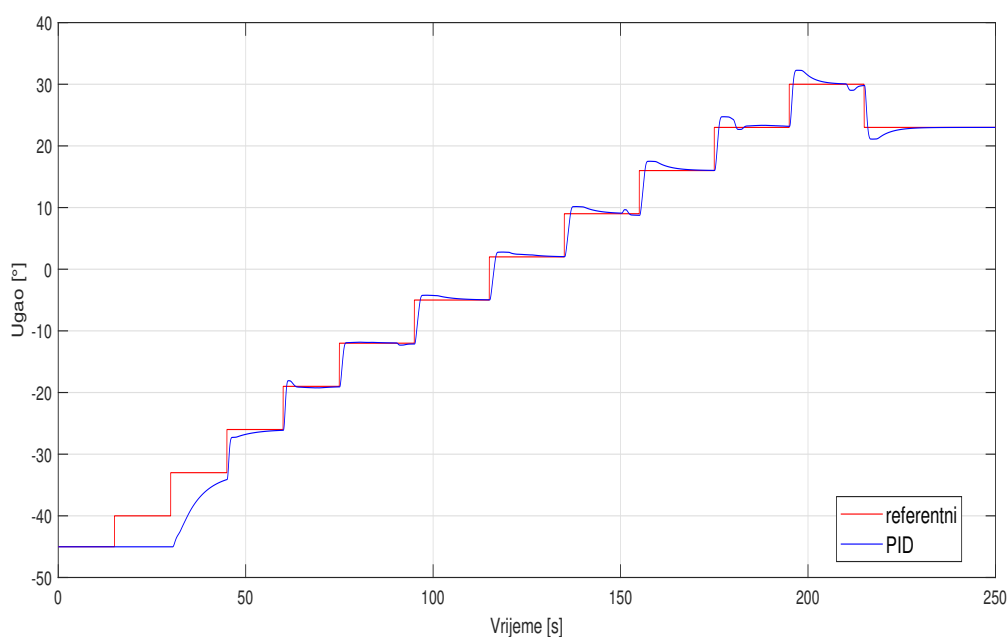
Slika 4.2: Shema u Simulinku uz korištenje lookup tabela



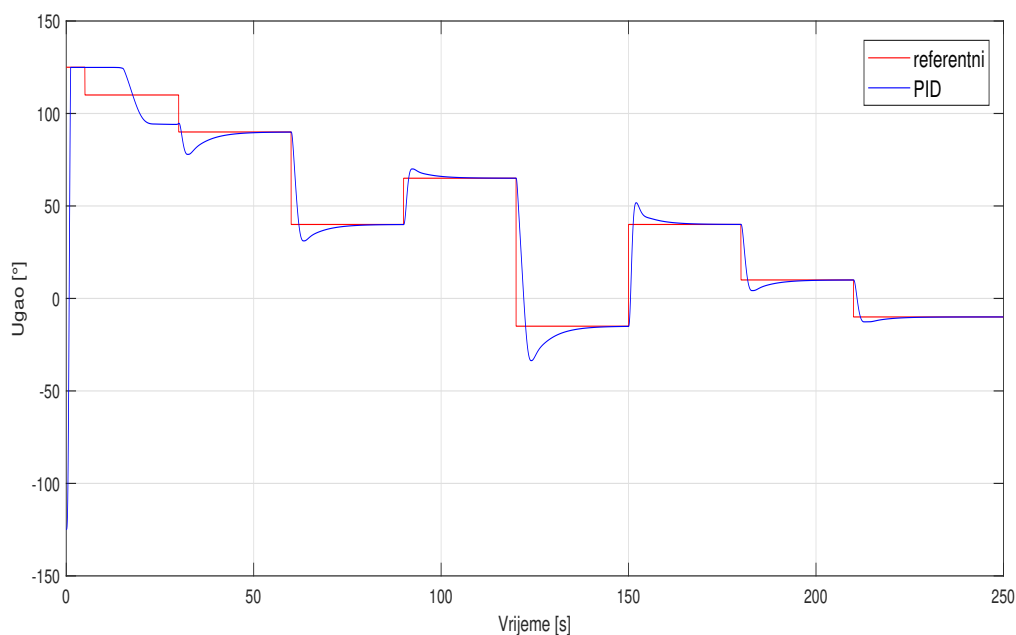
Slika 4.3: Shema u Simulinku uz korištenje funkcija za određivanje parametara

4.2.1 PID regulator

Simulacijski odzivi uz korištenje PID regulatora prikazani su na slikama 4.4 (za elevacijski ugao) i 4.5 (za azimutni ugao). Referentni signali su prikazani crvenom, dok su simulacijski prikazani plavom bojom. Vidljivo je relativno dobro slaganje, budući da su prisutni određeni preskoci, posebno pri većim vrijednostima elevacionog ugla. Za azimutni ugao je nešto lošiji odziv na samom početku, regulatoru je potrebno više vremena da prati referentni ugao.



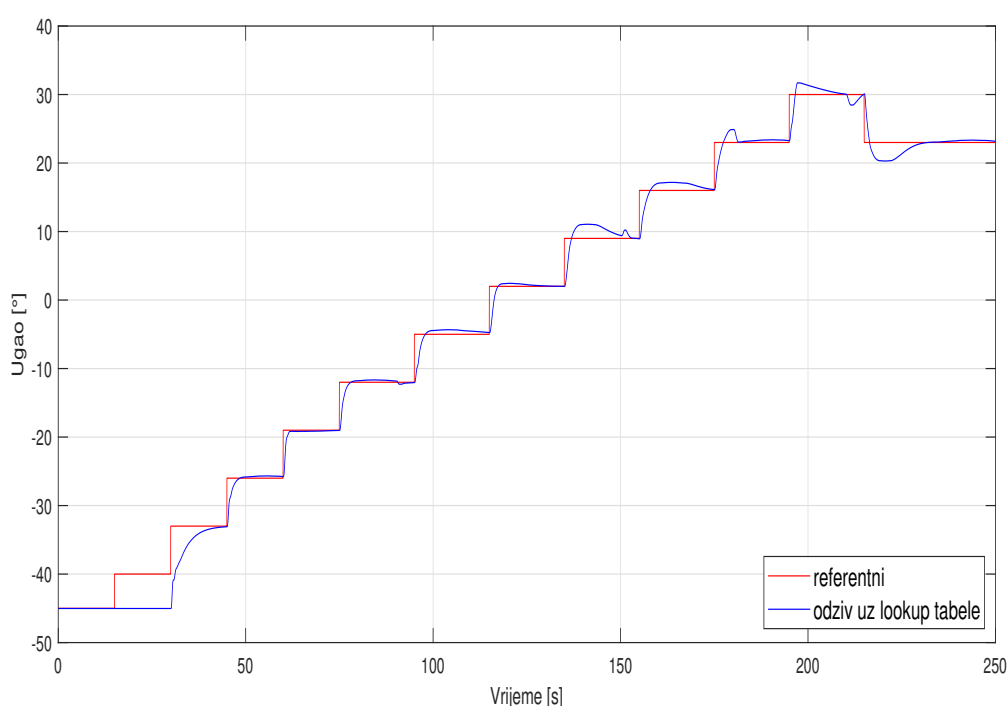
Slika 4.4: Odzivi dobijeni simulacijom za elevacijski ugao



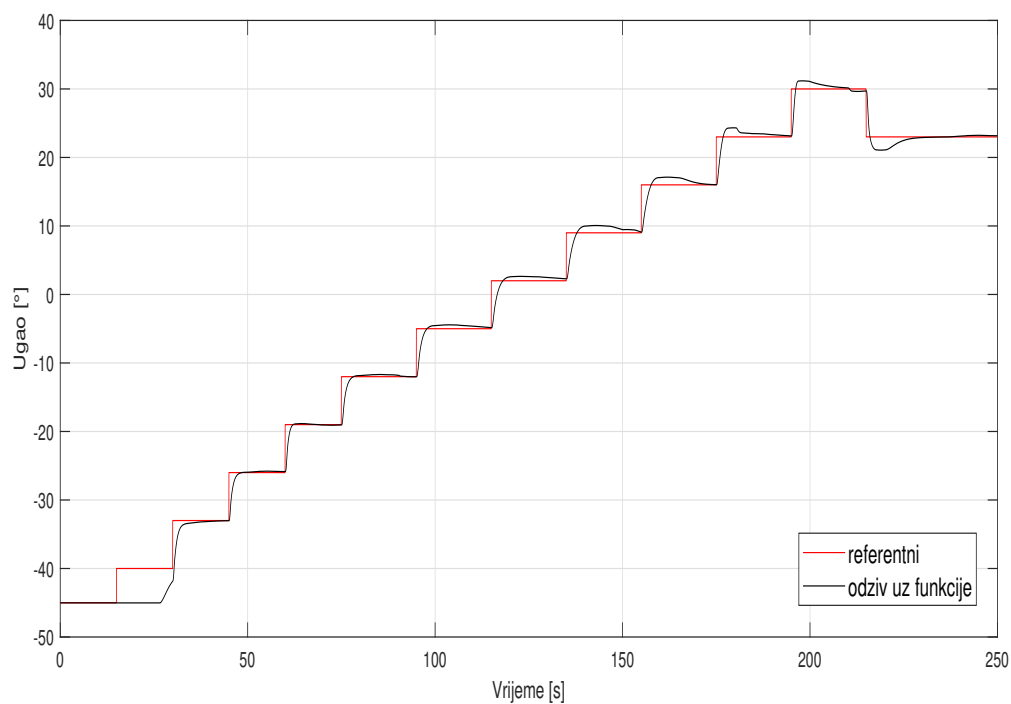
Slika 4.5: Odzivi dobijeni simulacijom za azimutni ugao

4.2.2 Adaptivni regulator - elevacijski ugao

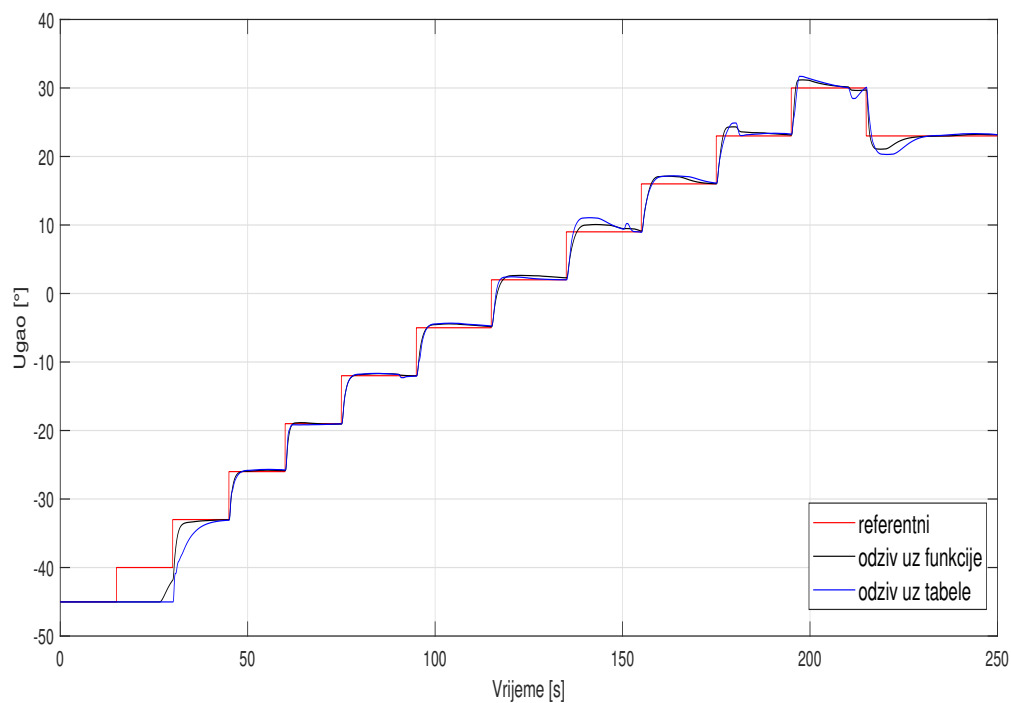
Na slici 4.6 prikazan je simulacijski odziv regulatora sinteziranog korištenjem lookup tabela, dok je na slici 4.7 prikazan odziv regulatora uz korištenje polinomskih funkcija. Razlike ova dva metoda najbolje su uočljive posmatranjem slike 4.8. Referentni signal je prikazan crvenom, signal dobijen pomoću lookup tabela plavom a crnom bojom onaj koji daju polinomske funkcije. Odziv dobijen pomoću polinomskih funkcija brže dostiže referentnu vrijednost i ima manje preskoke, te je čak i bolji za korištenje. Slika 4.9 pokazuje odziv svih implementiranih regulatora, te su sa nje najuočljivije razlike. Odziv PID regulatora je naznačen zelenom bojom. Vidljivo je da adaptivni regulatori za razliku od PID regulatora brže dostižu referentnu vrijednost, te se može zaključiti da regulator implementiran korištenjem polinomskih funkcija daje najbolje rezultate u simulacijskom okruženju.



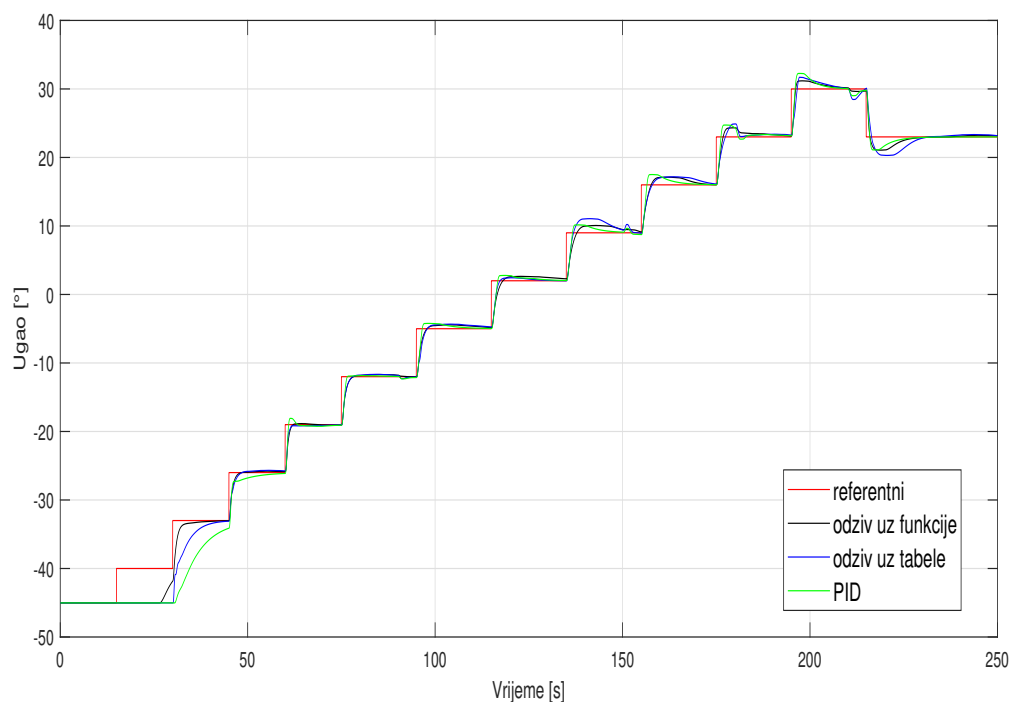
Slika 4.6: Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj lookup tabela



Slika 4.7: Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj funkcija



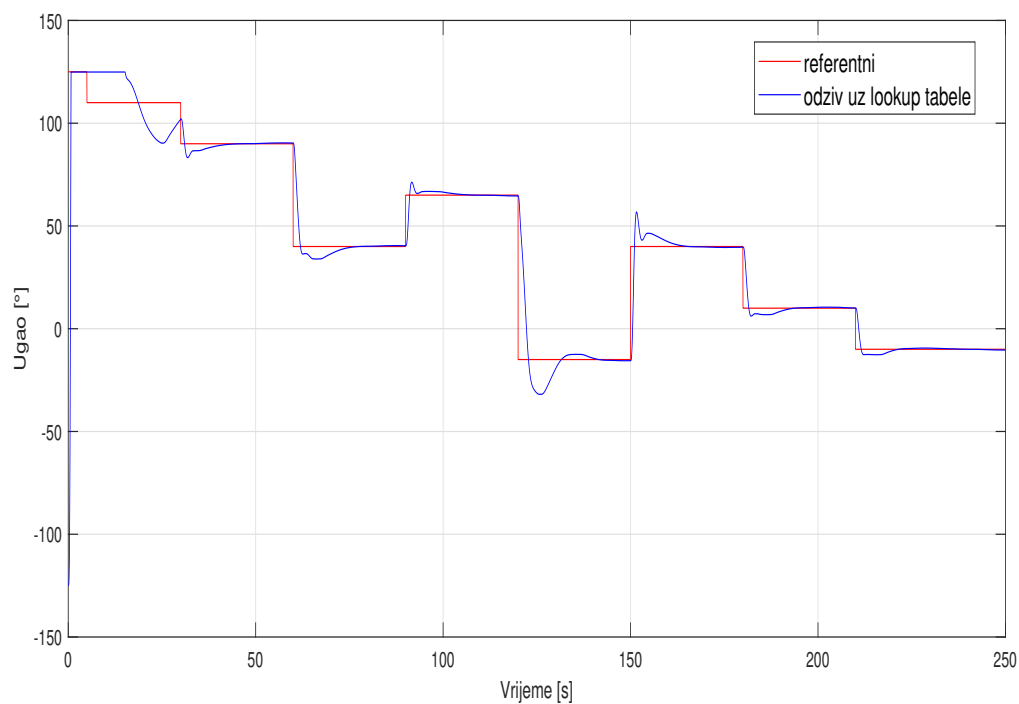
Slika 4.8: Poređenje rezultata dobijenih simulacijom na dva različita načina



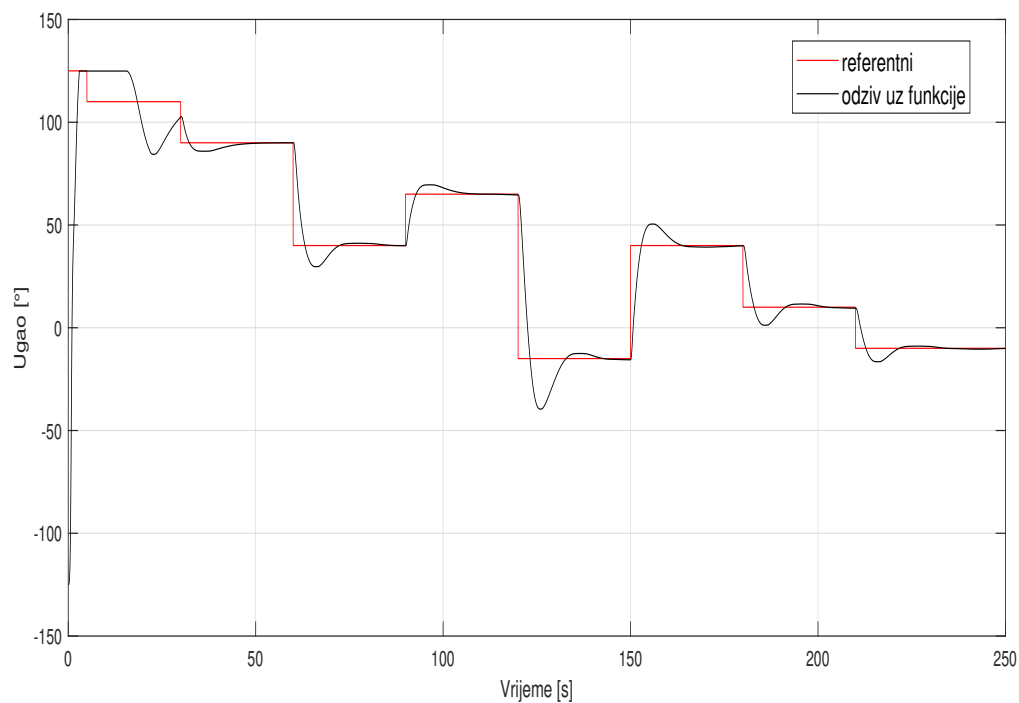
Slika 4.9: Prikaz svih dobijenih signala za elevacijski ugao

4.2.3 Adaptivni regulator - azimutni ugao

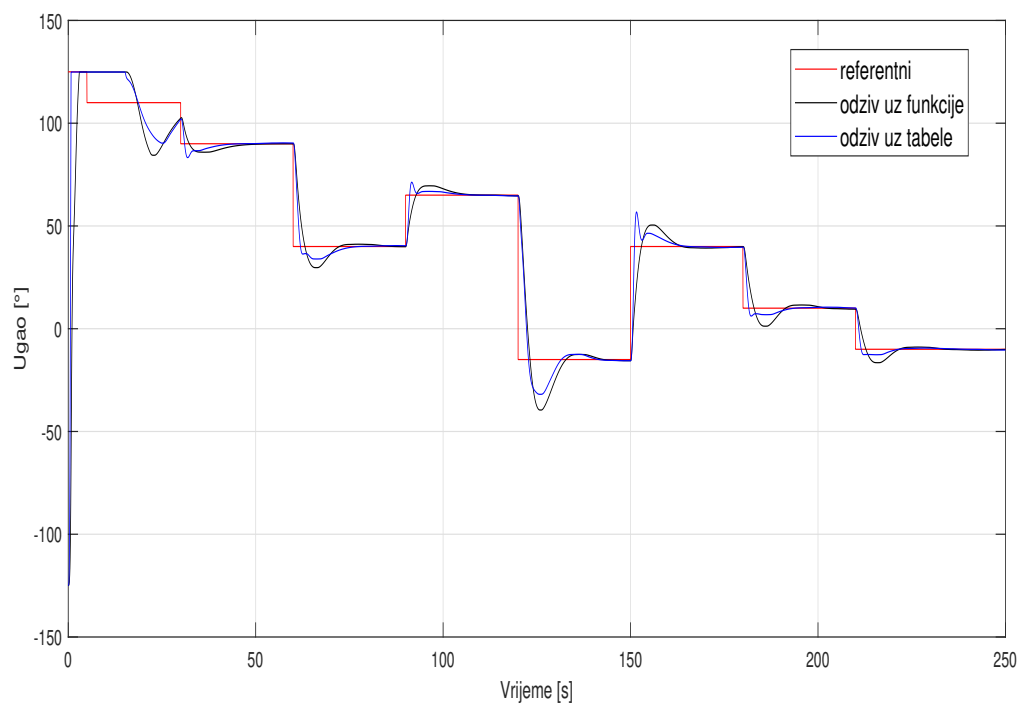
Na slici 4.10 prikazan je simulacijski odziv regulatora sinteziranog korištenjem lookup tabela, dok je na slici 4.11 prikazan odziv regulatora uz korištenje polinomskih funkcija. Razlike ova dva metoda najbolje su uočljive posmatranjem slike 4.12. Crvena boja označava referentni signal, plava signal dobijen pomoću lookup tabela, dok crna predstavlja signal kada se parametri regulatora računaju uz pomoć polinomskih funkcija. Odziv dobijen pomoću polinomskih funkcija ima manje preskoke te se kao takav pokazao boljim. Slika 4.13 pokazuje odziv svih implementiranih regulatora, te su sa nje najuočljivije razlike. Zelena boja predstavlja odziv PID regulatora. Za uočavanje razlika potrebno je pozornije analizirati sliku, ali se može zaključiti da odziv regulatora implementiranog preko polinomskih funkcija daje najbolje simulacijske rezultate, kao i u slučaju elevacijskog ugla. Također su prisutne i blage oscilacije oko referentnih vrijednosti, koje su očekivane kod azimutnog ugla s obzirom na njegovu prirodno nestabilnu dinamiku.



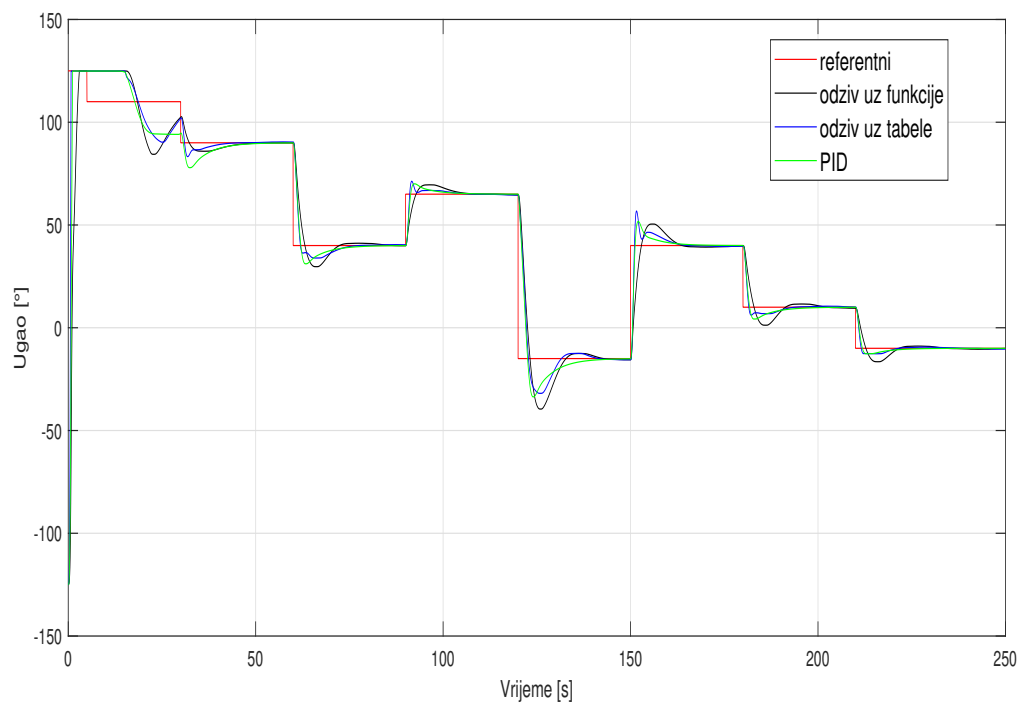
Slika 4.10: Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj lookup tabela



Slika 4.11: Odzivi dobijeni simulacijom za slučaj funkcija



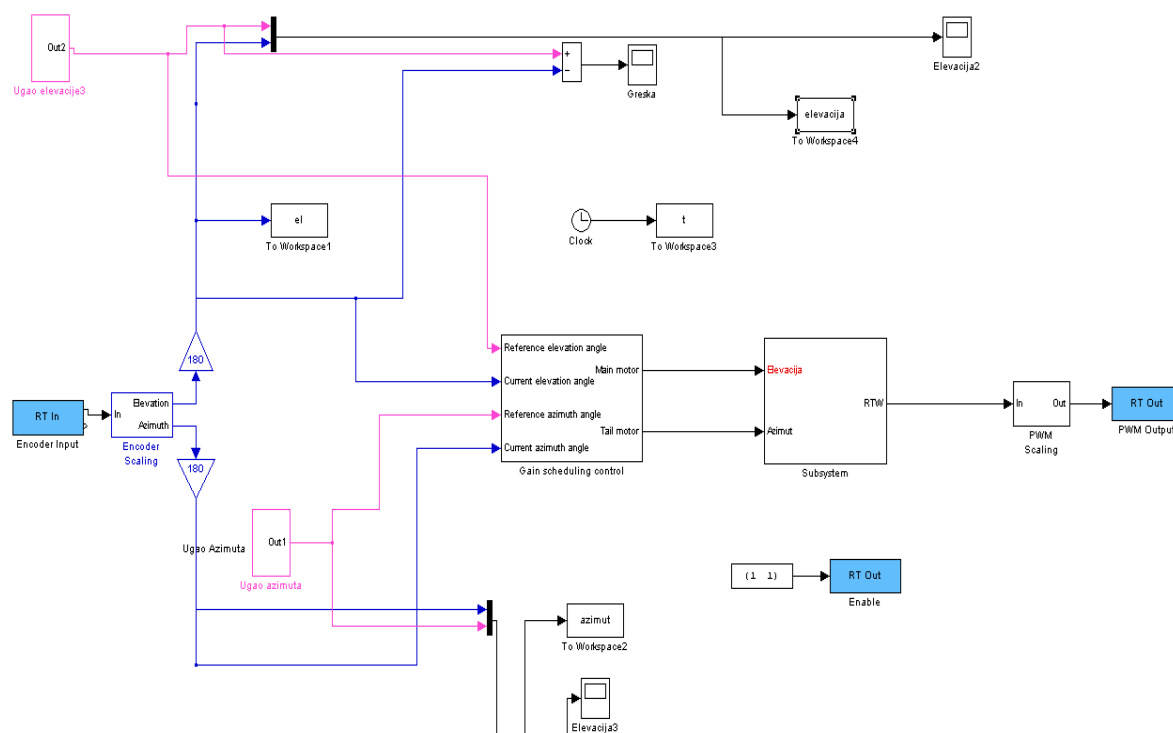
Slika 4.12: Poređenje rezultata dobijenih simulacijom na dva različita načina



Slika 4.13: Prikaz svih dobijenih signala za azimutni ugao

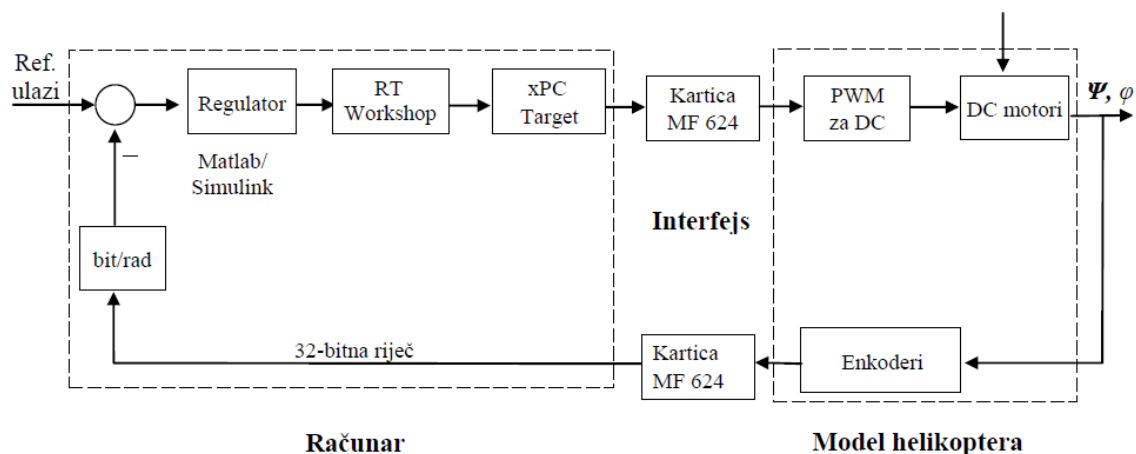
4.3 Eksperimentalni rezultati

Rezultati dobijeni eksperimentalnim putem biti će predstavljeni i prokomentarisani u nastavku. Također će se prikazati poređenje eksperimentalnih rezultata sa simulacijskim. Na slici 4.14 prikazana je Simulink shema korištena za dobivanje eksperimentalnih rezultata. U bloku Gain Scheduling Control implementiran je regulator analogno slici 4.3.



Slika 4.14: Simulink shema za snimanje odziva

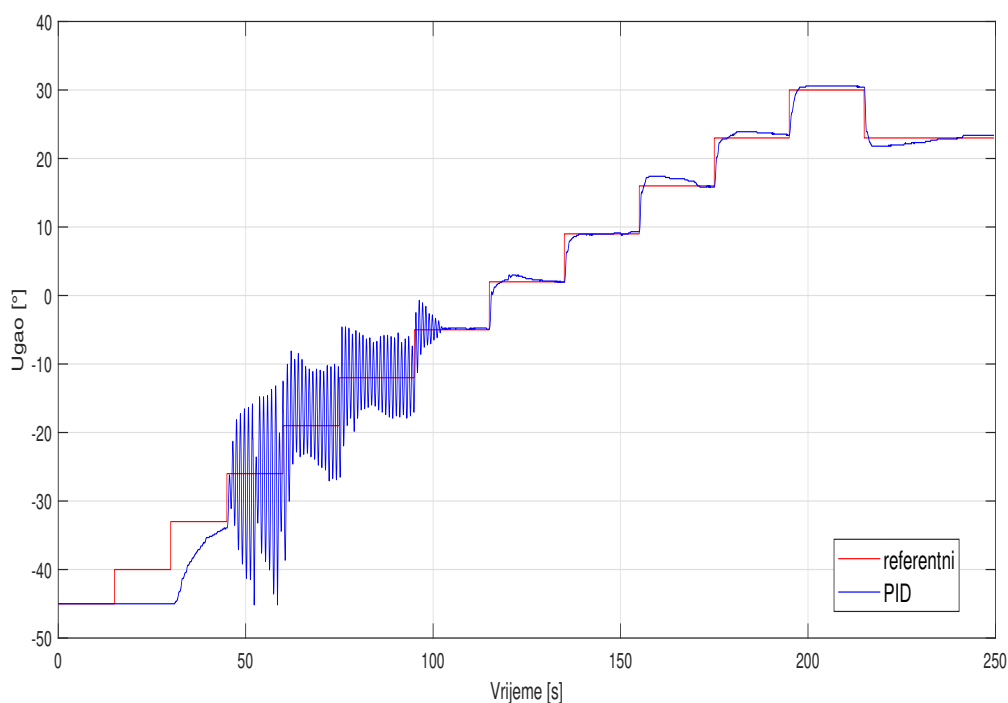
Jednostavna principijelna shema upravljanja laboratorijskim modelom helikoptera prikazana je na slici 4.15. Proces regulacije dva ugla od interesa može se ukratko opisati na sljedeći način: unutar Matlab/Simulink okruženja zadaje se referentna vrijednost elevacijskog i azimutnog ugla. Istovremeno se mjeri trenutna vrijednost pomenutih uglova i preko višefunkcionalne kartice MF 624 informacija o uglovima se (preko RTW-a) prenosi u Matlab/Simulink okruženje. Formira se informacija o grešci koja se dalje prenosi na ulaz regulatora (koji je potrebno adekvatno implementirati u okruženju). Regulator formira izlaznu vrijednost upravljačke varijable (potrebno ju iz softverskog paketa poslati kao realnu varijablu (napon) u okolinu (radna sredina)). Ona se korištenjem RTW-a pretvara u jezik koji je prilagođen višefunkcionalnoj kartici. PC povezuje ove varijable sa karticom MF 624, koja preko svojih TTL izlaza trigeruje H-mostove u napojnoj jedinici i obezbjeđuje referentni napon za motore. Dobiveni naponi omogućavaju da se motori vrte manjom ili većom brzinom ovisno o srednjoj vrijednosti dovedenog napona na njegovim ulazima. Brzina vrtnje motora, preko propelera koji su na njih spojeni, proizvodi sile u vertikalnoj i horizontalnoj osi koje dovode do propinjanja i rotacije helikoptera [11].



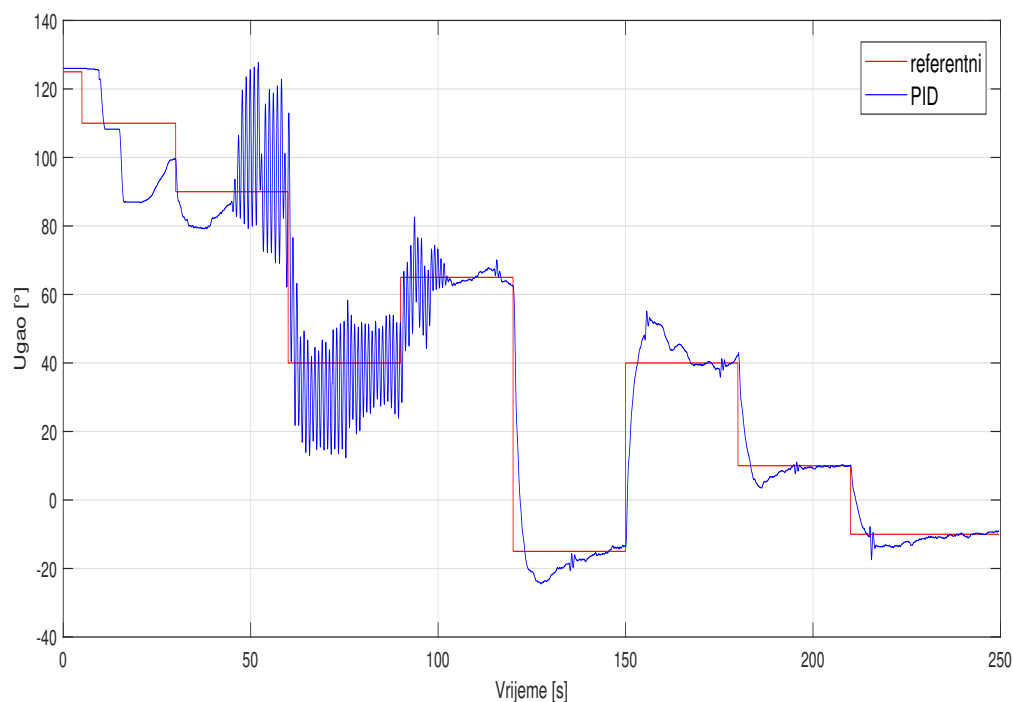
Slika 4.15: Shema upravljanja modelom helikoptera

4.3.1 PID regulator

Sa slika 4.16 i 4.17 vidljivo je da su u jednom dijelu odziva prisutne velike oscilacije. Ovako ponašanje je svakako veoma nepoželjno, a moguće uzrokovano uticajem D komponente, koja generiše brzo promjenive napone na stezaljkama DC motora. Ostatak odziva može se smatrati dobrim, s tim da su kod odziva azimutnog ugla primjetna veća odstupanja od elevacijskog, ponovo s obzirom na njegovu dinamiku.



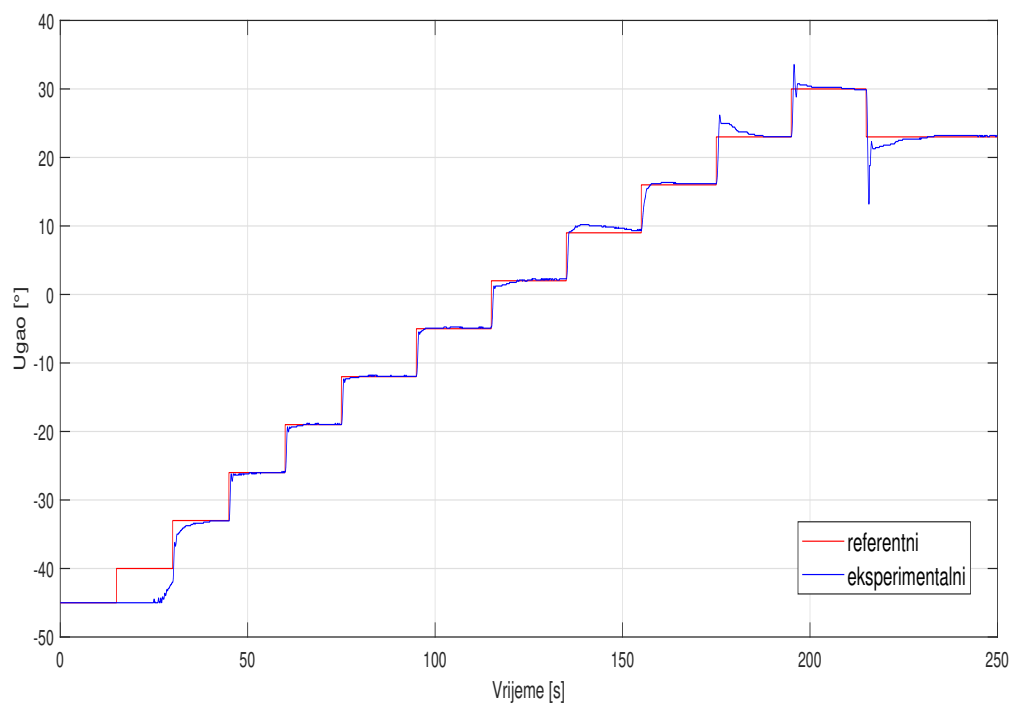
Slika 4.16: Odziv elevacijskog ugla korištenjem PID-a



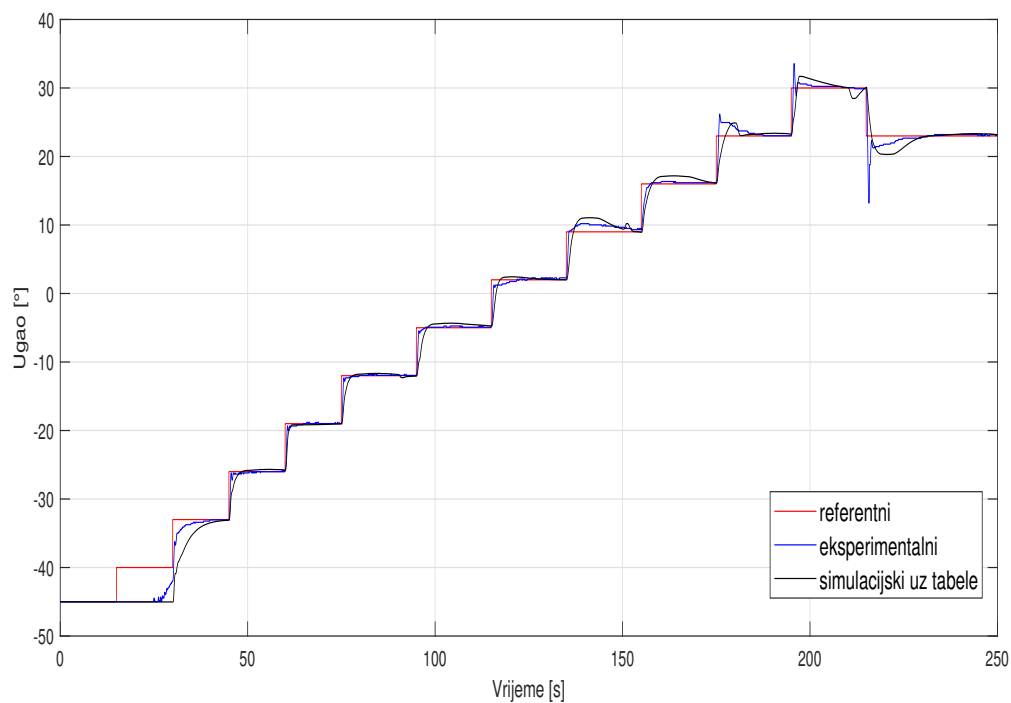
Slika 4.17: Odziv azimutnog ugla korištenjem PID-a

4.3.2 Adaptivni regulator - elevacijski ugao

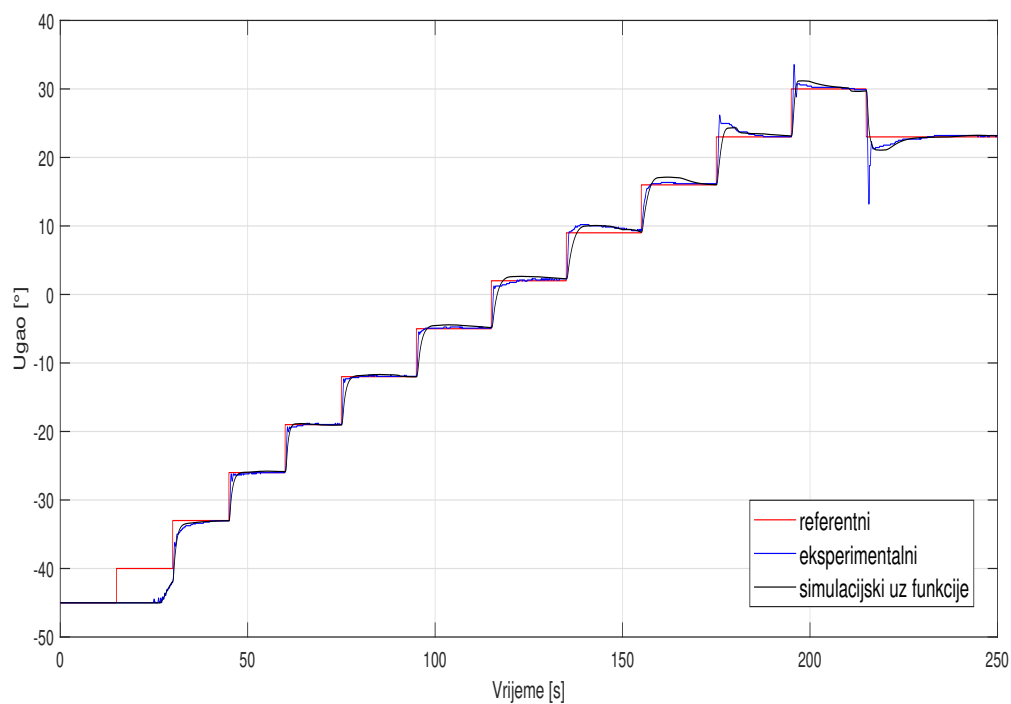
Slika 4.18 predstavlja odziv elevacijskog ugla korištenjem adaptivnog regulatora, slika 4.19 prikazuje poređenje eksperimentalnog i simulacijskog odziva uz pomoć lookup tabele, dok slika 4.20 poredi eksperimentalni sa simulacijskim odzivom dobivenim korištenjem polinomskih funkcija. Crvenom bojom je prikazan referentni, plavom eksperimentalni a crnom simulacijski i signal odziva PID regulatora. Može se primijetiti da se eksperimentalni odziv u većem dijelu poklapa sa simulacijskim odzivom, te da su preskoci malo veći, ali se opet dosta brzo dostigne referentna veličina. Na slici 4.21 vidljivi su paralelno odzivi PID i adaptivnog regulatora. Može se zaključiti da je adaptivni regulator bolji s obzirom na oscilacije kao i brže slijeđenje referentne veličine na početku.



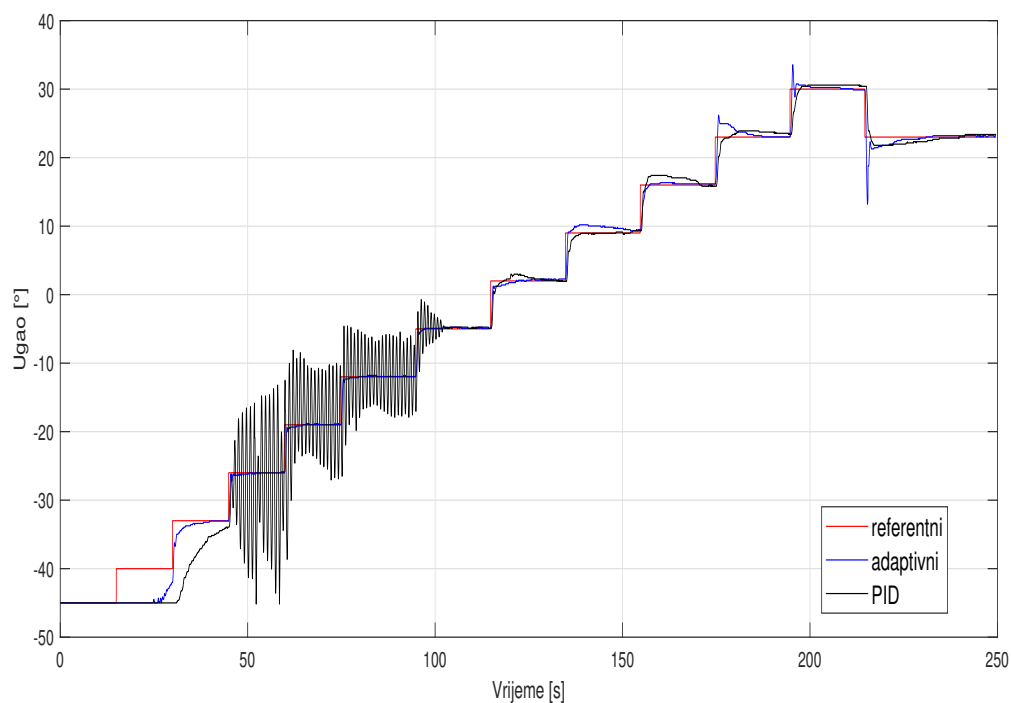
Slika 4.18: Odziv elevacijskog ugla



Slika 4.19: Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć lookup tabela



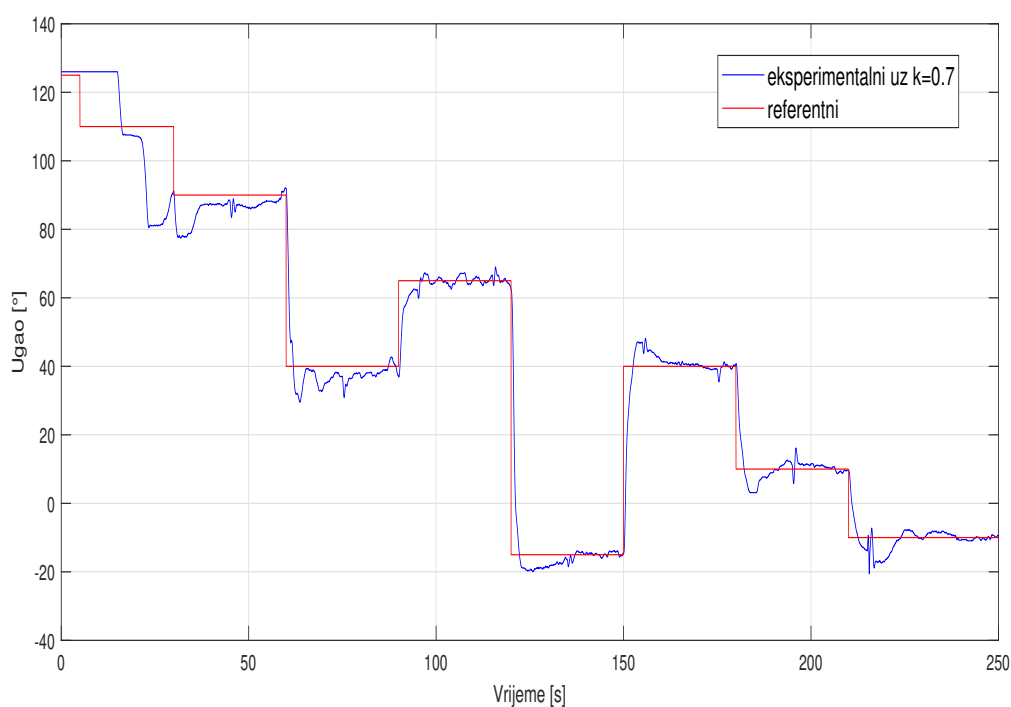
Slika 4.20: Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć funkcija za određivanje parametara



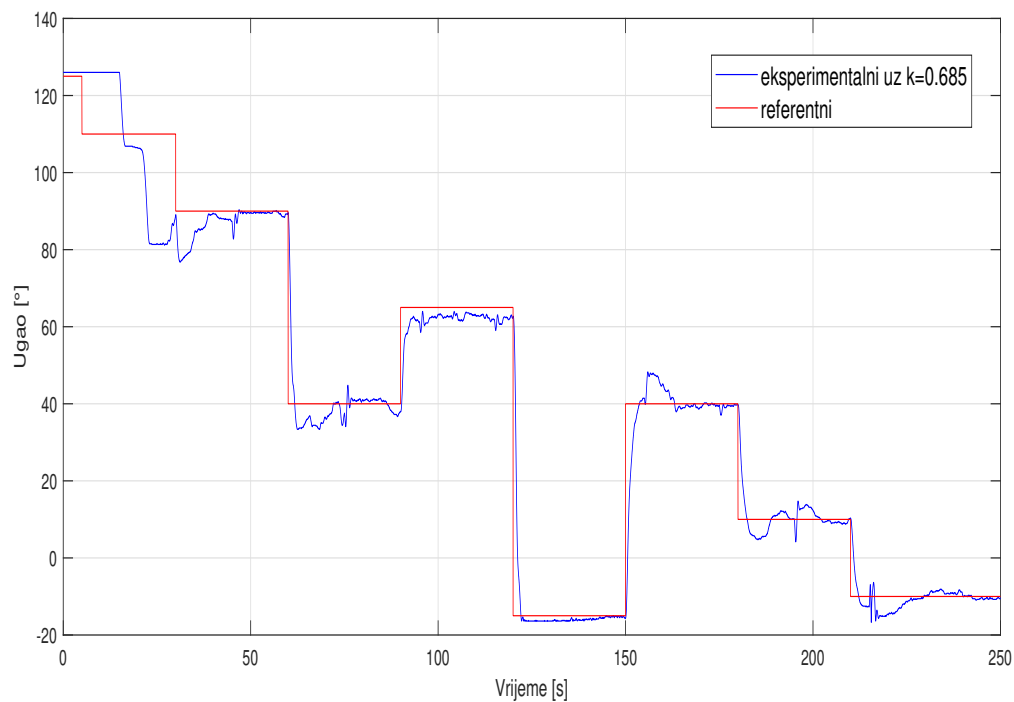
Slika 4.21: Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla za različite regulatore

4.3.3 Adaptivni regulator - azimutni ugao

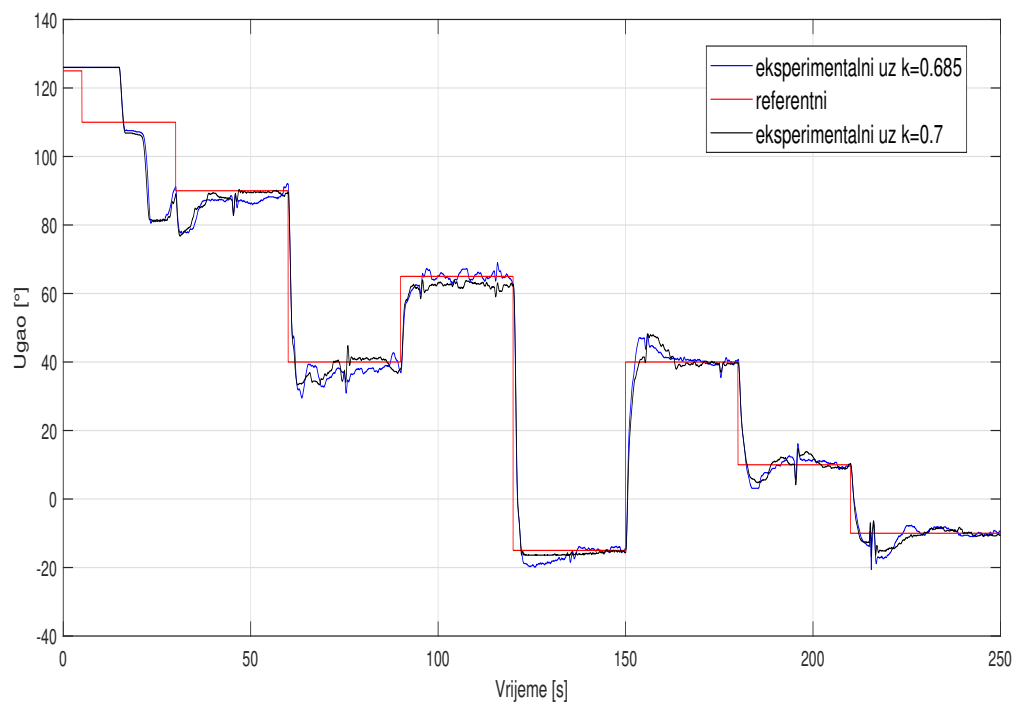
Za dobivanje odziva azimutnog ugla bilo je potrebno skalirati izlaz iz regulatora koji se odnosi na bočni motor da bi se minimizirale oscilacije koje su posljedica njegove nestabilne dinamike. Skaliranje je rađeno za nekoliko različitih vrijednosti, ali su odabrane dvije koje su se pokazale najbolje i čiji su rezultati ovdje predstavljeni. Slika 4.22 predstavlja odziv azimutnog ugla korištenjem adaptivnog regulatora uz koeficijent skaliranja $k=0.7$, dok slika 4.23 prikazuje odziv uz koeficijent skaliranja $k=0.685$. Odabrano je da se za daljnju analizu posmatra odziv sa koeficijentom $k=0.7$, budući da se njegov odziv bolje poklapa sa referentnim signalom, odnosno manja je greška. To se jasno vidi na slici 4.24. Na slici 4.25 prikazano je poređenje eksperimentalnog i simulacijskog odziva uz pomoć lookup tabele, dok slika 4.26 poredi eksperimentalni sa simulacijskim odzivom dobivenim korištenjem polinomske funkcije. Referentni signali su prikazani crvenom, eksperimentalni crnom a simulacijski plavom bojom. Može se primijetiti da se eksperimentalni odziv u većem dijelu poklapa sa simulacijskim odzivom, čak su i manje amplitudne vrijednosti preskoka. Na slici 4.24 vidljivi su paralelno odzivi PID i adaptivnog regulatora. PID je predstavljen plavom, adaptivni regulator crnom a referentni signal crvenom bojom. Može se zaključiti da je adaptivni regulator bolji s obzirom na oscilacije i manje vrijednosti preskoka. Vidljive su veće oscilacije azimuta koje su posljedica prirode azimutnog ugla ima izraženog utjecaj glavnog motora na njegovo ponašanje (međusprežni efekti).



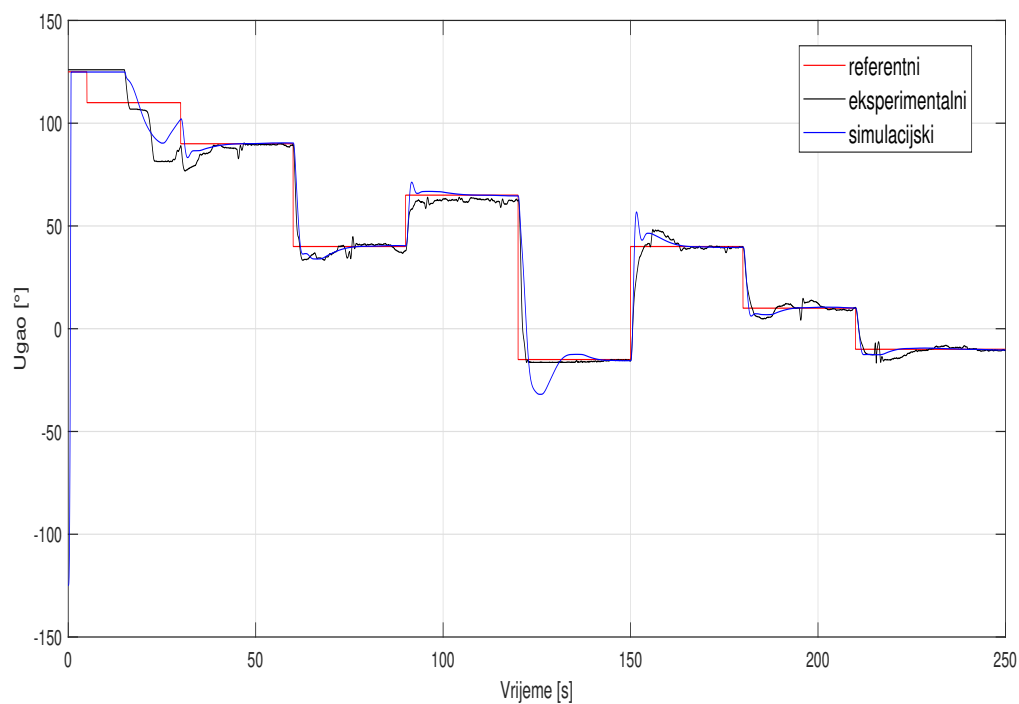
Slika 4.22: Odstav azimutnog ugla sa koeficijentom $k=0.7$



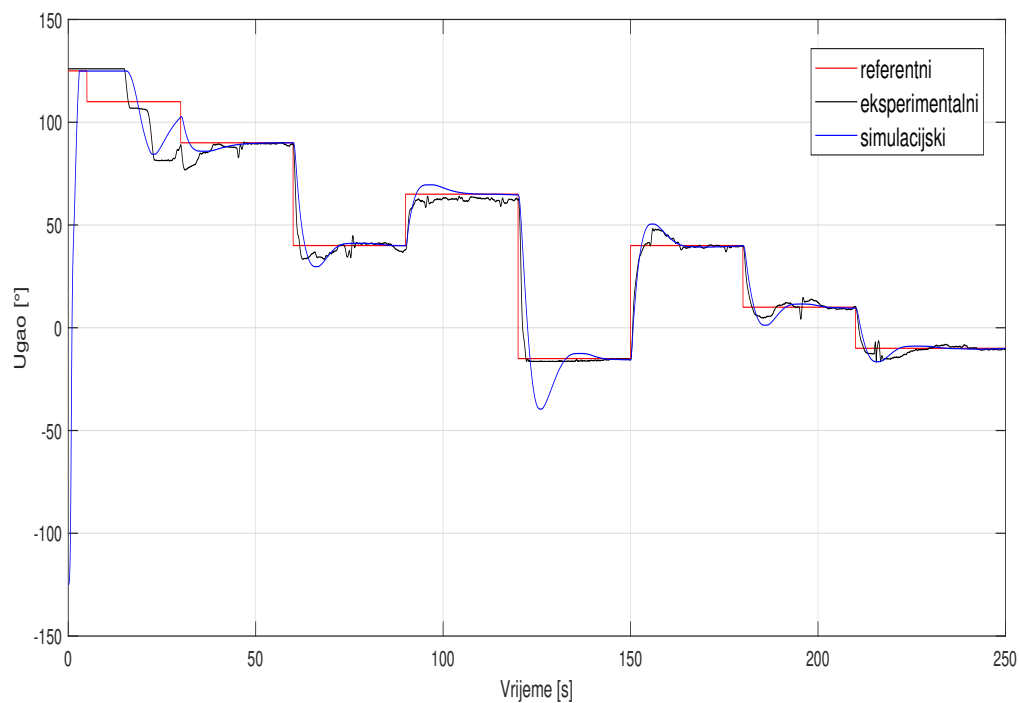
Slika 4.23: Odziv azimutnog ugla sa koeficijentom $k=0.685$



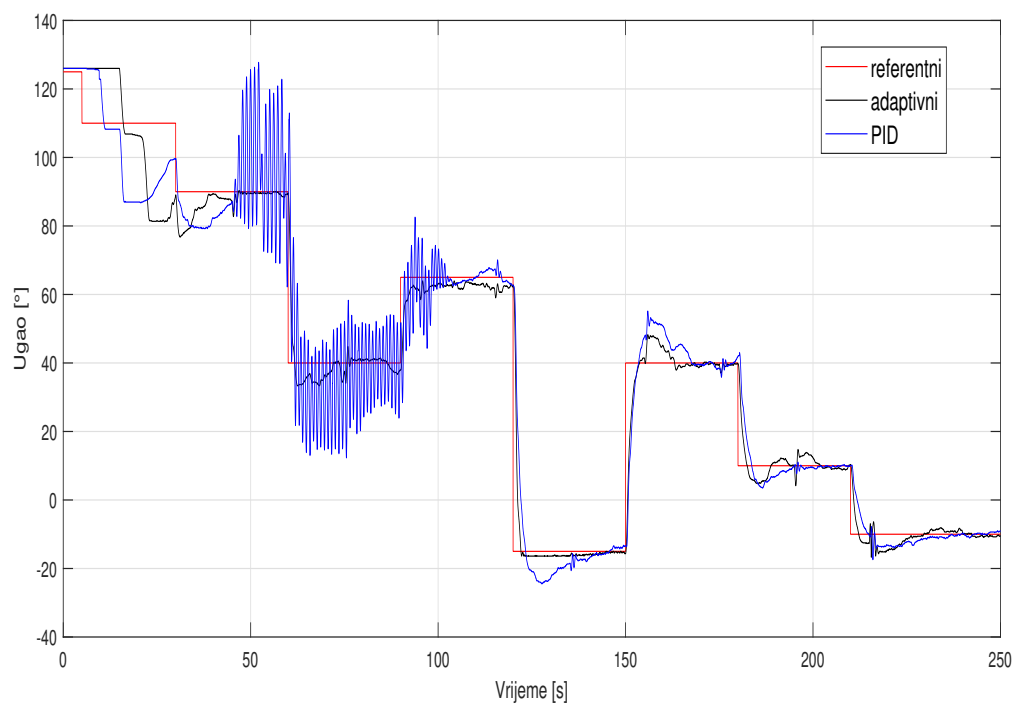
Slika 4.24: Poređenje odziva sa dva različita koeficijenta



Slika 4.25: Poređenje stvarnog odziva azimutnog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć lookup tabela



Slika 4.26: Poređenje stvarnog odziva azimutnog ugla sa simulacijskim odzivom uz pomoć funkcija za određivanje parametara



Slika 4.27: Poređenje stvarnog odziva elevacijskog ugla za različite regulatore

* * *

Posmatranjem dobijenih odziva PID i adaptivnog regulatora dolazi se do zaključka da je adaptivni regulator pokazao bolje ponašanje. PID regulator se ponaša isto u svim područjima, dok se kod adaptivnog, s obzirom na postojanje posebnih vrijednosti parametara za različite opsege, uočava brzo dostizanje referentne vrijednosti kao i dobro praćenje sa jako malom greškom.

Zaključak

Cilj završnog rada bila je sinteza adaptivnog regulatora te ispitivanje njegovih performansi kako u simulacijskom okruženju tako i na realnom sistemu. Nakon što se predstavio model helikoptera, njegova arhitektura i način rada, prikazane su jednačine koje opisuju dinamiku modela. Na osnovu istih je dat matematski model u simulacijskom okruženju. Uz pomoć modela pristupljeno je sintezi PID regulatora eksperimentalnim putem, a zatim i sintezi adaptivnog regulatora korištenjem lookup tabela. Zbog problema u simulacijskom okruženju izvršena je i sinteza regulatora pronalaženjem odgovarajuće forme polinomskih funkcija koje daju zavisnost parametara regulatora od trenutnog elevacionog/azimutnog ugla. Verifikacija sistema upravljanja sprovedena je i u simulacijskom i u eksperimentalnom okruženju. Adaptivni regulator poređen je sa odzivima klasičnog PID regulatora te je potvrđena njegova superiornost. Rezultati dobiveni u ovom procesu, prikazani u radu mogli bi poslužiti kao referenca za poređenje sa nekim drugim načina upravljanja (npr. robusno upravljanje, fuzzy regulatori, neuronske mreže). Jedna od ideja za buduća istraživanja mogla bi biti sinteza nekih drugih vrsta adaptivnih regulatora, pri čemu bi se mogli porediti odzivi u okruženjima i donijeti zaključci o najboljoj opciji za nelinearan sistem koji predstavlja laboratorijski model helikoptera CE150.

Literatura

- [1] *What is a PID Controller, Their Types and How does it Work?*, <https://www.electricaltechnology.org/2015/10/what-is-pid-controller-how-it-works.html>, pristup 28.6.2023.
- [2] *What is a PID control action?* <https://automationforum.co/what-is-a-pid-control-action/>, pristup 28.6.2023.
- [3] Ante Gutelj, *ZAVRŠNI RAD: Projektiranje i namještanje PID regulatora*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.godina
- [4] Jasmin Velagić, *Predavanja na predmetu: Mehatronika, Elektrotehnički fakultet*, Univerzitet u Sarajevu, akademska 2022/23 god.
- [5] Åström, K.J. and Wittenmark, B., *Adaptive Control*, Dover Publications, 2008.
- [6] *Gain Scheduling Basics*, <https://www.mathworks.com/help/control/ug/gain-scheduled-control-systems.html>, pristup 12.7.2023.
- [7] *Lookup Tables*, <https://www.mathworks.com/help/simulink/lookup-tables.html>, pristup 12.7.2023.
- [8] Landau, Ioan and Lozano, R. and M'SAAD, Mohammed and Karimi, Alireza, *Adaptive control: Algorithms, analysis and applications, 2nd edition*, 2011.
- [9] Bishop R., *The Mechatronics Handbook*, The University of Texas at Austin Austin, Texas, 2002.
- [10] CE150 Helicopter Model Education Manual, TecQuipment
- [11] Osmić Nedim (2009). *Sinteza fuzzy viševarijabilnog sistema upravljanja i stabilizacije laboratorijskog modela helikoptera*, Elektrotehnički fakultet Sarajevo