Mr Milenko Živaljević,
puk. dipl. inž.
Mr Milica Kalić,
dipl. inž.
Mr Goran Pavković,
dipl. inž.

POUZDANOST SISTEMA ZA ZAUSTAVLJANJE I AUTOMATSKO KOČENJE BORBENOG AVIONA I MOGUĆNOST ODREĐIVANJA KOEFICIJENATA POGORŠANJA PERFORMANSI PRIMENOM FUZZY LOGIKE

Uvod

Kod borbenih aviona novije generacije, osim vrhunskih performansi (maksimalni dolet, maksimalna brzina leta, optimalna upravljivost i stabilnost, itd.) zahteva se, tokom čitavog leta i sletanja, i visoka pouzdanost izvršenja zadatka — misije. Pri tome je jasno da pouzdanost izvršenja borbenog zadatka zavisi od pouzdanosti elemenata ugrađenih u avion.

U važne osobine aviona spada mogućnost bezbednog sletanja i zaustavljanja. Avion koji ostvaruje željene performanse u letu, a nema ugrađenu visoku pouzdanost sistema za sletanje i zaustavljanje može ugroziti bezbednost završne faze.

Nakon dodira poletno-sletne staze (PSS), avion ima određenu brzinu kretanja V , odnosno kinetičku energiju, koju treba apsorbovati kočenjem.

Kočenje i zaustavljanje aviona na PSS vrši se na jedan od sledećih načina:

- upotrebom kočnica točkova aviona;
- kočenjem na principu aerodinamičkog otpora (kočioni padobran, aerodinamičke kočnice, itd.);
- korišćenjem kontrapotiska (reversa) turbomlaznih propulzora (TMP);

— »hvatanjem aviona« pri sletanju na nosač aviona, i

— kombinovanjem pojedinih navedenih načina kočenja.

Apsorbovanje kinetičke energije radi zaustavljanja aviona, u praksi se najčešće vrši korišćenjem kočnica ugrađenih na točkovima glavnih nogu stajnog trapa, pri čemu se kinetička energija aviona transformiše u toplotu.

Izbacivanjem koćećeg padobrana (sl. 1), može se znatno smanjiti dužina zaustavljanja na PSS (30 do 40%) [10].

Da bi se obezbedilo optimalno kočenje, sprečilo blokiranje točkova za vreme kočenja, a pilot oslobodio dela odgovornih i složenih zadataka tokom sletanja, uveden je sistem za automatsku regulaciju kočenja (SARK).

Imajući u vidu složenost i odgovornost sistema za kočenje i zaustavljanje aviona, u radu je razmatrana pouzdanost izvršenja kočenja za slučajeve:

- normalnog kočenja sa ili bez automatske regulacije kočenja;
- kočenja sa povećanom pouzdanošću, kada se osim normalnog kočenja mogu, u slučaju potrebe, aktivirati kočioni padobran i ručno kočenje za zaustavljanje aviona.

Sl. 1 — Kočenje padobranom aviona JAGUAR

Funkcija pouzdanosti sistema

Sa stanovišta ovog rada neophodno je ukratko opisati sledeće veze elemenata (sistema):

- rednu,
- paralelnu, i
- specifičnu (kvazi-rednu i kvazi-paralelnu).

Na osnovu Bulove algebre, redna veza elemenata u sistemu (slika 2), može se izraziti u obliku »preseka« događaja:

$$D_s = D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_n$$

odnosno verovatnoće realizacije povoljnih događaja:

$$P_s(D_s) = P(D_1) \cdot P(D_2) \cdot \dots \cdot P(D_n) \quad (1)$$

Pošto verovatnoća ispravnog rada pojedinih elemenata predstavlja i njihovu pouzdanost, to se može pisati:

$$P_i(D_i) = R_i(t)$$

Odnosno, za sistem:

$$P_s(D_s) = R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \quad (2)$$

Presek realizacije povoljnih događaja pokazuje da je pouzdanost sistema $R_s(t)$ sa rednom vezom obezbeđena sa-

mo kada je realizovan događaj D_1 (element »1« je u RADU) i događaj D_2 (element »2« je u RADU) i..... i događaj D_n (n-ti element je u RADU).

Na osnovu Bulove algebre moguće je predstaviti i paralelnu vezu elemenata u sistemu (slika 3) preko tzv. »unije događaja«. Povoljan događaj, odnosno stanje sistema u RADU realizuje se ako je realizovan ili događaj D_1 (element »1« je u RADU) ili događaj D_2 (element »2« je u RADU),

odnosno, simbolično:

$$P_s = P_1 \cup P_2$$

Pogodniji za izražavanje paralelne veze elemenata je zakon proizvoda verovatnoća, koji polazi od nepouzdanosti:

$$R_s = 1 - F_s$$

Verovatnoća da će oba elementa biti u stanju u OTKAZU je:

$F_s = F_1 \cdot F_2$, pri čemu za svaki element važi:

$$F_1 = 1 - R_1$$

$$F_2 = 1 - R_2$$

sledi:

$$R_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \quad (3)$$

Sl. 2 — Redna veza elemenata

Sl. 3 — Paralelna veza elemenata u sistemu

Za sistem sa više elemenata [3]:

$$R(t) = \sum_{i=1}^n R_i - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n R_i(t) R_j(t) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n R_i(t) R_j(t) R_k(t) + (-1)^{n-1} \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4)$$

ili:

$$R_s(t) = 1 - (1 - R_1(t)) (1 - R_2(t)) \dots (1 - R_n(t)) \quad (5)$$

Postoje i drugi načini povezivanja elemenata u blok-šemi pouzdanosti, od kojih je za vazduhoplovne sisteme značajno pomenuti specifične (kvazi-redne i kvazi-paralelne veze), koje, po svom karakteru, imaju obeležja rednih i paralelnih veza ili, često, i jednih i drugih sa određenim specifičnostima.

Kod kvazi-rednih veza (za razliku od rednih, gde otkaz jednog elementa predstavlja otkaz čitavog sistema), otkaz jednog ili više elemenata (ne bilo kojih) ne predstavlja otkaz sistema, već

Sl. 4 — Kvazi-redna veza elemenata u sistemu

samo nastavak rada sa pogoršanim ili, često, i pogrešnim karakteristikama.

Blok-šema jednog sistema sa kvazi-rednom vezom prikazana je na slici 4.

Pouzdanost ovakvog sistema se računa:

$$R_s = R_1 [1 - (1 - R_2) (1 - K_f)] R_3 \quad (6)$$

Kvazi-paralelna veza sistema (slika 5), predstavlja vezu osnovne grane (1) čije performanse odgovaraju perfor-

Sl. 5 — Kvazi-paralelna veza elemenata u sistemu

mansama sistema i paralelne grane (2), čije su performanse nešto niže od performansi sistema.

To znači da pri otkazu grane (1), grana (2) neće ostvariti iste performanse, nego će one biti umanjene za faktor K_f , pri čemu se uzima da je:

$$K_f = \frac{\text{performanse grane (2)}}{\text{performanse grane (1)}} < 1$$

Kao ilustrativan primer ovakvih veza mogu se navesti sistemi za osnovno i pomoćno kočenje aviona ili automobila. U slučaju otkaza osnovne grane, sistem kočenja i dalje funkcioniše, ali sada sa nešto umanjenom efikasnošću.

Pouzdanost prikazanog kvazi-paralelnog sistema računa se:

$$R_s = 1 - (1 - R_1) (1 - R_2 \cdot K_f) \quad (7)$$

Sistem za kočenje i zaustavljanje borbenog aviona

Sistem za kočenje i zaustavljanje borbenog aviona (sl. 6) namenjen je za [10]:

— normalno kočenje točkova, sa ili bez automatske regulacije kočenja,

— pomoćno kočenje i blokiranje točkova pri parkiranju aviona,

— diferencijalno kočenje točkova na levoj i desnoj nozi, čime se postiže upravljanje avionom u toku voženja.

Hidraulično kolo kočionog sistema napaja se hidrauličnom energijom iz os-

Kočioni sistem se sastoji od velikog broja delova. Sa stanovišta pouzdanosti, izvestan broj elemenata koji imaju istu ili sličnu funkciju možemo smatrati jednim elementom ili podsistemom. Time se blok-dijagram pouzdanosti znatno uprošćava, bez štete po funkcionalnost sistema.

Sl. 6 — Šema sistema za kočenje i zaustavljanje borbenog aviona (bez elemenata kočionog padobrana)

novnog hidrosistema, čiju hidrauličnu pumpu pogoni desni TMP.

Za kočenje aviona u slučaju da se želi postići skraćenje staze ili u slučaju otkaza na kočionom sistemu, koristi se koćeci padobran. Padobran je vezan za bravu, koja se napaja hidrauličnom energijom iz komandnog hidrosistema. Hidraulična pumpa komandnog hidrosistema napaja se energijom od levog TMP. Na taj način je, sa stanovišta pouzdanosti, sprečen otkaz oba hidrosistema jednovremeno.

Kočioni sistem je tako koncipiran da je u slučaju otkaza osnovnog hidrosistema i gubitka hidraulične energije u njemu, za kočenje obezbeđen rezervni izvor energije (hidroakumulator) koji se aktivira putem kola za ručno kočenje.

Blok-dijagram sistema za slučaj normalnog kočenja

Uprošćena šema kočionog sistema za slučaj normalnog kočenja sastoji se od sledećih elemenata:

- osnovni hidrosistem za napajanje,
- redukcioni ventil,
- nožna pumpa,
- kočioni razvodni cilindar,
- kočioni razvodni ventil,
- davači brzine u točkovima,
- upravljačka kutija,
- prekidač na pritisak,
- servorazvodnik,
- kočnica točka,
- ventil sigurnosti.

Otkaz sistema za automatsku regulaciju kočenja otežaće rad pilotu, ali neće znatno uticati na pogoršanje performansi aviona u pogledu kočenja.

Blok-dijagram pouzdanosti sistema za funkcionisanje normalnog kočenja prikazan je na sl. 7.

Uprošćena šema kočionog sistema za slučaj kočenja sa povećanom pouzda-
nošću sastoji se od sledećih elemenata:

- osnovni hidrosistem za napajanje,
- redukcioni ventil,
- nožna pumpa,

Sl. 7 — Blok dijagram sistema za normalno kočenje sa ili bez automatske regulacije kočenja

Kako je u trenutku t rada sistema $P(D)=R(t)$, funkcija pouzdanosti sistema za normalno kočenje definiše se na sledeći način:

$$R_{nk} = R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 [1 - (1 - R_6) (1 - K_f)] [1 - (1 - R_7) (1 - K_f)] R_8 R_9 R_{10} R_{11}, \quad (8)$$

pri čemu je uzeto da sistem funkcioniše i pri otkazu automatske regulacije kočenja (davači brzine u točkovima i upravljačka kutija) kao kvazi-redna veza, sa neznatno umanjenim performansama.

Blok-dijagram sistema za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću

Sistem je koncipiran tako da u slučaju otkaza nekog od elemenata sistema normalnog kočenja, pilot ima mogućnost da uspešno završi kočenje, koristeći ručno kočenje i kočeci padobran.

- kočioni razvodni cilindar,
- kočioni razvodni ventil,
- davači brzine u točkovima,
- upravljačka kutija,
- prekidač na pritisak,
- servorazvodnik,
- kočnica točka,
- ventil sigurnosti,
- hidroakumulator,
- razvodnik za parkiranje,
- nepovratni ventil,
- komandni hidrosistem,
- mehanizam kočecog padobrana,
- kočeci padobran.

Blok-dijagram pouzdanosti sistema za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću, može se predstaviti sa dve kvazi-paralelne veze (sl. 8).

Pouzdanost sistema prikazanog na slici 8 najjednostavnije će se rešiti pre-

Sl. 8 — Blok dijagram sistema za kočenje sa povećanom pouzdanošću

ko verovatnoće događaja ispravnog rada pojedinih blokova sistema.

Funkcija pouzdanosti za ovako koncipiran sistem lakše se određuje kada se sistem podeli na blokove I, II, III i IV (sl. 9).

Sl. 9 — Blok dijagram sa definisanim događajima mogućeg ispravnog rada blokova sistema

Funkcije pouzdanosti blokova su:

blok I: $R_I = R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_9$

blok II: $R_{II} = R_{10} R_{11}$

blok III: $R_{III} = R_{12} R_{13} R_{14} K_{f1}$

blok IV: $R_{IV} = R_{15} R_{16} R_{17} K_{f2}$

Za date blokove, tokovi izvršenja zadatka (za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću) jesu:

$$D_s = D_a \cup D_b \cup D_c$$

$$D_a = D_I \cap D_{II}$$

$$D_b = D_{III} \cap D_{II}$$

$$D_c = D_{IV}$$

Verovatnoća izvršenja zadatka dobija se razvojem formule (4) za tri događaja mogućeg ispravnog rada za kočenje aviona — misija sa povećanom pouzdanošću.

Pouzdanost izvršenja zadatka je:

$$P_{abc} = P(D_a) + P(D_b) + P(D_c) - P(D_a) P(D_b) - P(D_a) P(D_c) - P(D_b) P(D_c) + P(D_a) P(D_b) P(D_c), \text{ odnosno:}$$

$$P_{abc} = P_a + P_b + P_c - P_a P_b - P_a P_c - P_b P_c + P_a P_b P_c,$$

$$P_{abc} = P_I P_{II} + P_{III} P_{II} + P_{IV} - P_I P_{II} P_{III} - P_I P_{II} P_{IV} - P_{II} P_{III} P_{IV} + P_I P_{II} P_{III} P_{IV}$$

Posle uvođenja $P(D_i)^n = P(D_i)$ i sređivanja izraza dobija se:

$$P_{abc} = P_I P_{II} + P_{III} P_{II} + P_{IV} - P_I P_{II} P_{III} - P_I P_{II} P_{IV} - P_{II} P_{III} P_{IV} + P_I P_{II} P_{III} P_{IV}$$

Stavljajući da je $P_{abc} = R_{abc} = R_{abc}(t) = R_i(t)$ za bilo koji trenutak vremena t , dobija se:

$$R_{abc} = R_I R_{II} + R_{III} R_{II} + R_{IV} - R_I R_{II} R_{III} - R_I R_{II} R_{IV} - R_{II} R_{III} R_{IV} + R_I R_{II} R_{III} R_{IV}$$

Sređivanjem izraza dobija se:

$$R_{abc} = 1 - \{1 - R_{II}[1 - (1 - R_I)(1 - R_{III})]\}(1 - R_{IV})$$

Zamenjujući funkcije pouzdanosti blokova u prethodni izraz dobija se:

$$R_{abc} = 1 - \{1 - R_{10} R_{11}[1 - (1 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_9)(1 - R_{12} R_{13} R_{14} K_{f1})]\}(1 - R_{15} R_{16} R_{17} K_{f2}) \quad (9)$$

Određivanje koeficijenata K_f primenom fuzzy logike

Radi sagledavanja doprinosa pouzdanosti sistema, za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću, neophodno je poznavati pouzdanost pojedinih elemenata sistema i koeficijente K_f , koji predstavljaju faktor pogoršanja performansi u slučaju otkaza pojedinog elementa ili čitave paralelne grane. Pouzdanost elemenata moguće je odrediti praćenjem otkaza elemenata, dok je koeficijente pogoršanja performansi (K_f) kod borbenih aviona relativno teško odrediti, jer su merenja, pre svega, skupa, dugotrajna i rizična, pošto bi zahtevala namerno simuliranje pojedinih otkaza.

Problem u izračunavanju koeficijenata predstavlja i neodređenost faktora od kojih oni zavise, višeznačnost, nepreciznost i/ili nedovoljno jasni i pouzdani kriterijumi za njihovo određivanje.

U konkretnom primeru, koeficijenti se mogu dobiti merenjima. I tada, oni će predstavljati stohastičke veličine, koje za jedan avion, sa određenom težinom sletanja, zavise od obučenosti pilota, jačine vetra i temperature okoline. Zna se jedino da se po uticaju navedeni faktori

mogu rangirati sledećim redosledom: obučenost pilota, jačina vetra i temperatura, i da obučenost i jačina vetra deluju pozitivno (ako je u pravcu, s čela), a temperatura negativno, dok međusobni uticaji nisu poznati. Stoga je za određivanje ovih koeficijenata moguće primeniti fuzzy logiku, koju primenjuju piloti Vazduhoplovnog opitnog centra (VOC-a) i ostali koji poznaju performanse aviona za slučaj ispravnog rada i otkaza pojedinih sistema ili elemenata sistema.

Fuzzy logiku za određivanje koeficijenata K_{f1} , K_{f2} , K_{f6} i K_{f7} primenićemo tako što uvodimo u razmatranje sledeće promenljive:

- O — fuzzy promenljiva koja označava obučenost pilota,
- V — fuzzy promenljiva koja označava intenzitet vetra,
- T — fuzzy promenljiva koja označava temperaturu vazduha,
- E — fuzzy promenljiva koja označava efikasnost kočenja.

Fuzzy promenljive O, V i T predstavljaju ulazne promenljive, na osnovu čijih vrednosti treba doneti odluku o vrednosti izlazne promenljive E. Pretpostavimo da se obučenost pilota O može izraziti fuzzy skupovima kao »odlična«, »vrlo dobra« i »dobra«. Fuzzy skupovi koji opisuju obučenost pilota prikazani su na slici 10. Fuzzy promenljivoj V bilo je moguće dodeliti vrednosti »slab«, »umeren« i »jak«. Fuzzy skupovi koji opisuju intenzitet vetra prikazani su na slici 11. Pretpostavimo da se temperatura vazduha T može izraziti fuzzy skupovima »niska«, »srednja« i »visoka« (funkcije pripadnosti ovih fuzzy skupova prikazane su na slici 12). Izlazna promenljiva E, koja označava efikasnost kočionog sistema, predstavljena je fuzzy skupovima »visoka«, »srednja« i »niska« (funkcije pripadnosti ovih fuzzy skupova prikazane su na slici 13).

Autori predlažu sledeća pravila aproksimativnog rezonovanja za određivanje efikasnosti kočenja:

Pravilo 1: Ako je O odlična, V slab, T niska tada je E visoka
ili

Sl. 10 — Funkcije pripadnosti fuzzy skupova »dobra«, »vrlo dobra« i »odlična« obučenost pilota

Sl. 11 — Funkcije pripadnosti fuzzy skupova »slab«, »umeren«, i »jak« vetar

Sl. 12 — Funkcije pripadnosti fuzzy skupova »niska«, »srednja« i »visoka« temperatura

Pravilo 2: Ako je O vrlo dobra, V slab, T niska tada je E srednja

ili

Pravilo 3: Ako je O dobra, V slab, T niska tada je E niska

ili

Sl. 13 — Funkcije pripadnosti fuzzy skupova koji opisuju efikasnost

Pravilo 4: Ako je O odlična, V umeren, T niska tada je E visoka

ili

Pravilo 5: Ako je O vrlo dobra, V umeren, T niska tada je E visoka

ili

Pravilo 6: Ako je O dobra, V umeren, T niska tada je E niska

ili

Pravilo 7: Ako je O odlična, V jak, T niska tada je E visoka

ili

Pravilo 8: Ako je O vrlo dobra, V jak, T niska tada je E visoka

ili

Pravilo 9: Ako je O dobra, V jak, T niska tada je E srednja

ili

Pravilo 10: Ako je O odlična, V slab, T srednja tada je E srednja

ili

Pravilo 11: Ako je O vrlo dobra, V slab, T srednja tada je E srednja

ili

Pravilo 12: Ako je O dobra, V slab, T srednja tada je E niska

ili

Pravilo 13: Ako je O odlična, V umeren, T srednja tada je E visoka

ili

Pravilo 14: Ako je O vrlo dobra, V umeren, T srednja tada je E srednja

ili

Pravilo 15: Ako je O dobra, V umeren, T srednja tada je E niska

ili

Pravilo 16: Ako je O odlična, V jak, T srednja tada je E visoka

ili

Pravilo 17: Ako je O vrlo dobra, V jak, T srednja tada je E visoka

ili

Pravilo 18: Ako je O dobra, V jak, T srednja tada je E niska

ili

Pravilo 19: Ako je O odlična, V slab, T visoka tada je E srednja

ili

Pravilo 20: Ako je O vrlo dobra, V slab, T visoka tada je E srednja

ili

Pravilo 21: Ako je O dobra, V slab, T visoka tada je E niska

ili

Pravilo 22: Ako je O odlična, V umeren, T visoka tada je E srednja

ili

Pravilo 23: Ako je O vrlo dobra, V umeren, T visoka tada je E srednja

ili

Pravilo 24: Ako je O dobra, V umeren, T visoka tada je E niska

ili

Pravilo 25: Ako je O odlična, V jak, T visoka tada je E visoka

ili

Pravilo 26: Ako je O vrlo dobra, V jak, T visoka tada je E visoka

ili

Pravilo 27: Ako je O dobra, V jak, T visoka tada je E niska

Uočimo pravilo broj 7: Ako je O odlična, V jak, T niska tada je E visoka.

Ovo pravilo predstavlja fuzzy relaciju između obučenosti pilota (O), intenziteta vetra (V), temperature vazduha (T) i efikasnosti kočenja (E).

Izraz »Ako je O odlična, V jak i T niska« predstavlja fuzzy frazu definisanu na skupu čiji su elementi $O \times V \times T$. Označimo ovu fuzzy frazu sa X. Funkcija pripadnosti fuzzy fraze X opisana je na sledeći način:

$$\mu_x(o, v, t) = \min\{\mu_{odlično}(o), \mu_{jak}(v), \mu_{niska}(t)\}$$

Implikacija »Ako X, tada je E visoka« takođe je fuzzy fraza. Označimo ovu fuzzy frazu sa Y. Fuzzy fraza Y definisana je na skupu čiji su elementi $O \times V \times T \times E$. Funkcija pripadnosti fuzzy fraze Y je:

$$\mu_y(o, v, t, e) = \min\{\mu_x(o, v, t), \mu_{visoka}(e)\}$$

Dve ili više fuzzy fraza povezane rečju »ili« čine fuzzy rečenicu. Označimo respektivno sa $Y_1, Y_2, \dots, Y_{27}$ fuzzy fraze koje se odnose na 27 prethodno definisanih pravila. U našem slučaju, fuzzy fraze $Y_1, Y_2, \dots, Y_{27}$ čine fuzzy rečenicu (ovu fuzzy rečenicu označimo sa Z). Funkcija pripadnosti fuzzy rečenice Z je:

$$\mu_z = \max\{\mu_{y1}(o, v, t, e), \mu_{y2}(o, v, t, e), \dots, \mu_{y27}(o, v, t, e)\}$$

Za unapred zadate vrednosti obučenosti pilota (O), intenziteta vetra (V) i temperature vazduha (T) primenom izloženog algoritma aproksimativnog rezonovanja svakoj od mogućih vrednosti izlazno promenljive E pridružen je odgovarajući stepen pripadnosti. U sledećem koraku vršimo »defazifikaciju«, odnosno izbor jedne vrednosti efikasnosti kočenja E. U ovom radu konačni izbor vrednosti efikasnosti kočenja izvršen je primenom metoda centra gravitacije (Teodorović i Kikuchi, 1991).

Numerički primer koji se odnosi na koćeći padobran — određivanje vrednosti koeficijenta K_{f2}

U tabeli su prikazani rezultati dobijeni primenom algoritma aproksimativnog rezonovanja, tj. fuzzy logike, kao i procenjene vrednosti efikasnosti eks-

Tabela 1

Redni broj	o	v (m/s)	t (°C)	Efikasnost dobijena primenom fuzzy logike	Procenjena efikasnost od strane eksperta	Relativna greška
1.	5,0	1	5	0,36	0,37	0,03
2.	4,9	1	5	0,34	0,35	0,03
3.	4,8	1	5	0,33	0,33	0,00
4.	4,7	1	5	0,32	0,32	0,00
5.	4,6	1	5	0,31	0,30	0,03
6.	4,5	1	5	0,30	0,30	0,00
7.	4,3	1	5	0,28	0,28	0,00
8.	4,0	1	5	0,25	0,25	0,00
9.	3,7	1	5	0,22	0,23	0,04
10.	3,5	1	5	0,20	0,21	0,05
11.	3,2	1	5	0,18	0,19	0,05
12.	3,0	1	5	0,16	0,18	0,11
13.	2,8	1	5	0,16	0,17	0,06
14.	2,7	1	5	0,16	0,16	0,00
15.	2,5	1	5	0,16	0,15	0,07
16.	5,0	8	18	0,36	0,36	0,00
17.	4,8	8	18	0,32	0,36	0,11
18.	4,6	8	18	0,31	0,33	0,06
19.	4,5	8	18	0,30	0,32	0,06
20.	4,3	8	18	0,28	0,28	0,00
21.	4,0	8	18	0,26	0,26	0,00
22.	3,8	8	18	0,24	0,26	0,08
23.	3,5	8	18	0,22	0,23	0,04
24.	3,2	8	18	0,19	0,20	0,05
25.	2,8	8	18	0,16	0,17	0,06
26.	2,5	8	18	0,16	0,15	0,07
27.	5,0	12	28	0,35	0,38	0,08
28.	4,6	12	28	0,35	0,36	0,03
29.	4,0	12	28	0,35	0,32	0,09
30.	3,7	12	28	0,25	0,30	0,17
31.	3,5	12	28	0,24	0,27	0,11
32.	3,2	12	28	0,22	0,25	0,12
33.	3,0	12	28	0,17	0,21	0,19
34.	2,8	12	28	0,17	0,20	0,15
35.	2,5	12	28	0,17	0,19	0,11
36.	5,0	18	32	0,35	0,38	0,08
37.	4,6	18	32	0,35	0,36	0,03
38.	4,5	18	32	0,35	0,32	0,09
39.	4,4	18	32	0,35	0,30	0,17
40.	4,2	18	32	0,35	0,29	0,21
41.	3,8	18	32	0,29	0,26	0,12
42.	3,5	18	32	0,25	0,23	0,09
43.	3,2	18	32	0,20	0,21	0,05
44.	2,8	18	32	0,16	0,19	0,16
45.	2,5	18	32	0,16	0,16	0,00
46.	5,0	18	1	0,36	0,39	0,08
47.	2,5	1	34	0,16	0,15	0,07

Rezultati dobijeni primenom algoritma aproksimativnog rezonovanja i relativne greške njihovog poređenja sa procenom eksperata

perta (pilota). Na osnovu ovih vrednosti izračunate su relativne greške, a isto poređenje ilustrovano je na slici 14.

Na sličan način, primenom istih funkcija pripadnosti za fuzzy promenljive O, V i T i istih pravila, promenom samo funkcije pripadnosti fuzzy skupova za efikasnost E dobijeni su koefici-

Zamenjujući ove vrednosti u jednačinama (8) i (9) dobija se da je pouzdanost uređaja za kočenje:

— za slučaj normalnog kočenja $R_{nk \max} = 0,622$ i $R_{nk \min} = 0,613$,

— za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću $R_{abc \max} = 0,743$ i $R_{abc \min} = 0,645$.

Sl. 14 — Poređenje vrednosti efikasnosti dobijene primenom fuzzy logike i procenjenih vrednosti od strane eksperata

jenti za normalno kočenje ($K_{f6} = K_{f7} = 0,73—0,87$) i koeficijenti za pomoćno kočenje ($K_{f1} = 0,07—0,21$).

Da bi se uočili eventualni pozitivni efekti kvazi-paralelnih veza, pretpostavimo da je $R_1 = R_2 = R_3 \dots R_{17} = 0,95$, a za koeficijente K_f ćemo uzeti granične vrednosti (maksimalne i minimalne) i za te vrednosti izračunati funkcije pouzdanosti za oba slučaja kočenja. Ovo je hipotetička varijanta, jer se u realnoj situaciji teško mogu dogoditi sve negativne ili pozitivne okolnosti.

Granične vrednosti za koeficijente su:

$$K_{f1} = 0,07—0,21, K_{f2} = 0,16—0,36, \\ K_{f6} = K_{f7} = 0,73—0,87$$

Dobijena razlika nije beznačajna u korist pouzdanosti sistema za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću i sa maksimalnim koeficijentima. Ona bi sigurno bila i veća da se nije povećao broj elemenata sa 11 na 17 za slučaj kočenja sa povećanom pouzdanošću što je jedna od mana paralelnih sistema. Mala je razlika u pouzdanosti kad se radi sa minimalnim koeficijentima. U tom slučaju mala je efikasnost kvazi-paralelnih veza.

Zaključak

Na osnovu izvršene analize pouzdanosti rada sistema za zaustavljanje i automatsko kočenje borbenog aviona, za

slučajeve normalnog kočenja i kočenja sa povećanom pouzdanošću proizilazi:

— da je, s obzirom na složenu funkciju cilja koju ima ovaj sistem, a posebno sa stanovišta bezbednog izvršenja zadatka, opravdano razmatrati njegov rad za oba pomenuta slučaja,

— da je sistem pravilno koncipiran sa stanovišta pouzdanosti, gde je od posebnog značaja rešenje da se napaja hidrauličnom energijom iz dva nezavisna sistema (osnovnog i komandnog) i da je postavljanjem elemenata u kvazi-redne i kvazi-paralelne veze obezbeđena značajna pouzdanost u radu. Dobivene verovatnoće izvršenja zadatka u jednom i drugom slučaju to i potvrđuju.

Za određivanje koeficijenata pogoršanja performansi po prvi put je isko-

rišćena fuzzy logika, čime su izbegnuta skupa i dugotrajna ispitivanja, koja bi mogla nepovoljno uticati i na bezbednost izvršenja zadatka, a stvoren je jedan ekspertski sistem koji se dalje može koristiti po potrebi.

Kao sledeći korak ka proširenju ovog rada, potrebno je izvršiti analizu rada sistema bez otkaza i sa otkazom pojedinih elemenata, pa na osnovu tako oblikovane šeme odrediti funkciju pouzdanosti sistema. Na taj način bi se pokazala potreba za eventualnim uvođenjem i drugih kvazi-rednih i kvazi-paralelnih veza ili povećanja njihove efikasnosti, što bi imalo pozitivnog uticaja na povećanje pouzdanosti sistema.

Literatura:

- [1] Ž. Adamović: LOGISTIČKI SISTEM ODRŽAVANJA, Privredni pregled, Beograd, 1989.
- [2] E. J. Barzilović, i grupa autora: NADEŽNOST AVIACIONIH SISTEM, Visšaja škola, Moskva, 1982.
- [3] G. Ivanović, D. Stanivuković: POUZDANOST, Tehnička uprava SSNO, 1988.
- [4] G. Ivanović, D. Stanivuković: POUZDANOST TEHNIČKIH SISTEMA, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1983.
- [5] A. Kaufmann, M. Gupta: INTRODUCTION TO FUZZY ARITHMETIC, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985.
- [6] S. Muždeka: LOGISTIKA, Institut za nuklearne nauke — Vinča, Vinča, 1981.
- [7] R. Petrović: FUZZY SKUPOVI I FUZZY LOGIKA U ANALIZI POUZDANOSTI, naučni skup »Efektivnosti sistema i logistika«, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [8] D. Teodorović, S. Kikuchi: FUZZY SKUPOVI I PRIMENE U SAOBRAĆAJU, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, 1991.
- [9] L. I. Volkov, A. M. Šišković: NADEŽNOST LETATELNIH APARATOV, Visšaja škola, Moskva, 1975.
- [10] VTU, VAZDUHOPLOVNO TEHNIČKO UPUSTVO ZA KONKRETNI AVION, VTU, 1991.
- [11] N. Vujanović: TEORIJA POUZDANOSTI TEHNIČKIH SISTEMA, Vojnoizdavački centar, Beograd, 1990.
- [12] D. Zelenović, J. Todorović: EFEKTIVNOST SISTEMA U MAŠINSTVU, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [13] M. Živaljević: POUZDANOST SISTEMA ZA ZAUSTAVLJANJE I AUTOMATSKO KOČENJE BORBENOG AVIONA, SYM-OP-IS '94, Kotor, 1994.