Mr Nenad Parčina,
major, dipl. inž.,
Dr Rifat Ramović,
profesor, dipl. inž.

Povećanje raspoloživosti elektronskog sistema savremenih letelica integrisanjem sistema i primenom optičkog vlakna kao magistrale za prenos podataka

U radu je prikazano kako način izvođenja veza za prenos podataka između pojedinih delova elektronskog sistema utiče na raspoloživost veza i raspoloživost elektronskog sistema u savremenim borbenim avionima. Analiziran je uticaj elektromagnetske interferencije na raspoloživost žičane magistrale za prenos podataka i na raspoloživost elektronskog sistema. Na osnovu prezentiranih matematičkih modela razrađeni su algoritmi i izvršen numerički proračun kvantitativnih pokazatelja.

Uvod

Savremene borbene letelice ostvaruju kompletnu koordinaciju i kontrolu svih operacija pomoću kompleksnog integrisanog sistema koji se sastoji od [1,2,3] : elektronske opreme, sistema letelica, sistema upravljanja borbenim

Modeli za povećanje raspoloživosti elektronskog sistema izborom sistema veza

Pouzdanost posmatranog sistema može se izraziti generalnim matematičkim modelom:

$$\begin{aligned} \text{sistema:} \quad R_{sz}(t) &= R_s(t) = \leq f(R_1(t), \dots, R_N(t)) \\ \text{podсистема:} \quad R_i(t) &= f_i(R_{i1}(t), \dots, R_{im}(t)) \\ \text{sklopa:} \quad R_{ij}(t) &= f_{ij}(R_{ij1}(t), \dots, R_{ijp}(t)) \\ \text{podsklopa:} \quad R_{ijk}(t) &= f_{ijk}(R_{ijk1}(t), \dots, R_{ijkq}(t)) \end{aligned}$$

sredstvima, električnih komandi leta i integrisane pilotske kabine.

Radi povećanja raspoloživosti, boljeg međusobnog povezivanja uređaja i smanjenja ukupne težine, diskretne provodne veze između pojedinih uređaja se kod savremenih aviona zamenjuju magistralama za prenos podataka. Način povezivanja uređaja integrisanog elektronskog sistema, pomoću rednog vezivanja na magistrale, sa tri magistrale (magistrala upravljanja letom, magistrala zadatka — misije, magistrala naoružanja obrađen je u literaturi [1].

Pri analizi pouzdanosti ovakvih elektronskih sistema polazi se od postupka alokacije pouzdanosti svakog sastavnog dela, preko uređaja i podsistema, pa do kompletnog sistema [4].

Pod pretpostavkom eksponencijalne raspodele otkaza i redne veze elemenata aviona za alokaciju pouzdanosti, prema metodu M-1, može se izvršiti i procena parametara E , τ , i n za sisteme, podsisteme, sklopove, podsklopove.

Tabela

SISTEM	Br. delova (n)	Odnos vremena rada (T)	Faktor (E) značajnosti	Intenzitet otkaza (A) (u 10 ⁻⁶ čas ⁻¹)
AVION				78.74
01. Znač aviona	2491	1.0	1.0	7.87
02. Motor (pog. gr.)	2217	1.0	1.0	6.91
03. Stejni organ	1017	0.1	1.0	32.99
04. Sistem za napaj motora gorivom	647	1.0	1.0	2.78
05. Hidrosistem	1431	1.0	1.0	1.89
06. ELEKTRONSKI SIST.	2323	1.0	1.0	7.21
07. ELEKTROOPREMA I INDIKATORI	2489	1.0	1.0	5.78
08. OPREMA NAORUŽANJA	303	0.3	1.0	4.30
09. Komande aviona	978	1.0	1.0	0.84
10. Ključna oprema	262	1.0	1.0	1.89
11. Vazdušni sistem	555	1.0	1.0	4.07

ve i delove, a podaci su prikazani u tabeli (za avion MIRAGE-2000) [4].

Na osnovu podataka je očigledno da za avione sa pouzdanošću $R=0.955$, uz eksponencijalnu raspodelu otkaza, pouzdanost delova mora biti veća od pouzdanosti aviona i to za oko 1.047 puta. Iz odnosa intenziteta otkaza aviona i intenziteta otkaza elektronskih sistema aviona:

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_{oe}} = \frac{76.74}{7.21}$$

uočava se da za više od deset puta mora biti manji intenzitet otkaza elektronskih sistema od intenziteta otkaza aviona.

S obzirom na obimnost posla oko proračuna elemenata pouzdanosti, danas se koriste razni programski paketi koji to olakšavaju, a jedan od njih je i paket za analizu pouzdanosti složenih sistema (APSS) koji je korišten u ovom radu. Kod njega se putem stabla otkaza sistema predstavlja struktura sistema sa stanovišta pouzdanosti, a dekompozicija sistema se vrši do elementarne jedinice — modula koja se opisuje funkcijom pouzdanosti ili intenzitetom otkaza i raspodelom vremena do otkaza modula.

U radu su analizirane sledeće konfiguracije:

— prenos podataka neintegrisanog sistema putem većeg broja veza;

— tri magistrale u rednoj vezi sa ostalim elementima integrisanih elektronskih sistema;

— tri redundovane magistrale u rednoj vezi sa elementima integrisanih elektronskih sistema.

Kada je problem raspoloživosti elektronskog sistema razmatran kod neintegrisanog sistema, uzeto je da računar zadatka i generisanja simbola komunicira sa svim ostalim elementima sistema, a otkaz svakog elementa sistema izaziva otkaz celog sistema. S obzirom na to, sistem se prikazuje red-

nom vezom, pri čemu je pouzdanost jedne veze između dva elementa sistema jednaka pouzdanosti magistrale,

$$\lambda_m = 10^{-6} \Rightarrow R_m = e^{-\lambda_m t} = 0.99957518$$

Proračun se vrši za misiju u trajanju od 600 časova, traži se projektovana pouzdanost aviona od $R=0.955$, odnosno intenzitet otkaza aviona $\lambda = 76.74 \cdot 10^{-6} \text{ čas}^{-1}$, pa se prema tabeli uzima intenzitet otkaza elektronskih sistema:

$$\lambda_{oe} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ čas}^{-1} \Rightarrow R_{eo} = e^{-\lambda_{oe} t} = 0.999660057$$

Na osnovu šeme se dobija da je ukupna pouzdanost:

$$R = (R_m)^3 R_{eo} = 0.998386564$$

Intenziteti opravke u idealnim slučajevima, kada je $A=R$, nalaze se iz:

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \Rightarrow \mu = \frac{\lambda A}{1 - A} = \frac{\lambda R}{1 - R} \text{ pri čemu je tada}$$

$$\mu_{mid} = 1.66616 \cdot 10^{-3} \quad \mu_{eoid} = 0.049991383$$

Na osnovu ovoga ukupna raspoloživost teoretski posmatrano:

$$A = (A_m)^3 A_{eo} = R = 0.998386564$$

Međutim, pošto je realno $A < R$, to treba uzeti neke realnije vrednosti parametara. S obzirom na broj veza vrednosti $\lambda_m = 8 \cdot 10^{-6} \text{ čas}^{-1}$

$$\mu_m = 9.9 \cdot 10^{-5} \Rightarrow A_m = 0.925$$

$$\mu_{eo} = 8.33 \cdot 10^{-4} \Rightarrow A_{eo} = 0.98$$

Na osnovu toga, ukupna raspoloživost bi bila:

$$A = (A_m)^3 A_{eo} = 0.785662406$$

Sa dijagrama (sl. 3) uočava se da je raspoloživost neintegrisanog elektronskog sistema sa velikim brojem individualnih veza izuzetno niska $A=0.785$,

odstupa od teoretski izračunate vrednosti i obara raspoloživost aviona kao celine.

Sl. 1 — Šema veza integrisanog sistema sa tri magistrale i odgovarajuće stablo otkaza

Posmatra li se sistem integrisane elektronske opreme koji se integriše sa tri magistrale i u proračune unesu sledeće vrednosti parametara:

$$\lambda_m = 10^{-6} \Rightarrow R_m = e^{-\lambda_m t} = 0.99957518$$

$$\mu_m = 9.9 \cdot 10^{-5} \Rightarrow A_m = 0.99$$

$$\mu_{eo} = 8.33 \cdot 10^{-4} \Rightarrow A_{eo} = 0.98$$

ukupna raspoloživost bi bila:

$$A = (A_m)^3 A_{eo} = 0.95089302,$$

što je još uvek daleko od proračunate potrebne vrednosti od 0.998386564. S obzirom na to da nema mogućnosti da se poveća parametar μ , to će se preko redundovanja magistrala pokušati povećati raspoloživost, pri čemu treba napomenuti da se sa redundovanjem može ići do granice dok se njime popravljiva raspoloživost sistema, a da istovremeno sistem ne postane toliko složen da unese nepouzdanost.

Za sistem sa tri redundovane magistrale raspoloživost je dostigla svoju maksimalnu vrednost od $A = 0.9971187$,

Sl. 2 — Šema veza integrisanog sistema sa tri redundovane magistrale i odgovarajuće stablo otkaza

Sl. 3 — Raspoloživost neintegrisanog elektronskog sistema, te integrisanih sistema sa tri magistrale i sa tri redundovane magistrale

koja, međutim, još nije dostigla i vrednost koja zadovoljava postavljeni uslov $A=R$.

Gornji proračun urađen je za žičanu magistralu posmatranu u idealnim uslovima, kada nema spoljnih uticaja na prenos podataka. Međutim, stvarnost je umnogome različita, pa je zato izvršeno modeliranje uticaja smetnji na prenos podataka žičanom magistralom. Za potrebe proračuna korisne su konkretne vrednosti za magistrale prema američkom vojnom standardu MIL-STD-1553 ([5,6] i vrednosti uticaja elektromagnetske interferencije dostupne iz literature [7,8,9]).

Pretpostavljeno je da elektromagnetske interferencije na avionu nastaju uglavnom od: linije napajanja frekvencije 400 Hz, radio-frekvencija, električnih prelaznih režima, trenutnih prekida magistrale za napajanje, elektro-

koji deluje na susedna kola. Napon je sa trajanjem ciklusa 2,5 ms, sa vremenom porasta od 625 mikrosekundi, a pozitivno vreme uspona se ponavlja svakih 2,5 ms. Linija napajanja od 400 Hz magnetskog polja izaziva efekat niske frekvencije u analognim kolima ili radnim pojačavačima i deluje sa 400 mV. Linija napajanja od 400 Hz električnog polja ima iste efekte i deluje naponom od oko 1000 V, sa strujom manjom od 1 mA. Uticaj smetnji linije napajanja 400 Hz, može se smanjiti pravilnim projektovanjem linija.

Signali radio-frekvencije dolaze od takta avionskog mikroprocesora i signala parazitnog šuma regulatora prekidanja, od HF-VHF avionske komunikacije, HF-VHF televizije i FM radio-stanica, a provlače se kroz kondenzatore i diode vezane na izvore napajanja, a na štampanim pločama prelaze sa traga na trag. Ovi RF signali indukuju slab napon od 1 V i slabu struju od oko 100 mA i to u vidu kontinualnog signala. Iz razmatranja su isključeni uticaji namereno postavljenih smetnji u opsegu radio-frekvencija od strane neprijatelja.

Poseban problem su prelazni režimi, koji nastaju kao posledica elektrostatičkog pražnjenja, munje ili induktivnih prelaznih režima usled prekidanja linije napajanja — naponske vrednosti dostižu red hiljadu volti.

Prelazni režim električnog prekidanja indukovani relejem — induktivno prekidanje, ima prigušenu sinusnu frekvenciju od 10 MHz sa učestanošću od 1 MHz i trajanjem od oko 1000 mikrosekundi sa ponavljanjem svake dve sekunde. Vrednost napona oko 600 V, struja reda 1—2 ampera.

Elektrostatičko pražnjenje je vrlo brz događaj trajanja 100 ns sa mogućnošću ponavljanja za 4 do 5 sekundi, koliko je potrebno za ponovno punjenje letelice koja nosi elektrostatski naboj. Pražnjenje deluje visokonaponskim impulsom reda 10 kV, velikim struja-

Sl. 4 — Osnovni i specifični izvori elektromagnetske interferencije na avionu

magnetskih impulsa nuklearnih eksplozija. Pored stalnih uticaja, ima i onih koji se povremeno pojavljuju i predstavljaju različit nivo opasnosti za prenos podataka, a time i za sigurnost letelice.

Linija napajanja svojim naponom frekvencije 400 Hz stvara napon šuma

ma, ali kratkim trajanjem, što može dovesti do dielektričnog probijanja izolacije.

Prelazni režim munje traje oko 10 ms ili duže, a kosinusno prigušena frekvencija od 1 MHz do 7 MHz, napona 600 V sa kratkim vremenom trajanja prednje ivice od 100 ms uspostavlja električnu rezonanciju duž aviona koja se prigušuje u toku nekoliko mikrosekundi. Ona se može ponavljati više puta kroz višestruke udare — pri čemu ukupan bljesak munje može trajati i celu sekundu. Pored toga, udar groma deluje i sa velikom strujom od oko 200 A i mnogo većom energijom koja lako može oštetiti ili uništiti elektronske komponente.

Trenutni prekidi linije napajanja, što se naziva prelaznim režimom »prekidanja linije«, unose promene snage tokom najviše 50 ms prilikom prebaci-

Elektromagnetni impulsi egzoatmosferskih nuklearnih eksplozija, ukupne energije reda megatona, mogu da pokriju površinu od preko 15 miliona kvadratnih kilometara, sa maksimalnom jačinom električnog polja do 50 kW/m, vremenom porasta od 3 ns do 10 ns i trajanjem od 0,4 μ s do oko 1,5 μ s. Tako nastalo jonizovano i električki provodno područje veoma je opasno za letelice koje se u njemu nađu.

Uticaj elektromagnetske interferencije na elektronske sisteme aviona zavisi od konstrukcije žičane magistrale — dakle od konstrukcije provodnika signala koji preko svojih fizičkih uslova (dimenzije, uzemljenje, povratni vodovi, zaštite, veze zaštite, odvajanja i dužina žice) i drugih osobina (metali, dielektrici, otpornost, induktivnost, kapacitivnost, impedansa i nelinearni efekti) određuju uticaj interferencije.

Sl. 5 — Dijagram vrednosti naponskih smetnji koje se javljaju usled različitih elektromagnetskih interferencija na različitim tipovima provodnika.

vanja izvora napajanja sa zemaljskog na motorni generator, ili sa jednog motornog generatora na drugi.

U praksi se koriste različiti sistemi žica za prenos podataka: jedan vod sa povratnom vezom preko konstrukcije

aviona, upredene parice radi minimalne indukcije magnetnog polja, ekrani-zirane upredene parice, balansirani izolovani projekat žičane magistrale za minimalnu zajedničku impedansu i kod svih se uticaj EMI razlikuje, što se vidi sa slike 6.

Mogući uzroci neispravnog rada magistrale — pogrešnog prenosa podataka mogu se modelirati tako što se pojavljivanje smetnje koja je dovoljnog intenziteta da ošteti informaciju, koja je trenutno na magistrali, modelira kvarom, dok se trajanje smetnje može modelirati vremenom koje bi bilo potrebno za popravku.

Treba napomenuti da pri određivanju vrednosti intenziteta otkaza (odnosno učestanosti pojavljivanja smetnje u ovom slučaju), kao i visine naponskog nivoa koji je dovoljan da izvrši oštećenje informacije na magistrali, treba voditi računa o smetnjama koje su stalno prisutne i koje su posledica karakteristika samog sistema.

Sl. 6 — Dijagram modela uticaja elektromagnetskih smetnji na žičanu magistralu 1553

Pri izračunavanju je uvedeno ograničenje da sve raspodele kvarova i popravke imaju eksponencijalnu raspodelu u vremenu, a modeliranje i proračun su izvedeni na programskom paketu za analizu pouzdanosti složenih sistema (APSS).

Model Markova koji opisuje uticaj elektromagnetskih smetnji na žičanu magistralu, izvedenu prema američkom standardu 1553, prikazan je na slici 6. Ulazni podaci za magistralu i smetnje korišteni su iz dostupne literature, a prelazak u neispravno stanje — »kvar« izazivaju samo uparene smetnje, dakle istovremeno pojavljivanje najmanje dve smetnje. Sa modela se uočava da ovaj sistem ima tri ispravna radna stanja koja se međusobno razlikuju na osnovu osetljivosti na grešku.

Model Markova, koji je izveden za analizu uticaja elektromagnetske interferencije na prenos podataka žičanom magistralom, poslužio je za proračune raspoloživosti u dva odvojena slučaja — prvo, normalnih radnih uslova, i drugo, uslova u kojima se javlja velika verovatnoća udara groma.

U prvom slučaju, kada su proračuni izvedeni za normalne uslove pojavljivanja smetnji i prosečan udar groma od 1/2100 časova leta [10] daje raspoloživost žičane magistrale od $A_m = 0.97513410$, što, uz nepromenenu vrednost raspoloživosti elektronskih delova sistema $A_{eo} = 0.9996600$, daje ukupnu raspoloživost elektronskog sistema

Sl. 7 — Raspoloživost integrisanog elektronskog sistema sa tri redundovane magistrale u uslovima bez smetnji, u realnim radnim uslovima i u uslovima velike verovatnoće udara groma

aviona $A=0.926829$. Ova realna raspoloživost elektronskog sistema integrisanog sa žičanim magistralama podataka daleko je od raspoloživosti u idealnim uslovima i daleko od potrebne projektovane raspoloživosti za avion.

Proračun izveden na istom modelu za uslove u kojima postoji velika verovatnoća udara groma daje raspoloživost magistrale $A_m=0.879808$, a raspoloživost celog integrisanog elektronskog sistema iznosi $A=0.680795$. Uočava se da pri povećanoj učestanosti udara groma (što služi kao model realnog okruženja za dejstvo aviona pri lošim vremenskim uslovima, kada je udar groma veoma verovatan) raspoloživost magistrale, pa i celog sistema pada tako da je delovanje pilota veoma otežano. Taj problem se ne pojavljuje kod komunikacionih sistema sa optičkom magistralom.

Treba naglasiti da u postupku modeliranja nisu uzete u obzir smetnje koje potiču od elektromagnetskog impulsa nuklearne eksplozije, s obzirom na to da je u vreme delovanja smetnje magistrala neupotrebljiva za prenos podataka, a istovremeno se ponaša kao prijemna antena, tako da pojačava dejstvo EMINE i izaziva oštećenja ostalih komponenata komunikacionog sistema. Može se zaključiti da u savremenim uslovima, kada postoji realna opasnost od upotrebe nuklearnog naoružanja, upotreba magistrale sa optičkim vlaknom postaje neophodna.

Poznato je da elektromagnetski talasi ne utiču na informacije koje se prenose putem optičkih kablova, što se vidi i sa slike 5. Iako u ovom radu nisu modelirani uticaji elektromagnetskih smetnji koje potiču od namernih ometajućih dejstava protivnika, može se veoma lako zaključiti da bi raspoloživost žičanih magistrala u slučaju pojave još jedne smetnje bila još niža, dok bi, nasuprot tome, komunikacioni sistem sa optičkom magistralom kao prenosnim medijumom imao nepromenjen raspoloživost.

Ukoliko se za magistralu izvedenu od optičkog vlakna u proračun unesu podaci:

$$\lambda_0=10^{-10} \Rightarrow R_0=e^{-\lambda_0 t}=0.999999998$$

a za komponente elektronskog sistema ostanu isti parametri, tada je raspoloživost celog integrisanog elektronskog sistema sa magistralom izvedenom od optičkog vlakna $A=0.999660051$.

Da bi se smanjila mogućnost prekida prenosa podataka zbog fizičkog prekida magistrale, vrši se njeno redundovanje, pa se i na taj način povećava njena raspoloživost. Nakon proračuna raspoloživosti u uslovima redundovanja dolazi se do rezultata za raspoloživost integrisanog elektronskog sistema $A=0.999999999$.

Oba ova rezultata imaju vrednost veću od tražene 0.998386564, pa bi, shodno tome, uticali na porast raspoloživosti aviona kao celine i popravljali projektovanu vrednost od 0.955, što naročito dolazi do izražaja kada se uporede rezultati u uslovima eksploatacije magistrala u normalnoj radnoj sredini u kojoj deluje elektromagnetna interferencija.

Sl. 8 — Raspoloživost integrisanog elektronskog sistema u realnim radnim uslovima: sa tri redundovane magistrale, sa optičkom magistralom i sa tri optičke redundovane magistrale

Pored toga, upotreba optičke magistrale otvara mogućnosti za mnogo brži protok informacija [11,12], s obzirom na to da realno ograničenje na klasičnim magistralama predstavlja veličina naponskih nivoa, koji onemogućavaju bržu komunikaciju, ali su neophodni kao prvostepena zaštita od spoljašnjih smetnji.

Zaključak

Na osnovu izloženog moguće je zaključiti sledeće: neintegrisani elektronski sistemi sa slobodnim vezama, pored ostalih loših osobina, imaju nepovoljan uticaj na raspoloživost elektronskih sistema aviona, te je integrisani sistem sa magistralama daleko bolje rešenje za prenos podataka. Pri ovim razmatranjima uzeto je da je raspoloživost elektronskih delova sistema (EO) konstantna, što je omogućavalo komparaciju sistema.

U analizi nije uzeto u obzir izvesno usložavanje elektronskih sistema usled redundovanja magistrala. Iz ovde prikazanih rezultata može se sagledati

da je neophodno redundovati sve tri magistrale da bi se raspoloživost sistema približila izraženim vrednostima.

Sve veća upotreba kompozitnih materijala pri projektovanju i izgradnji savremenih borbenih aviona postavlja ozbiljan problem izbora magistrale podataka.

Na osnovu dobijenih rezultata se zaključuje da rad magistrale u normalnim uslovima elektromagnetske interferencije, uz moguću upotrebu nuklearnog naoružanja, kao i u uslovima prisutnog namernog elektromagnetskog ometanja od strane protivnika, nameće optičku magistralu kao jedini prihvatljiv medijum za komunikaciju u integrisanom elektronskom sistemu aviona. Eventualna potreba za povećanjem brzine komunikacije unutar aviona, takođe, nameće neophodnost izbora optičke magistrale.

Pored veće raspoloživosti koja se dobija upotrebom magistrale sa optičkim vlaknom, ostvaruje se smanjenje ukupne mase sistema, a time se direktno popravljaju letne sposobnosti aviona i njegove borbene performanse.

Literatura:

- [1] N. Parčina: »Integracija avionskih sistema na savremenom borbenom avionu«, Glasnik RV i PVO, br. 8/91.
- [2] B. C. Wheeler: »Modern american fighters and attack aircraft«, London, Salamander book, 1980.
- [3] B. Gunston: »Modern air combat«, London, Salamander book, 1983.
- [4] G. Ivanović, P. Todorović: »Alokacija pouzdanosti u projektovanju borbenog aviona«, Glasnik RV i PVO br. 3/91.
- [5] D. C. Pinkowitz: »MIL-STD-1553 The military standard for avionics integration«, DDC Application Notes; № 26; March 1984.
- [6] DDC : »MIL-STD-1553 Designer's guide«.
- [7] C. A. Clark: »Avionics electromagnetic interference immunity and environment«, IEEE; № 8; 1986.
- [8] A. Lockyer: »Electromagnetic compatibility modeling for future avionics systems«, IEEE; № 9; 1986.
- [9] Eismín: »Aircraft electricity and electronics«, McGraw Hill; New York; 1989.
- [10] J. Taillet: »Protection des aeronefs contre la foudre«, L'Aeronautique et L'Astronautique; N-92; feb. 1982.
- [11] D. R. Morgan: »Pave Pace: System avionics for the 21th century«, IEEE AES Magazine; January 1989.
- [12] M. Relis: »Military Avionics LANs Point Toward Fiber Optics«, Defense electronic; № 47; Oct 1983.
- [13] VTI Zarkovo, B. Kidrič — Vinča, »Elaborat — Analiza pouzdanosti složenih sistema«, Beograd, 1987.