

Simulacija gađanja letećeg cilja savremenim artiljerijskim sistemom protivvazdušne odbrane

Dr Nenad Dodić, dipl.inž.¹⁾

Razmatra se primena računarske simulacije u ispitivanju efikasnosti artiljerijskog sistema protivvazdušne odbrane sa automatskim sistemom za upravljanje vatrom. Analiziraju se deterministički i slučajni procesi u sistemu za upravljanje vatrom, koji značajno utiču na gađanje cilja. Predlaže se postupak simulacije gađanja, koji obuhvata procese koji prethode gađanju (let cilja, pokretanje nišanskog uređaja, merenje položaja cilja, ocenjivanje parametara kretanja cilja, balistički proračun, pokretanje topa) i samo gađanje (let projektila i dejstvo projektila na cilju). Dat je primer računarske simulacije gađanja.

Ključne reči: Simulacija, gađanje, cilj u vazduhu, artiljerijski sistem, PVO, greške gađanja.

Uvod

POSLEDNJE tri-četiri decenije protivavionski (PA) topovi se intenzivno razvijaju i usavršavaju, kako bi išli u korak sa savremenim protivavionskim raketama. Starije generacije PA topova odlikovale su se malom brzinom paljbe, slabom ukupnom tačnošću, ručnim pokretanjem cevi i mehaničkim nišanskim spravama, koje su pružale male šanse da se cilj pogodi na većim rastojanjima. Savremeni PA topovi imaju veliku brzinu paljbe, povećan efikasan domet, povećan učinak municije (naročito one sa blizinskim dejstvom), pokretanje cevi i nišanske sprave servomotorima, koje je kod samohodnih oruđa i žiroskopski stabilisano, senzore za merenje položaja cilja, meteorološke i druge senzore, kao i računarski sistem za obradu podataka i upravljanje vatrom.

PA top je osavremenjavanjem postao složen, tehnološki visokorazvijeni sistem - *artiljerijski sistem protivvazdušne odbrane (PVO)*, čiji je cilj da obezbedi što uspešniju blisku protivvazdušnu odbranu. Velika ponuda savremenih artiljerijskih sistema PVO, kao i stalno osavremenjavanje starih, pokazuje da su - i pored nesumnjivih kvaliteta i premoći raketa zemlja-vazduh na daljinama dejstva većim od tri do četiri kilometara - artiljerijski sistemi konkurentni pri dejstvu na manjim daljinama. Njihove prednosti su: velika gustina vatre ostvarena relativno jeftinom municijom i nemogućnost protivnika da artiljerijske projektele skrene sa zadatih putanja ili da ih ometa. Ove prednosti ne mogu da dođu do izražaja ako se ne obezbedi visoka tačnost gađanja. Da bi se tačnost postigla, mehanizmi topa i municija moraju biti precizno izrađeni. Jednako je važno i tačno određivanje tačke susreta projektila i cilja i uglova preticanja topa, kao i precizno pozicioniranje topa pod zadatim uglovima.

Brojni parametri utiču na funkcionisanje artiljerijskog sistema PVO i verovatnoću pogađanja letelice. Međuizavisnosti parametara i procesa u ovom sistemu su često izuzetno složene. Neki od parametara se menjaju slučajno, pa se njihove tačne vrednosti ne mogu unapred znati. Sve ovo čini

analizu efikasnosti artiljerijskog sistema PVO izuzetno delikatnom i složenom.

Osnovni pokazatelji efikasnosti PA topa su verovatnoće pogađanja i uništenja cilja. Određivanje ovih verovatnoća iscrpljujućim gađanjima leteće mete, za različite vrednosti parametara oruđa i cilja, neisplativo je sa ekonomskog i organizacionog stanovišta i skopčano sa određenim rizicima. Zato se već duže vreme pribegava teorijskoj analizi gađanja cilja. Korektan prilaz teorijskoj analizi gađanja podrazumeva verodostojan matematički opis svih procesa koji značajno utiču na gađanje u vidu sistema jednačina, poznavanje parametara i rešavanje sistema jednačina za zadate uslove, ograničenja i ulaze, čiji oblik treba da odslikava stvarne borbene uslove dejstva. Jasno je da se, zbog složenosti problema, rešenja svih jednačina koje opisuju ove procese ne mogu naći analitički.

Klasični pristup analizi sistema PVO podrazumeva velika uprošćenja: uspostavljaju se statičke veze između uticajnih veličina i linearizuju, pretpostavlja se uniformno kretanje cilja, greške u procesu praćenja i gađanja cilja se tretiraju kao nezavisne normalno raspodeljene slučajne veličine. Na osnovu navedenog, određuju se verovatne greške gađanja po pravcu (azimutu) i visini (elevaciji), pa se tek onda uvodi pretpostavka da su one korelisane duž pravca kretanja cilja. Integraljenjem združene gustine raspodela verovatnoća ovih grešaka po idealizovanoj površini siluete cilja dobija se verovatnoća pogađanja cilja [1-2]. Nedostatak ovakvog pristupa je što ne uzima u obzir dinamiku procesa u artiljerijskom sistemu, dinamički karakter grešaka i poremećaja, kao ni sve bitne korelacije koje između njih postoje.

Razvoj digitalnih računara i numeričkih matematičkih metoda omogućio je da se sistemi složenih dinamičkih (diferencijalnih) jednačina rešavaju brzo i relativno jednostavno, za proizvoljne oblike ulaznih veličina i proizvoljne uslove i ograničenja. Istina je da su ovakva rešenja približna,

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

ali i da se pravilnim izborom koraka integraljenja i pravilnim korišćenjem numeričkih postupaka može ostvariti željena tačnost rešenja. Rešenja se ne dobijaju u zatvorenom obliku ali se, ponavljanjem postupka rešavanja za proizvoljan skup vrednosti promenljivih parametara, može dobiti kompletna slika ponašanja sistema koji se ispituje.

S obzirom da računarski podržana simulacija procesa u suštini predstavlja rešavanje sistema jednačina koje taj proces opisuju i da složenost matematičkih veza ne predstavlja poseban problem za moćne i svima dostupne računarske mašine nove generacije, jasno je da se računarskom simulacijom mogu prevazići nedostaci klasične analize efikasnosti gađanja. Ako se ovome doda automatska obrada rezultata simulacije i mogućnost efektnog grafičkog i tabelarnog prikaza rezultata, može se zaključiti da je računarska simulacija atraktivna i korisna dopuna ili zamena dosadašnjim analitičkim postupcima ispitivanja efikasnosti vatreneog dejstva oruđa PVO i poligonskim gađanjima mete.

Procesi u artiljerijskom sistemu PVO

Gađanje cilja se ne može posmatrati odvojeno od procesa koji obezbeđuju izračunavanje elemenata gađanja. Vatreneog dejstvo podrazumeva sledeće procese (aktivnosti):

- praćenje cilja,
- određivanje elemenata gađanja (balistički proračun),
- usmeravanje oruđa i senzora i
- otvaranje vatre.

Praćenje cilja predstavlja prikupljanje informacija o cilju i određivanje njegovog kretanja. Svrha praćenja je da obezbedi podatke o kretanju cilja za određivanje elemenata gađanja. Osnovna informacija o cilju je njegov *vektor položaja* i dobija se obradom signala sa mernih senzora, koji mogu biti: nišanski radar, termovizijska ili televizijska kamera, laserski daljinomer i davači uglova nišanske ose (ose senzora): enkoderi, razlagači, žiroskopi. Više o merenju položaja cilja i obradi izmerenih veličina je izloženo u [3]. Dopunske informacije o cilju mogu se dobiti od posebne službe osmatranja (VOJIN) ili sopstvenim vizuelnim osmatranjem. Određivanje kretanja cilja u praksi se svodi na ocenjivanje kinematskih veličina cilja - *vektora položaja, brzine i ubrzanja*, a po potrebi i viših izvoda vektora položaja cilja.

Razrađen je niz metoda za praćenje, bez neposrednog učešća čoveka - automatsko ili uz povremeno korektivno učešće čoveka - poluautomatsko praćenje [4]. Većina metoda praćenja omogućuje tačno određivanje parametara kretanja cilja kada cilj leti pravolinijski, konstantnom brzinom ili jednoliko ubrzava. Najnovije metode omogućuju tačno određivanje parametara kretanja i kada je cilj u zaokretu (koordinisani zaokret), uz mogućnost adaptacije na promenu načina kretanja [5-7].

Određivanje elemenata gađanja za PA top predstavlja određivanje vremena leta projektila, uglova preticanja topa (uglova između ose cevi topa i linije oruđe-cilj), režima vatre i tipa municije (ako sistem za hranjenje topa obezbeđuje izbor municije). Da bi se ostvario susret artiljerijskog projektila i cilja, potrebno je predvideti tačku susreta projektila i cilja i na osnovu balističkih podataka o topu i municiji i meteoroloških podataka odrediti odgovarajuće uglove azimuta i elevacije topa. Problemi susreta i određivanja elemenata gađanja, za opšti slučaj leta cilja, razmatrani su u [8-9].

Meteo-balistički podaci mogu se ručno uneti u sistem pre početka vatreneog dejstva. Neki savremeni sistemi imaju senzore za automatsko merenje meteoroloških veličina,

temperature barute, pa čak i početne brzine prethodno ispaljenog projektila. Napredak elektronike i senzorske tehnike je otišao toliko daleko, da je već na raspolaganju sistem koji meri brzinu projektila dok prolazi kroz usta cevi, koriguje na osnovu nje izračunato vreme leta i tempira upaljač projektila, pre nego što on napusti cevi.

Usmeravanje oruđa je proces postavljanja cevi oruđa pod proračunatim uglovima preticanja sa što manjom greškom. Za realizaciju ovog procesa se koriste servosistemi sa električnim ili hidrauličnim motorima. Matematički opisi ovakvih servosistema, neophodni za njihovu simulaciju, sa identifikovanim vrednostima parametara, mogu se naći npr. u [10-11].

Usmeravanje senzora je proces postavljanja senzora u pravcu cilja, kako bi se omogućila detekcija cilja i merenje njegovih koordinata. Osnovni senzori za merenje položaja cilja su grupisani u jedinstvenu celinu. To je *nišanska sprava*, pa se zato govori o upravljanju nišanskom spravom. Ono može biti ručno, poluautomatsko ili automatsko, zavisno od stepena učešća čoveka u upravljanju. Odgovarajući zakoni upravljanja se razlikuju. Određena rešenja navedenih tipova upravljanja, koja se mogu koristiti u postupku simulacije praćenja i gađanja, predložena su u [12].

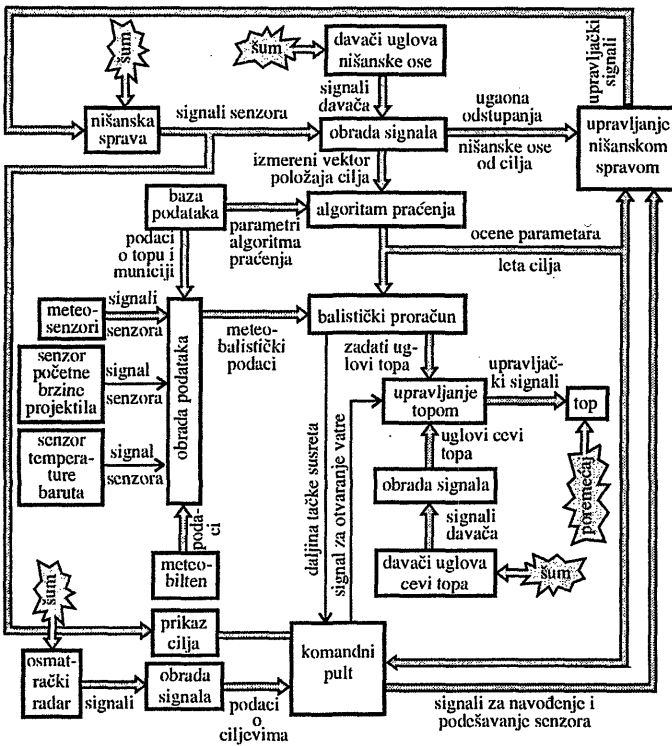
Otvoranje vatre je najdelikatniji i najneizvesniji od svih nabrojanih procesa. Preduslov za uspešno otvaranje vatre je uspešna realizacija svih prethodno navedenih procesa. Za razliku od sistema sa vođenim projektilima, sistem topa nakon opaljenja ne može vršiti nikakvu korekciju putanje artiljerijskog projektila. U idealnim uslovima, projektil bi se, nakon proračunskog vremena leta, našao u proračunskoj tački susreta, koja ne mora da se poklapa sa ciljem, zbog grešaka u postupku praćenja. S obzirom na greške pozicioniranja topa, projektil je iz te tačke izmešten srazmerno ugaoim greškama pozicioniranja topa po azimutu i elevaciji. Zbog balističkih rasturanja uslovljenih topom i municijom, kao i grešaka meteoroloških i balističkih veličina korišćenih u balističkom proračunu, položaj projektila je dodatno pomeren po azimutu, elevaciji i daljini.

Ova odstupanja imaju sličan karakter. Odstupanja projektila zbog pogrešnog pozicioniranja topa su vremenski korelisana. Ova korelativnost je strogo određena dinamičkim ponašanjem servosistema topa. Za ostale komponente odstupanja projektila od proračunske tačke susreta se može smatrati da nisu vremenski korelisane, odnosno da trenutne vrednosti tih odstupanja ne zavise od njihovih vrednosti u proteklom vremenu. Komponente odstupanja proračunske tačke susreta od položaja cilja u proračunatom trenutku susreta su korelisane i vremenski i prostorno. Oblik ove korelativnosti je određen primenjenim postupkom praćenja.

Da li će projektil ostvariti dejstvo na cilj zavisi od toga koliko će se projektil približiti cilju, da li će udariti u cilj, kakav se upaljač koristi i da li će on funkcionisati, odnosno da li će se pod datim uslovima aktivirati ili ne. Da li će cilj koji je pogođen telom ili parčadima jednog ili više projektila biti uništen ili ne, zavisi od ranjivosti pogođenih delova cilja, razornosti projektila i akumulacije oštećenja.

Sistem koji obezbeđuje realizaciju navedenih aktivnosti (proces) naziva se *sistem za upravljanje vatrom (SUV)*. Primena pomenute senzorske tehnike, upravljačkih podsistema i izvršnih organa (motora) omogućila je delimičnu ili potpunu automatizaciju upravljanja vatrom. Težnja je da se čovek u što većoj meri rastereti funkcije upravljanja vatrom i da se njegova uloga svede na nadgledanje i donošenje konačne odluke o otvaranju vatre, jer je on jedan od glavnih uzroka grešaka i nepouzdanosti sistema. Zadatak SUV je da operatoru u donošenju odluka maksimalno pomogne, pra-

vremenim i preglednim prikazom relevantnih podataka (slika cilja, daljina cilja, procena greške praćenja, predlog trenutka otvaranja vatre, izbor režima vatre i municije). Upravljanje vatrom najsavremenijih sistema PVO je potpuno automatizovano. Sl.1 prikazuje šematski i uprošćeno komponente i aktivnosti u *automatskom artiljerijskom SUV*.



Slika 1. Funkcionalna šema artiljerijskog sistema za upravljanje vatrom

Navedenim procesima treba pridružiti i *let cilja*, koji bitno utiče na tok upravljanja vatrom i gađanje. Let cilja je složen i, sa stanovišta SUV, u opštem slučaju nepredvidljiv proces. Ovo naročito važi za letelice kojima upravlja čovek, s obzirom da on može u bilo kom trenutku promeniti način kretanja letelice. Na današnjem nivou znanja i tehnike veliku verovatnoću susreta projektila i cilja moguće je ostvariti samo kada se cilj kreće ustaljeno. Ustaljeni režimi kretanja su: kretanje konstantnim vektorom brzine, kretanje konstantnim vektorom ubrzanja i koordinisani zaokret [13]. Ustaljeno kretanje letelice u potpunosti je određeno trenutnim stanjem cilja, pa za tačno predviđanje njegovog položaja nije neophodno znati funkcionalni oblik komandi zadatih letelici.

Svi navedeni procesi su izloženi dejstvu smetnji (šumova) i poremećaja. Tako se u svim mernim sensorima (davačima) nišanske sprave i topa javlja unutrašnji (termalni) šum, ali na merenje utiču i atmosfera, sunce i okolni objekti, povećavajući dodatno greške merenja. Na kretanje topa utiču i moment i sila trzanja topa pri opaljenju, fluktuacije napajanja energijom, mehaničke nepravilnosti (mrtvi hodoivi, nejednakost zubaca reduktora) i oscilacije usled kretanja vozila (kod samohodnih oruđa). Balistička svojstva projektila variraju od primerka do primerka. Let projektila remete promene strujanja, pritiska i temperature slojeva vazduha. Ove promene utiču i na let cilja, ali sa stanovišta SUV najnepovoljnija je promena načina kretanja izazvana voljom pilota i ona za SUV predstavlja poremećaj. Navedeni uticaji su nepredvidljivi i ne mogu se deterministički definisati, već se smatraju slučajnim veličinama koje imaju određene statističke karakteristike. Mesta u artiljerijskom podsistemu

na kojima je delovanje šuma i poremećaja najizraženije, označena su na sl.1.

Slučajne promene navedenih veličina daju slučajan karakter celokupnom procesu upravljanja vatrom, što nameće statistički prilaz analizi procesa gađanja i korišćenje statističkih pokazatelja za njegovu karakterizaciju.

Simulacija procesa koji prethode gađanju

Procesi koji prethode gađanju cilja su: kretanje cilja, merenje položaja cilja, određivanje njegovog kretanja, balistički proračun (određivanje elemenata gađanja) i upravljanje topom i nišanskom spravom, odnosno njihovo usmeravanje. Njihova simulacija je složena aktivnost. Ona ima smisla samo ako je u dovoljnoj meri verodostojna, odnosno ukoliko dovoljno verno opisuje date procese. Sa stepenom verodostojnosti raste složenost simulacije. S druge strane, potreban stepen verodostojnosti zavisi od svrhe u koju će se rezultati simulacije upotrebiti. Ako je svrha simulacije provera određene odbrambene strategije ili načelnog tehničkog rešenja, onda nema potrebe da simulacija detaljno odsljkava karakteristike određenih podsistema SUV, s obzirom da zaključci ispitivanja treba da važe uopšteno za različite tehnološke realizacije SUV. Ako je svrha simulacije da se proveri funkcionalnost i efikasnost neke sasvim određene komponente (recimo nišanske sprave ili upravljačkog bloka) u sasvim određenoj realizaciji SUV, onda je potreban veći nivo verodostojnosti simulacije odgovarajućih komponenti, pa će ona biti iscrpnija i složenija.

Procese koji se simuliraju treba raščlaniti do određenog nivoa, uočiti i definisati njihove međusobne veze. Gađanju cilja prethodi usmeravanje oruđa u pravcu određenom balističkim proračunom. Balističkim proračun koristi rezultate praćenja cilja, koji su uslovljeni merenjem položaja cilja, a ono kretanjem nišanske sprave i platforme na kojoj se nalaze i top i nišanska sprava. Ovi procesi su uslovljeni kretanjem cilja. Svi navedeni procesi su složeni, sastavljeni iz mnoštva nižih procesa. S njihovim raščlanjivanjem može se ići toliko daleko dok se ne dođe do mikroskopskih procesa vezanih za molekule i elementarne čestice, koje je besmisleno opisivati determinističkim relacijama, a koji ispoljavaju određene efekte na makroskopskom nivou.

Jasno je da svi procesi nisu podjednako značajni i uticajni. Zato se uspostavljaju determinističke matematičke relacije između makroskopskih pojava koje imaju visok stepen korelacije. Te se pojave definišu determinističkim promenljivama koje imaju relativno spore promene. Visokofrekventne pojave malih amplituda, koje su posledica mnoštva mikroskopskih pojava, smatraju se slučajnim procesima koji imaju karakteristike šuma. S obzirom da su ovakve pojave barem za jedan do dva reda veličine brže od osnovnih procesa u SUV, one se obično smatraju *belim šumovima*, koji nisu vremenski korelisani. S obzirom da se pretpostavlja da su makroskopske visokofrekventne slučajne pojave nastale superpozicijom velikog broja mikroskopskih slučajnih pojava [14] može se usvojiti, shodno centralnoj graničnoj teoremi [15], da one imaju *normalnu (Gausovu) raspodelu*. Neželjene pojave prisutne u kanalima za signale zvače se *šumovi*. Neželjene pojave prisutne u procesnim delovima sistema (motori, reduktori, ...) zvače se *poremećaji*.

Simulacija slučajno promenljivih veličina

Simulacija slučajno promenljive (šuma, poremećaja) koja se smatra Gausovim belim šumom, svodi se na generisanje sekvence belog šuma s normalnom raspodelom. Naj-

bolje su razrađeni algoritmi za generisanje uniformno (jednoliko) raspodeljenih slučajnih veličina, tj. takvih da je praktično podjednaka učestalost pojavljivanja bilo koje vrednosti iz intervala (a, b) , a verovatnoća pojave vrednosti izvan tog opsega jednaka nuli. Matematičko očekivanje μ_u i varijansa σ_u^2 ovakvih slučajnih veličina su [16]:

$$\mu_u = (a + b)/2, \quad \sigma_u^2 = (b - a)^2 / 12 \quad (1)$$

Funkcija za generisanje uniformno raspodeljene pseudo-slučajne veličine postoji na praktično svakom računaru i u svakom programu koji podržava matematičke funkcije. Obično ima naziv *RND* ili *RAND*. Generator ovakvih veličina može se iskoristiti za generisanje normalno raspodeljenih slučajnih veličina. Neka su poznati matematičko očekivanje μ i varijansa σ^2 slučajne promenljive koja ima normalnu raspodelu i čiju sekvencu treba generisati. Neka je S_n zbir od n brojeva sa uniformnom raspodelom na intervalu (a, b) , gde je n dovoljno velik broj (npr. 90). Prema centralnoj graničnoj teoremi S_n ima približno normalnu raspodelu s matematičkim očekivanjem μ_n i varijansom σ_n^2 :

$$\mu_n = n(a + b)/2, \quad \sigma_n^2 = n(b - a)^2 / 12 \quad (2)$$

Veličina

$$x = (S_n - \mu_n) \frac{\sigma}{\sigma_n} + \mu \quad (3)$$

ima željenu normalnu raspodelu. Dakle, normalno raspodeljena slučajna promenljiva se može generisati sumiranjem računarnom generisanih pseudoslučajnih brojeva.

Simulacija usmeravanja topa i nišanske sprave

Top pokreću dva odvojena servomotora (električna ili hidraulična), jedan za azimut, drugi za elevaciju, preko reduktora. Brzina obrtanja motora se menja promenom njegovog napajanja, posredstvom upravljačkih jedinica, s ciljem da cev topa zauzme zadati pravac. Rad servosistema topa opisuje se diferencijalnim i diferencnim jednačinama. Rešavanjem ovih jednačina za date vrednosti ulaza (zadati uglovi topa) simulira se postupak usmeravanja topa i dobijaju uglovi koje zauzima cev topa.

Servosistemi za usmeravanje nišanske sprave, odnosno nišanske ose, koriste uglavnom električne motore sa ili bez reduktora. Oni se matematički opisuju na sličan način kao servosistemi topa, s tim što su ulazi ugaona odstupanja nišanske ose od linije nišanska sprava-cilj, a izlazi uglovi nišanske ose.

S obzirom da ulazi servosistema topa i nišanske sprave mogu biti različite, unapred nepoznate funkcije vremena, jednačine ovih servosistema se rešavaju približno jednim od brojnih postupaka numeričke analize, pri čemu se korak rešavanja (interval integraljenja) bira tako da promene veličina koje određuju ponašanje servosistema u toku jednog koraka rešavanja nisu značajne [17].

Savremeni PA topovi imaju mali odskočni ugao. Pored toga, samohodna PA oruđa žiroskopskom stabilizacijom kompenzuju poremećaje nastale trzanjem topa pri opaljenju i kretanjem vozila. To može biti opravdanje za zanemarivanje ovih poremećaja, kao dopunskih i štetnih ulaza izuzetno složene dinamike, što značajno uprošćava simulaciju. Ako su slučajne greške ugaonog položaja topa, uzrokovane kretanjem vozila ili neravnomernošću zubaca reduktora male, one se najjednostavnije simuliraju dodavanjem šuma izlazu servosistema.

Ukoliko se razmatra praćenje i gađanje cilja na većim daljinama (npr. preko 2000 metara) kada je ugaona brzina cilja u odnosu na oruđe mala, dinamika pokretanja topa i nišanske sprave se može i zanemariti i smatrati da su srednje greške upravljanja jednake nuli, što predstavlja dalje uprošćenje postupka simulacije. Ostvareni uglovi azimuta i elevacije topa se, u tom slučaju, mogu simulirati dodavanjem šumova zadatim uglovima. Greške pozicioniranja nišanske ose se pritom mogu potpuno zanemariti, s obzirom da ne utiču presudno na merenje položaja cilja, a time i na dejstvo celog oruđa, sve dok je cilj u vidnom polju senzora.

Simulacija merenja položaja cilja

Savremeni senzori za merenje položaja cilja imaju zanemarljivo male vremenske konstante u odnosu na vremenske konstante servosistema PA oruđa i vremenske konstante ciljeva u vazduhu, pa se može smatrati da nema vremenske zavisnosti između sukcesivnih merenja veličina na osnovu kojih se određuje položaj cilja, a to su: uglovi između linije nišanska sprava-cilj i nišanske ose, uglovi nišanske ose i daljina cilja. Sistematske greške merenja se eliminišu propisnim održavanjem i pripremom senzora, dok se grube greške moraju eliminisati u procesu obrade senzorskih signala, tako da ostaju prisutne samo male slučajne greške merenja [18]. Ovo znači da se simulacija merenja može jednostavno svesti na dodavanje normalno raspodeljenih belih šumova multih srednjih vrednosti i odgovarajućih varijansi tačnim vrednostima veličina koje se mere.

Simulacija leta cilja

Kretanje letelice je u opštem slučaju veoma složen dinamički proces koji se odvija u skladu sa zadatim komandama. Ono se može opisati sistemom nelinearnih jednačina dvanaestog reda [19]. Simulacija leta u tom slučaju predstavlja rešavanje tog sistema jednačina za zadate komande. Numeričko rešavanje sistema jednačina ne predstavlja poseban problem. Problem je generisanje komandi, koje su ulazne veličine matematičkog modela kretanja cilja, takvih da cilj ostvaruje željenu trajektoriju. Problem se može rešavati dvojjako: sintetizovanjem automatskog upravljanja letelicom i zadavanjem željene putanje, koju to upravljanje treba da ostvari [20] ili projektovanjem takvog simulatora leta u kome čovek u realnom vremenu upravlja simuliranim letelicom [21].

Oba rešenja su dosta složena za praktičnu realizaciju, naročita ako njihova prevashodna svrha nije ispitivanje ponašanja same simulirane letelice. Trajektorija leta cilja, koja je neophodna za simulaciju praćenja i gađanja cilja, može se dobiti i na jednostavniji način - ona se može sastaviti iz niza fragmenata koji predstavljaju tipične režime leta, a opisani su običnim linearnim ili nelinearnim jednačinama. Jedno takvo rešenje je predloženo u [21].

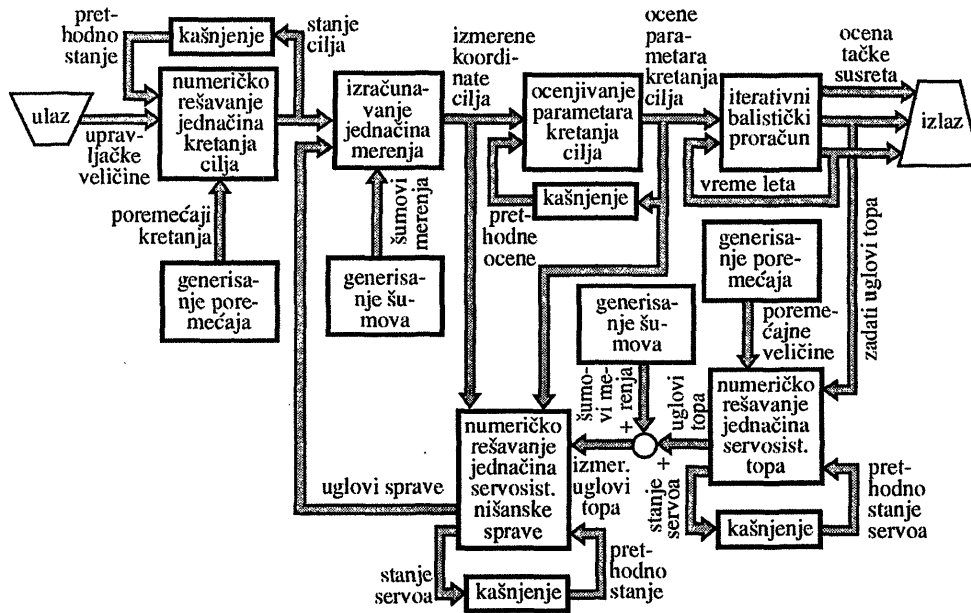
Simulacija praćenja i određivanja elemenata gađanja

Usmeravanjem nišanske sprave ka cilju i merenjem njegovog položaja obezbeđuje se određivanje parametara kretanja cilja, primenom izabrane metode (postupka) praćenja. Na osnovu parametara kretanja cilja izračunavaju se tačka susreta projektila i cilja i elementi gađanja. S obzirom da postupci praćenja i određivanja elementa gađanja (balistički proračun) predstavljaju niz formalnih radnji koje se realizuju u računarskom podsistemu PA sredstva, računarska simulacija ovih postupaka predstavlja doslednu realizaciju tih radnji.

Da bi se simulirale greške meteo-balističkih podataka, koji se koriste za određivanje elementa gađanja, usvajaju se

određene vrednosti ovih podataka i proglašavaju "tačnim". Njima se u postupku simulacije dodaju greške kao konstantne veličine (ukoliko se u simuliranom PA sredstvu meteo-balistički podaci unose pre početka rada) ili šum (ukoliko se meteo-balističke veličine mere u realnom vremenu). Tako se dobijaju meteo-balistički podaci "s greškom", odnosno "netačni" podaci.

Jedna od mogućih šema simulacije postupaka koji prethode gađanju je prikazana na slici 2.



Slika 2. Simulacija procesa koji prethode gađanju

Simulacija gađanja

U radu SUV PA topa javlja se niz grešaka. Posledica tih grešaka je da top ne pogađa uvek centar cilja. Koliko će projektil u toku leta odstupiti od centra cilja i kakvo će dejstvo ostvariti na cilju, zavisi od konkretnih vrednosti tih grešaka u toku gađanja. Stoga simulacija gađanja mora da obuhvati sve greške koje značajnije utiču na rezultate gađanja. Greške u SUV koje utiču na gađanje su:

- greške praćenja cilja (greške ocenjivanja kinematskih veličina cilja),
- greške meteorološko-balističkih podataka,
- balistička rasturanja municije i oruđa,
- greške servosistema topa (greške pozicioniranja topa) i
- greške približnog balističkog proračuna u odnosu na tačan proračun putanje projektila.

Gađanje u prisustvu navedenih grešaka se može simulirati na sledeći način:

- Zadaju se dva skupa meteo-balističkih podataka: jedan se smatra tačnim, a drugi netačnim, tj. uključuje greške meteo-balističkih podataka.
- Na osnovu "tačnih" meteo-balističkih podataka, za željeni trenutak gađanja računaju se vreme leta, položaj tačke susreta i uglovi preticanja. Greške ocena kinematskih veličina cilja uzrokuju greške predviđanja položaja cilja, pa se izračunata tačka susreta projektila i cilja ne poklapa sa centrom cilja u proračunskom trenutku susreta. Razlika vektora položaja ove dve tačke predstavlja vektor greške gađanja zbog grešaka praćenja \vec{e}_1 . Ukoliko ne bi postojale druge greške osim grešaka praćenja, projektil

bi se u proračunskom trenutku susreta našao u izračunatoj tački susreta.

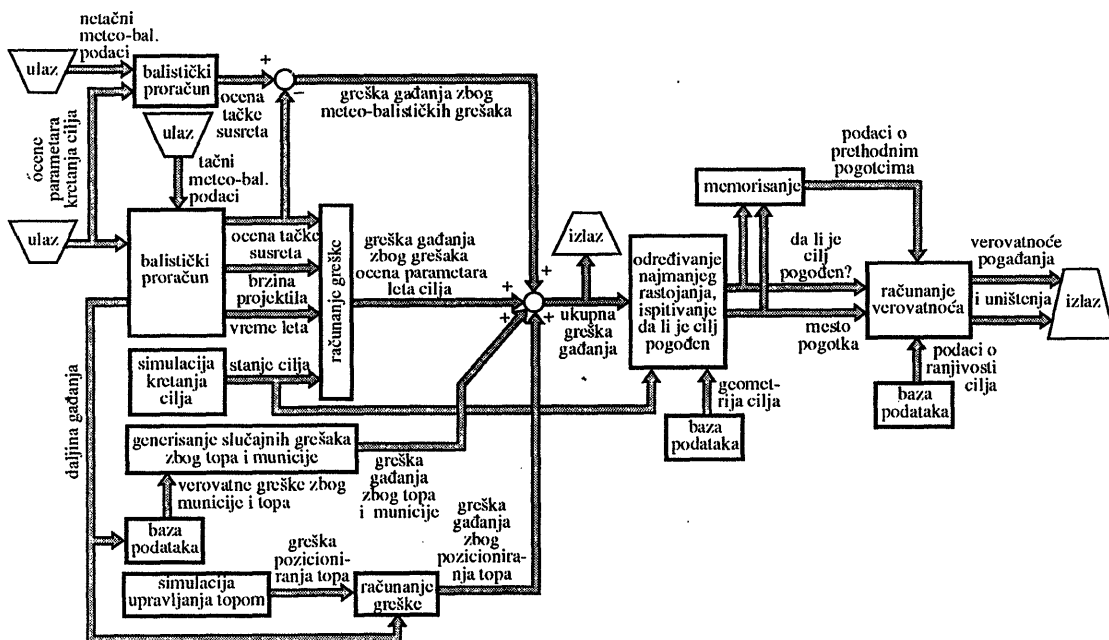
- Grešci \vec{e}_1 se dodaje greška \vec{e}_2 zbog balističkih rasturanja topa i municije. Ova greška se generiše kao normalno raspodeljena slučajna vektorska veličina nulte srednje vrednosti, na osnovu onih verovatnih grešaka iz tablice gađanja koje odgovaraju izračunatoj daljini susreta.

- Greškama \vec{e}_1 , \vec{e}_2 se dodaje greška gađanja \vec{e}_3 zbog greške ugaonog pozicioniranja topa - tj. ugaone razlike zadatog i ostvarenog položaja topa. \vec{e}_3 se izračunava na osnovu greške pozicioniranja topa i daljine susreta.
- Prethodnim greškama se dodaje greška zbog netačnih meteo-balističkih podataka. Ova vektorska greška računava se na osnovu razlika uglova i daljina gađanja dobijenih korišćenjem "tačnih" i "netačnih" meteo-balističkih podataka.
- Savremeni računari u SUV su dovoljno brzi da mogu u realnom vremenu da sprovedu balistički proračun željene tačnosti. Stoga se greška gađanja zbog balističkog proračuna \vec{e}_5 po pravilu zanemaruje. Ukoliko se ipak želi ispitati njen uticaj na gađanje, greška \vec{e}_5 se može odrediti na osnovu razlika uglova i daljina gađanja dobijenih primenom odabranog približnog balističkog proračuna i referentnog (tačnog) balističkog proračuna na iste ulazne podatke.
- Ukupni vektor greške je $\vec{e}_{uk} = \vec{e}_1 + \vec{e}_2 + \vec{e}_3 + \vec{e}_4 + \vec{e}_5$. Sabiranjem ovog vektora sa vektorom položaja cilja u proračunskom trenutku susreta dobija se položaj projektila u proračunskom trenutku susreta. Na osnovu njega, poznatih položaja i brzine cilja, kao i brzine projektila u proračunskom trenutku susreta, mogu se odrediti položaji projektila i cilja u trenutku kada su oni najbliži, kao i njihova vektorska razlika. Na osnovu nje, orijentacije cilja (dobija se u postupku simulacije kretanja cilja) i definisane geometrije cilja, ispituje se da li je cilj pogođen i, ako jeste, koji je deo cilja pogođen.

- Ako je cilj pogođen, na osnovu mesta pogotka, stepena ranjivosti pogođenog mesta i podataka o akumulaciji oštećenja pri eventualnim ranijim pogocima, određuje se da li je cilj uništen ili ne.
- Postupak simulacije praćenja i gađanja ponavlja se više desetina ili stotina puta. Za svaki trenutak gađanja zbrajaju se slučajevi da je cilj pogođen, kao i slučajevi da je cilj uništen. Deljenjem broja pogodaka sa brojem ponavljanja simulacije, dobija se verovatnoća pogađanja, a deljenjem broja slučajeva uništenja cilja sa brojem ponavljanja simulacije - verovatnoća uništenja cilja.

tički definišu statističke međuzavisnosti različitih slučajnih veličina, s obzirom da se zavisnosti uspostavljaju u samom postupku simulacije. Ovakvom simulacijom može se verodostojno ispitivati efikasnost određenog artiljerijskog sistema PVO, pri dejstvu na leteći cilj u različitim uslovima i različitim situacijama.

Simulacija gađanja se znatno pojednostavljuje ako se zanemare greške balističkog proračuna, a verovatnoća uništenja računa bez razmatranja ranjivosti pojedinih delova cilja. Naime, može se za svaki posmatrani tip cilja usvojiti srednja verovatnoća uništenja (w_k) cilja koji je pogođen i vero-



Slika 3. Simulacija gađanja

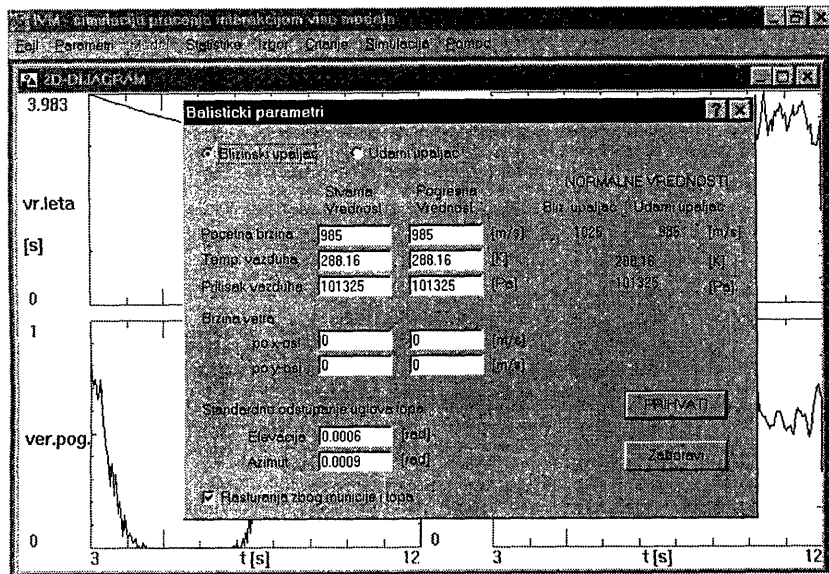
Šema simulacije gađanja je prikazana na slici 3. Ako su svi procesi u SUV verno simulirani, onda će i korelacije koje postoje između grešaka u SUV biti verno odslikane. Prethodno opisanim postupkom verovatnoće pogađanja i uništenja određuju se jednostavno, bez potrebe da se anali-

vatnoća uništenja cilja jednim projektilom računati kao: $w_u = w_f w_k$, gde je w verovatnoća pogađanja jednim projektilom, a w_f verovatnoća aktiviranja upaljača projektila.

Radi daljeg pojednostavljenja se mogu zanemariti međusobni uticaji ispaljivanja projektila u rafalu, odnosno može se zanemariti vremenska korelacija gađanja pojedinačnim projektilima iz rafala. Kvalitetna mehanika topa, kao i snažno i efikasno servoupravljanje mogu opravdati navedeno zanemarivanje. Takođe se može zanemariti i akumulacija oštećenja pri višestrukom pogađanju cilja, čime se u određenoj meri smanjuju izračunate vrednosti verovatnoće uništenja, ali se računanje pojednostavljuje. U tom slučaju se verovatnoće uništenja za različite režime vatre mogu računati na osnovu verovatnoća uništenja jednim projektilom.

Primer simulacije

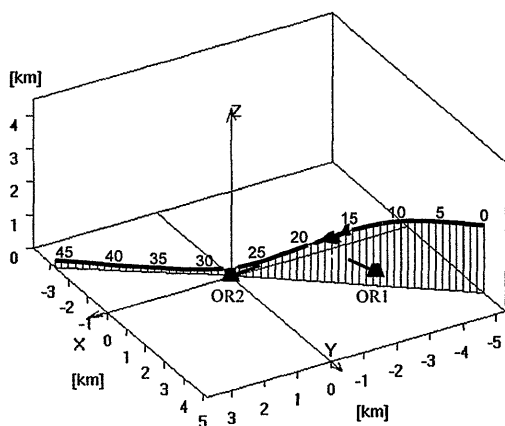
Za potrebe istraživanja metoda praćenja cilja u vazduhu autor je izradio programski paket za ispitivanje njihove efikasnosti. On uključuje i simulaciju gađanja, primenom opisanog postupka. Programski paket je pisan programskim jezikom C++ za operativne sisteme WINDOWS 95/98/NT. On uključuje program MANEVAR za generi-



Slika 4. Program IVM - izbor parametara gađanja

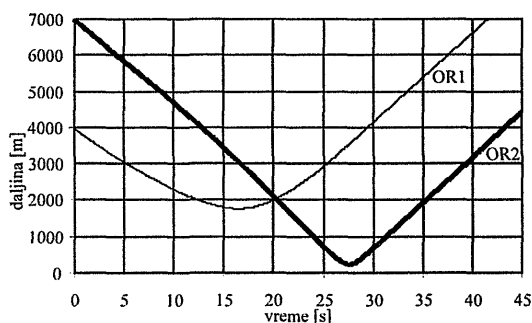
sanje različitih trajektorija cilja i programe za simulaciju praćenja i gađanja: ZAOKRET (koristi različite postupke automatskog praćenja cilja primenom jednog Kalmanovog filtra), IVM (koristi se automatsko praćenje primenom paralelnih Kalmanovih filtara – sl.4) i REGEN (koristi se ručno i poluautomatsko praćenja cilja).

Sl.5 prikazuje putanju aviona koji iz poniranja napada cilj na zemlji, krećući se prosečnom brzinom ≈ 250 m/s. Brojevi pored putanje označavaju vreme u sekundama. Simulirano je gađanje sa dva topa kalibra 40 mm, čiji su položaji iznačeni na slici sa OR1 i OR2. Izabrana je municija sa blizinskim upaljačem. Simulirano je praćenje elektrooptičkim automatskim nišanskim uređajem, primenom četiri spregnuta Kalmanova filtra [7].

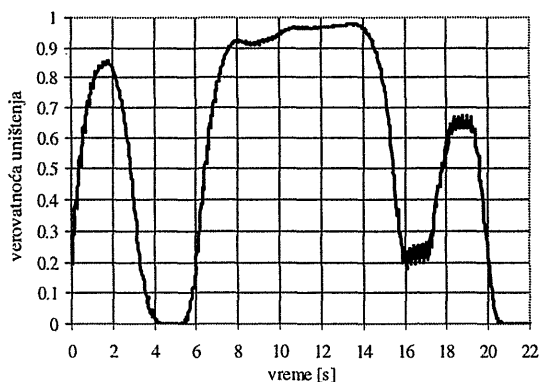


Slika 5. Putanja cilja

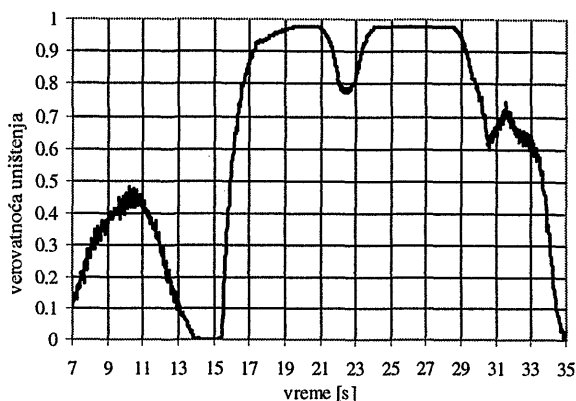
Brojčane vrednosti svih parametara ove simulacije se mogu naći u [13]. Na sl.6 se prikazuje promena rastojanja cilja od oruđa 1 i 2, a na slikama 7 i 8 zavisnost verovatnoća uništenja cilja rafalom od 10 projektila od trenutka opaljenja, za oruđa 1 i 2.



Slika 6. Rastojanja cilja od oruđa



Slika 7. Verovatnoća uništenja rafalom od 10 projektila - oruđe 1



Slika 8. Verovatnoća uništenja rafalom od 10 projektila - oruđe 2

Zaključak

Predloženi postupak simulacije gađanja uključuje većinu relevantnih procesa i uticaja i uspostavlja verodostojne veze između njih. Postupak je naročito pogodan za ispitivanje efikasnosti različitih artiljerijskih sistema PVO sa automatskim SUV. Postupak je praktično realizovan u vidu softverskog paketa. Nakon određenih izmena simulacije praćenja cilja, koja je integralni deo ukupne simulacije gađanja, moguće je ispitivati i artiljerijske sisteme sa ručnim i poluautomatskim upravljanjem vatrom, što je u praksi i ostvareno.

U odnosu na klasične analitičke postupke određivanja verovatnoća pogađanja i uništenja cilja, koji podrazumevaju brojna aproscavanje i zanemarivanja, predloženi postupak obezbeđuje veću verodostojnost i tačnost rezultata i omogućuje da se verovatnoće izračunavaju bez ikakvih ograničenja načina kretanja cilja. Mogućnost da se ispituje efikasnost sistema PVO protiv cilja koji manevriše je naročito značajna, s obzirom da savremena taktika vazduhoplovnog napada sve više skraćuje pravolinijski let u rejonu vatrenog dejstva, što klasične metode ispitivanja efikasnosti sistema PVO čini neadekvatnim.

Literatura

- [1] ALFEROV,V., BAKULIN,A., ORLOV,B. i dr. *Proektirovanie raketnih i stvorljnjih sistem*. Moskovskaj tipografij, Moskva 1974.
- [2] BRANDLI,H. *Theorie des Mehrfach-Schusses*. Verlag Birkhauser, Basel 1950.
- [3] DODIĆ,N. Merenje položaja cilja u toku automatskog praćenja. *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.49, no.1, p.3-9.
- [4] DODIĆ,N. Poluautomatsko praćenje letelica u sistemu za upravljanje vatrom protivavionskog topa. *Naučnotehnički pregled*, 1994, vol.44, no.7, p.28-34.
- [5] DODIĆ,N. Praćenje manevrišućeg cilja u vazduhu na osnovu hipoteze o koordinisanom zaokretu. *Naučnotehnički pregled*, 1997, vol.47, no.4, p.9-15.
- [6] DODIĆ,N. Praćenje sistema interakcijom više modela. *Naučnotehnički pregled*, 1997, vol. 47, no.2, p.3-9.
- [7] DODIĆ,N. Novi postupak praćenja ciljeva u vazduhu primenom paralelnih Kalmanovih filtara. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.48, no.4, p.80-85.
- [8] MILINOVIĆ,M., DODIĆ,N. Problem susreta projektila i cilja u sistemu automatskog upravljanja vatrom protivavionskog topa. *Vojnotehnički glasnik*, 1996, no.5, p.525-532.
- [9] MILINOVIĆ,M., DODIĆ,N. Automatsko upravljanje vatrom protivavionskog topa. *Naučnotehnički pregled*, 1997, vol.47, no.1, p.10-13.
- [10] DODIĆ,N., VILIČIĆ,A., DUNJIĆ,M.: Estimacija parametara električnog servosistema. *35. konferencije ETAN*. zbornik radova, Beograd, 1991, 8. sveska, p.59-66.

- [11] DODIĆ, N. *Estimacija parametara jednog elektrohidrauličnog servosistema za pokretanje platforme borbenog sredstva*. magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [12] DODIĆ, N. Upravljanje nišanskom spravom u funkciji praćenja cilja u vazduhu. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.48, no.6, p.33-38.
- [13] DODIĆ, N. *Istraživanje novih metoda praćenja manevrišućih ciljeva s primenom na sisteme upravljanja vatrom - doktorska disertacija*, Mašinski fakultet, Beograd 1998.
- [14] KALMAN, R. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transaction on ASME - Journal of Basic Engineering*, Series 82D, Mart 1960, p.35-45.
- [15] SIMONOVIĆ, V. *Uvod u teoriju verovatnoće i matematičku statistiku*. Građevinska knjiga, Beograd 1986.
- [16] LEDERMANN, W. (Ed.) *Handbook of Applicable Mathematics - Vol. 2 : Probability*. John Wiley & Sons, Chichester, 1982.
- [17] DODIĆ, N. Savremeni pristup računarski podržanoj simulaciji servosistema. *Vojnotehnički glasnik*, 1999, vol.47, no.2, p.52-60.
- [18] DODIĆ, N. Analiza grešaka u postupku praćenja cilja. *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.49, no.3, p.7-15.
- [19] NENADOVIĆ M. *Stabilnost i upravljivost letelica 1. deo*. Mašinski fakultet, Beograd 1971.
- [20] VUKOBRATOVIĆ, M., CVETKOVIĆ, V., STOKIĆ, D. *Dinamika leta aviona*, SSNO, Beograd 1980.
- [21] DODIĆ, N. Generisanje trajektorija borbenog aviona. *Nučnotehnički pregled*, 1999, vol.49, no.2, p.3-9.

Rad primljen: 28.6.1999.god.