

U N I V E R Z I T E T U N I Š U
M A Š I N S K I F A K U L T E T

Miljan M. Milošević
DIPLOMSKI RAD

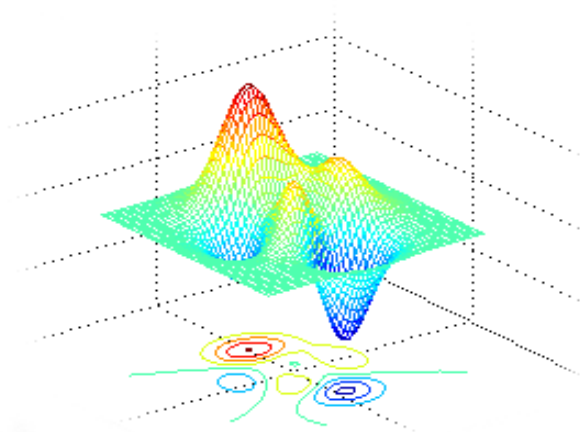
N I Š, 2008

U N I V E R Z I T E T U N I Š U
MAŠINSKI FAKULTET



Analiza stabilnosti nelinearnih sistema i
primena na model aviona

-DIPLOMSKI RAD-



Kandidat:
Milošević M. Miljan 4728

Mentor:
prof. dr Vlastimir Nikolić

Niš, januar 2008.

Analiza stabilnosti nelinearnih sistema i primena na model aviona

Ovaj diplomski rad se sastoji od tri tematske celine. U prvom delu ovoga rada obrađene su: vrste i analiza nelinearnih sistema, izmeđuostalog obrađen je i Ljapunovljev koncept stabilnosti nelinearnih sistema, prikazane su vrste nelinearnosti kao vrste stabilnosti.

U drugom delu se nalazi problematika koja se odnosi na automatsko vođenje objekata u prostoru. Vršena je analiza i sinteza aktuatora i autopilota koji se primenjuju u vazduhoplovnoj industriji.

U trećem delu je obrađena dinamika bespilotne letilice. Za dinamičko ispitivanje ove letilice korišćeni su već gotovi softveri (AeroSim i FlightGear) čiji je rad podržan matlabom verzije 6.5 ili 6.0. Dinamika ove letilice je prikazana kroz blokove, a rezultati simulacije dijagramima.

Ključne reči

- nelinearni sistemi
- stabilnost
- aerosim
- flightgear
- aktuatori

Analysis stability nonlinear systems automatic control and aplication for model aircraft

This one exam itself consist by three thematic integer. In first doing this is exam there are: classe and analysis nonlinear systems automatic control, Ljapunov's concept stability, classe stability nonlinear systems. In second doing this is exam there are problems wich do automatic control thing owned in space. Do analysis and synteys actuators and automatic pilot which emplay in aviation industry. In third doing this is exam made dynamics automatic control aircraft. For dynamic assay aircraft use done software (AeroSim and FlightGear) wich is working supportid with matlab version 6.5 or 6.0. Dynamics aircrafti are represent with bloc and simulation is represent with graph.

Key wordage:

- nonlinearn systems, -stability, -AeroSim, -FlightGear, -actuators

S a d r Ź a j

1. Uvod.....	1
2. Vrste i definicije nelinearnih sistema.....	3
2.1 Deterministički statički i dinamički sistemi.....	4
3 Ravnoteža stanja sistema.....	7
3.1 Prostor stanja i integralni prostor.....	7
3.2 Željeni i stvarni radni režimi sistema.....	9
3.2.1 Željeni radni režim.....	9
3.2.2 Stvarni radni režim i odstupanja.....	10
4 Nelinearnosti.....	13
4.1 Osobine, podela i opisi nelinearnosti.....	14
4.1.1 Osobine.....	14
4.2 Neprekidne nememorijske nelinearnosti bez intervala neosetljivosti.....	14
4.2.1 Nelinearnost u delovima linearna.....	14
4.2.2 Nelinearnosti tipa apsolutne vrednosti.....	15
4.2.3 Nelinearnost tipa nesimetričnog zasićenja (ograničenja) s linearnim delom.....	15
4.2.4 Nelinearnost tipa simetričnog zasićenja (ograničenja) s linearnim delom.....	16
4.2.5 Nelinearnost tipa zasićenja (ograničena) sa nelinearnim delom.....	16
4.2.6 Parabolična nelinearnost drugog reda (stepena).....	16
4.2.7 Parabolična nelinearnost trećeg reda (stepena).....	17
4.2.8 Nelinearnost tipa kvadratnog trenja.....	17
4.2.9 Sinusna nelinearnost	17
4.3 Neprekidne nememorijske nelinearnosti s intervalom neosetljivosti.....	17
4.3.1 Nelinearnosti tipa intrvala neosetljivosti s linearnim delovima.....	18
4.3.2 Nelinearnost tipa intervala neosetljivosti sa zasićenjem (ograničenjem) i linearnim delovima.....	18
4.3.3 Nelinearnost tipa intervala neosetljivosti s nelinearnim delovima	19
4.3.4 Nelinearnosti tipa intervala neosetljivosti s nelinearnim delovima i zasićenjem (ograničenjem).....	19
4.4 Prekidne nememorijske nelinearnosti bez intervala neosetljivosti.....	19
4.4.1 Nesimetrični rele.....	20
4.4.2 Idealni rele (rele).....	20
4.4.3 Nelinearnost tipa znaka	20
4.4.4 Stepenasta nelinearnost bez intervala neosetljivosti.....	21
4.4.5 Kulonovo trenje.....	21
4.4.6 Linearno viskozno trenje.....	22
4.4.7 Kvadratno viskozno trenje	22
4.4.8 Nememorijski releji histerezis.....	22
4.4.9 Opšti relejni histerezis	23
4.4.10 Nememorijski histerezis sa linearnim delovima.....	23
4.5 Prekidne nememorijske nelinearnosti s intervalom neosetljivosti.....	23
4.5.1 Interval neosetljivosti s relejnim zasićenjem (ograničenjem).....	24
4.5.2 Stepenasta nelinearnost s intervalom neosetljivosti.....	24
4.5.3 Interval neosetljivosti s relejnim histerezisnim petljama	24
4.5.4 Interval neosetljivosti s histerezisnim petljama i linearnim delovima.....	25
4.6 Memorijske nelinearnosti.....	25
4.6.1 Nelinearnost tipa zazora	26
4.6.2 Memorijske nelinearnosti tipa zasićenja (ograničenja) sa linearnim delovima.....	26
4.6.3 Memorijski histerezis.....	27

4.6.4	Dvostruki memorijski histerezis.....	27
4.6.5	Interval neosetljivosti sa zarezom.....	28
4.6.6	Interval neosetljivosti sa zasićenjem (ograničenjem) i histerezisnim petljama sa linearnim delovima.....	28
4.6.7	Memorijski relejni histerezis.....	29
4.6.8	Relejna memorijska nelinearnost sa intervalom neosetljivosti i histerezisnim petljama.....	29
5	Osobenosti nelinearnih sistema.....	30
5.1	Osobenosti u prostoru stanja i u integralnom prostoru stanja.....	30
5.1.1	Fenomen graničnog kruga.....	30
5.1.2	Razdvojnice.....	36
6	Stabilnost.....	38
6.1	Ljapunovljev koncept stabilnosti.....	38
6.1.1	Stabilnost stanja.....	40
6.1.2	Nestabilnost stanja	41
6.1.3	Privlačnost stanja.....	42
6.1.4	Asimptotska stabilnost stanja.....	42
6.1.5	Eksponencijalna stabilnost.....	43
7	Tačne metode analize i sinteze nelinearnih sistema.....	44
7.1	Značaj tačnih metoda.....	44
7.2	Metode konstruisanja lika stanja.....	46
7.2.1	Direktno određivanje lika stanja	46
7.2.2	Metod izoklina.....	50
7.3	Određivanje vremena iz lika stanja.....	53
7.3.1	Određivanje vremena iz krive $f_2^{-1} = (x_1, x_2)$	53
7.3.2	Određivanje jednakih vremenskih intervala duž trajektorije stanja.....	55
7.4	Puankareov indeks singularne tačke.....	56
8	Sruktura sistema automatskog vođenja objekta	61
8.1	Klasifikacija sistema automatskog vođenja objekta.....	62
8.2	Modeliranje opreme autopilota.....	65
8.3	Aktuatori upravljačkih veličina.....	65
8.4	Inercijalni senzori autopilota.....	71
8.4.1	Slobodni žiroskop.....	71
8.4.2	Brzinski žiroskop.....	72
8.4.3	Linearni akcelerometar.....	78
8.5	Savremene konstrukcije inercijalnih senzora.....	80
8.5.1	Vibracioni akcelerometri.....	80
8.5.2	Vibracioni žiroskopi.....	81
8.5.3	Optički žiroskopi.....	82
8.5.4	Kružni leserski žiroskopi.....	83
8.6	Senzori ambijentalnih veličina.....	84
8.7	Radarski senzori brzine i visine.....	86
9	Analiza i sinteza autopilota.....	91
9.1	Osnovni zahtevi u sintezi autopilota.....	92
9.1.1	Koeficijent prigušenja.....	92
9.1.2	Statička stabilnost.....	92
9.1.3	Prirodna nepregusena učestanost.....	93
9.1.4	Propusni opseg.....	93
9.1.5	Brzina odziva	94
9.1.6	Efikasnost upravljačkih površina – manevrabilnost letilice.....	95

9.2	Srukture autopilota u kanalu visine.....	95
9.2.1	Stabilizacija ugla propinjanja	95
9.2.2	Upravljanje normalnim ubrzanjem	100
9.2.3	Upravljanje visinom leta.....	103
9.3	Srukture autopilota u kanalu valjanja.....	106
10	Sistem za automatsko prizemljenje letilice.....	113
11	Nelinearna kontrola dinamike aviona.....	121
11.1	Uvod	121
11.1.1	Teorijske osnove	121
11.2.	Zadaci.....	123
11.2.1	Zadatak1.....	123
11.2.2	Zadatak2.....	125
11.2.3	Zadatak3.....	127
11.2.4	Zadatak4.....	129
11.2.5	Zadatak5.....	129
11.2.6	Zadatak6.....	131
11.2.7	Zadatak7.....	131
11.2.8	Zadatak8.....	132
11.2.9	Zadatak9.....	133
11.2.10	Zadatak10.....	134
11.2.11	Zadatak11.....	134
12	Zaključak.....	136
	Literatura.....	138
	Biografija.....	139

1 UVOD

Tema nelinearnog upravljanja bavi se analizom i projektovanjem nelinearnih i upravljačkih sistema, tj. upravljačkih sistema koji sadrže najmanje jednu nelinearnu komponentu. U analizi se pretpostavlja da je nelinearni sistem zatvorene petlje projektovan, a mi želimo da odredimo karakteristike ponašanja sistema. U projektu nam je dat nelinearni objekt upravljanja koji treba kontrolisati i nekoliko specifikacija ponašanja sistema zatvorene petlje, a naš zadatak je da projektujemo kontroler tako da sistem zatvorene petlje dobije željene karakteristike. U praksi, naravno, problemi projektovanja i analize su isprepletani, zbog toga što projektovanje nelinearnog upravljačkog sistema obično podrazumeva iterativni proces analiza i projektovanja.

ZBOG ČEGA NELINEARNO UPRAVLJANJE?

Linearno upravljanje je stara tema sa različitim utvrđenim metodama i dugom istorijom uspešne industrijske primene. Prema tome, prirodno je zapitati se zašto je toliko istraživača i projekatana, iz takvih oblasti kao što su upravljanje vazдушnim i svemirskim letelicama robotike, kontrole procesa i biomedicinskog inženjeringa, u poslednje vreme pokazalo toliko interesovanje za razvoj i primenu metoda nelinearnog upravljanja. postoje dosta razloga za takvo zanimanje:

- **Unapređenje postojećih upravljačkih sistema:**

Metode linearne kontrole oslanjaju se na pretpostavku da su operacije malog opsega za linearni model validne. Kada je zahtevani opseg operacije širok linearni kontroler će verovatno lošije raditi ili biti nestabilan zbog toga što nelinearnosti u sistemu ne mogu biti nadoknađene na valjan način. S druge strane nelinearni kontroleri mogu da upravljaju nelinearnostima u operacijama širokog opsega direktno. Ovo se lako može prikazati problemima kontrole pokreta robota. Kada se linearni kontroler koristi za kontrolu pokreta robota, on zanemaruje nelinearne sile koje su povezane sa pokretima spojeva robota. Tačnost kontrolera tako brzo opada, kako se brzina pokreta povećava, zato što mnoge dinamičke sile koje se tu javljaju, kao što su koriolisove i centripetalna sila, menjaju srazmerno kvadratu brzine. Prema tome, da bi se postigla planirana tačnost u izvršenju zadatka robota, kao što su podigni i stavi, lučno varenje i sečenje laserom brzina pokreta robota, a samim tim i produktivnost, mora se držati na niskom nivou.

- **Analiza teških nelinearnosti**

Druga pretpostavka linearne kontrole je da model sistema stvatno moguće linearizovati. Međutim u upravljačkim sistemima ima mnogo nelinearnosti čija nestalna priroda ne dozvoljava linearnu aproksimaciju. Ove tzv. „teške“ nelinearnosti uključuju Kulonovo trenje, zcićenje, zonu neosetljivosti, zazor i histerezis i često se nalaze u upravljačkom inženjeringu. Njihovi efekti ne mogu da se izvedu linearnim metodama, a tehnike nelinearne analize moraju biti razvijene tako da predvide performanse nekog sistema u prisustvu ovih nelinearnosti. Zato što takve nelinearnosti često izazivaju neželjeno ponašanje upravljačkih sistema, kao što su nestabilnost i granični krugovi, njihovi efekti se moraju predvideti i pravilno nadoknaditi.

- **Rad sa neizvesnošću modela**

Pri projektovanju linearnih kontrolera obično je neophodno pretpostaviti da su parametri modela sistema opšte poznati u razumnim granicama. Međutim mnogi problemi kontrole uključuju neizvesnosti u parametrima modela. To može da se desi zbog spore promene parametara (npr., promena vazdušnog pritiska tokom leta aviona), ili zbog nagle promene parametra (npr., u inercijalnim parametrima robota kada uhvati novi predmet). Linearni kontroler zasnovan na netačnim ili prevaziđenim vrednostima parametara modela može kao rezultat da da značajan pad performansi ili čak nestabilnost. Nelinearnosti mogu biti namerno uvedene u kontrolni deo upravljačkog sistema tako da se neizvesnosti modela mogu tolerisati. Dve klase nelinearnih kontrolera za ovu primenu su robusni kontroleri i adaptivni kontroleri.

- **Jednostavnost dizajna**

Dobri projekti nelinearne kontrole mogu biti jednostavniji i mnogo intuitivniji od svojih linearnih suparnika. Ovaj apriori paradoksalan rezultat dobija se zbog činjenice da su projekti nelinearnih kontrolera često duboko ukorenjeni u fizici objekta upravljanja. Razmotrimo jedan prost primer. Zamislimo klatno koje se klati okačeno o zglobov u vertikalnoj ravnini. Počevši od nekog proizvoljnog početnog ugla klatno će oscilovati i progresivno se zaustaviti po vertikali. Iako ponašanje klatna može da se analizira linearizovanjem sistema, fizički njegova stabilnost vrlo malo zavisi od sopstvene vrednosti neke linearizovane matrice sistema. Do toga dolazi zbog činjenice da se ukupna mehanička energija sistema progresivno rasipa usled raznih sila trenja (npr., na zglobovima), tako da klatno prestaje da se kreće pri minimalnoj energiji. Postoje i ostali razlozi za upotrebu tehnike nelinearne kontrole, kao što su cena i optimalnost performansi. U industriji ad-hoc upotreba linearnih tehnika za kontrolu naprednih mašina sa značajnim nelinearnostima kao rezultat može imati visoku cenu i dug period razvoja pri čemu je kontrolni kod prilično nestabilan i sa slabim performansama i vrlo ga je teško primeniti na slične aplikacije.

Linearna kontrola zahteva aktuatora i senzore visokog kvaliteta koje će proizvesti linearno ponašanje u određenom opsegu operacije, dok nelinearna kontrola dozvoljava upotrebu jeftinijih komponenti sa nelinearnim karakteristikama. U prošlosti je primena nelinearnih metoda kontrole bila ograničena računarskim teškoćama koje su bile povezane sa projektom i analizom nelinearne kontrole. Poslednjih godina, međutim, napredak u kompjuterskoj tehnologiji je dosta olakšao rešavanjem ovog problema, tako da trenutno vlada veliki entuzijazam za istraživanje i primenu nelinearnih metoda upravljanja.

12 Zaključak

Prethodnih godina prednosti snažnih i jeftinih mikroprocesora dali su veliki podsticaj kako u teoriji tako i u praksi nelinearnog upravljanja. Što se teorije tiče najveći napredak je napravljen u oblasti feedback linearizacije, klizne kontrole i nelinearnim adaptivnim tehnikama, dok je u praksi napravljen značajan napredak u robotici i kosmičkim sistemima. Kao rezultat svega toga nelinearno upravljanje zauzima značajno mesto u planiranju automatskog upravljanja.

Obzirom da je ponašanje nelinearnih sistema mnogo složenije od ponašanja linearnih sistema, tako je i analiza nelinearnih sistema dosta teža. Matematički se to odražava na dva načina. Najpre, nelinearne jednačine, za razliku od linearnih se uopšteno ne mogu rešiti analitički, pa je zato potpuno razumevanje ponašanja nelinearnih sistema veoma teško. Kao drugo, moćne matematike alatke kao što su Laplasove i Furijeove transformacije se ne mogu primeniti na nelinearne sisteme.

Kao rezultat svega toga, ne postoje sistematske alatke za predviđanje ponašanja nelinearnih sistema, nema sistematskih procedura za projektovanje nelinearnih upravljačkih sistema. Umesto toga postoji široki spektar veoma moćnih analiza i instrumenata za projektovanje, od kojih je svaka najbolje primenljiva za posebnu klasu nelinearnih upravljačkih problema.

U prvom delu su objašnjene osnovne analitičke alatke koje se mogu koristiti za proučavanje nelinearnih sistema. Osnovni problem u analizi i projektovanju upravljačkih sistema je stabilnost. Razni koncepti stabilnosti kao što su stabilnost po Ljapunovu, asimototska, eksponencijalna, globalna asimptotska ili eksponencijalna stabilnost, moraju biti definisani da bi tačno okarakterisali složenost i raznolikost ponašanja u nelinearnim sistemima. Kako se analitička rešenja nelinearnih diferencijalnih jednačina obično ne mogu dobiti, dve metode Ljapunova su od ogromne važnosti za određivanje stabilnosti sistema.

Drugi deo zadatka se bavi dinamikom automatskog vođenja objekata u prostoru, odnosno analizom i sintezom autopilota. Autopiloti se ne primenjuju samo u bespilotnim letelicama već i u letelicama gde postoje realni piloti. Kako ljudska civilizacija sve više napreduje, piloti mnogo manje vremena provode na Zemlji između dva leta, pa je neophodno da u 'vazduhu' prave pauzu (kada je to moguće), kako ne bi došlo do prekomernog zamora pilota. Međutim, autopiloti se još uvek ne primenjuju pri poletanju i sletanju putničkih aviona iz razloga što greške autopilota kod takvih aviona mogu da iznose i do 10 metara, što naravno može da dovede do neželjenih posledica.

Iz izloženog u ovom delu možemo zaključiti da je nemoguće izvršiti kvalitetnu analizu i sintezu sistema automatskog upravljanja bez primene savremenih softverskih rešenja. U delu koji se bavi simulacijom dinamike aviona, možemo primetiti da programe AeroSim i FlightGear možemo instalirati samo ako verzija matlaba u simulinku ima aero blok. Pomoću aero bloka koji se nalazi u simulinku matlaba moguće je napraviti simulaciju dinamike aviona, a na osnovu matematičkog modela. Međutim, program AeroSim ima već gotove blokove (šeme) za razne modele aviona (putničke sportske pa čak i model za vojni avion sa vertikalnim poletanjem-harijer). Te već postojeće blokove moguće je modifikovati i prilagoditi željenim karakteristikama koje ta simulacija treba da obezbedi. Program

FlihtGear nam omogućuje da na ekranu računara vidimo kokpit aviona i na taj način nam čini užitek lepšim i simulacija izgleda verodostojnija. Na bazi ovakvih modela i ovakvih programa je napravljena simulacija u realnim simulatorima za obuku pilota u pilotskim akademijama.

Ovo je još jedan od dokaza da se nauka i tehnika razvijaju velikom brzinom, a sve zahvaljujući brzom razvoju informacijske tehnologije (kako hardvera tako i softvera). Zadatak nas inženjera je ne samo da koristimo već postojeća rešenja i da na osnovu njih rešavamo postojeće probleme vić i da učesvujemo u razvoj novih rešenja.

Literatura:

- [1] Dragan V Lazić. *Nelinearni sistemi*. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet 2005.
- [2] Stevica Graovac. *Automatsko vođenje objekata u prostoru*. Akademska misao Elektrotehnički fakultet, Beograd 2005.
- [3] Dragutin LJ Debeljković. *Dinamika objekata i procesa*. Mašinski fakultet u Beogradu 1989.
- [4] Web sajt Elektrotehnički fakultet Beograd. Predmet nelinearni sistemi – zadaci.
- [5] Milić Stojić. *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*. Naučna knjiga, Beograd 1988.
- [6] Borislav Milojković, Ljubomir T Grujić. *Automatsko upravljanje*. Mašinski fakultet, Beograd 1981
- [7] Dragutin LJ Debeljković. *Zbirka zadataka iz dinamike objekata i procesa*. Mašinski Fakultet u Beogradu 1990.