

ANALIZA POUZDANOSTI RAZNIH ARHITEKTURA INERCIJALNOG MERNOG BLOKA

UDC: 629.7.052.004.15 : 527

Rezime:

Najvažniji i po dimenziji najveći deo inercijalnog navigacijskog sistema (INS) predstavlja inercijalni merni blok (IMB). U članku se analizira pouzdanost pet mogućih arhitektura IMB sa stanovišta pouzdanosti pojedinih komponenti (senzora-žiroskopa i akcelerometara, procesora, unutrašnje i spoljašnje magistrale podataka, bloka za napajanje, generatora taktnih impulsa i programabilnih brojača), njihovom pojedinačnom doprinosu smanjenju pouzdanosti IMB i primene redundanse tih komponenti radi povećanja pouzdanosti IMB.

Ključne reči: inercijalni navigacijski sistem, inercijalni merni blok, analiza pouzdanosti, redundovani senzori.

RELIABILITY ANALYSIS OF MISCELLANEOUS ARCHITECTURES OF THE INERTIAL MEASUREMENT UNIT

Summary:

The most important and utmost per dimension unit of the inertial navigation sistem (INS) is the inertial measurement unit (IMU). This paper analyzes reliability of five possible IMU architectures from the point of view of particular system components reliability (sensor-gyro and accelerometer, processor, internal and external data bus, power supply, clock function and programmable counters), their individual contribution to of reliability decreasing IMU and implementation redundancy of this system components in order to increase IMU reliability.

Key words: Inertial navigation system, inertial measurement unit, reliability analysis, redundant sensors.

Uvod

Vojni vazduhoplovi zahtevaju pouzdane i tačne podatke, a jedan od najvažnijih sistema na avionu je INS, jer njegove izlazne podatke koriste drugi sistemi: radar, autopilot, prikazivači u kabini – HUD (Head Up Display), HDD (Head Down Display), nadšlemni sistem HMD (Helmet Mounted Display), sistem nao-

ružanja, itd. Poznato je da je glavna prednost INS-a nad drugim navigacijskim sistemima u njegovoj autonomnosti, odnosno nezavisnosti od drugih sistema na avionu i na zemlji.

Iskustvo u radu prvih INS-a, čija je arhitektura IMB bila u obliku triade (ose tri žiroskopa i tri akcelerometra su orijentisane u pravcu avionskih osa), pokazalo je da od svih delova INS najmanju pou-

zdanost ima IMB. U slučaju otkaza bilo kog žiroskopa ili akcelerometra, INS je gubio svoju funkciju. Zato se posebna pažnja poklanjala analizi pouzdanosti raznih arhitektura IMB sa stanovišta njegovog kontinualnog rada i posle otkaza redundantnih komponenti (FT – Fault Tolerance).

Mnogi proizvođači INS-a su duži period tragali za najpogodnijom arhitekturom IMB sa stanovišta pouzdanosti. U razvojnim fazama pojavile su se sledeće arhitekture IMB [7], [8]:

- dvostruka tetrada, razvijana u firmi Honeywell/Litton i primenjena u avionu ATF;

- dvostruka konusna ortogonalna triada (heksada), razvijana u firmi Honeywell;

- trostruka ortogonalna triada, primenjena u avionu Boeing 757/767.

U ovom članku analizirane su razne arhitekture IMB sa stanovišta pouzdanosti i izvršeno je njihovo upoređenje sa klasičnim, prvim IMB u obliku triade.

Rezultati prikazani na slikama 2, 5, 8, 9, 10 i 11 dobijeni su simulacijom u programu Mathcad 7 Professional na računaru PC II, u kojoj je primenjena analitička metoda ispitivanja pouzdanosti pojedinih arhitektura IMB i poklapaju se sa rezultatima datim u [1], [7] i [8].

Pretpostavljeno je da su iste komponente IMB korišćene u svim analiziranim arhitekturama IMB, kao i da je pouzdanost pojedinih komponenti zasnovana na njihovom konstantnom intenzitetu otkaza, odnosno eksponencijalnoj raspodeli otkaza.

U zaključku je predložena optimalna arhitektura IMB sa stanovišta pouzdanosti.

Intenzitet otkaza IMB i njegovih komponenti

U [7] i [8] predloženo je da se IMB sastoji od osam komponenti: kanala žiroskopa, kanala akcelerometra, unutrašnje magistrale podataka, spoljašnje magistrale podataka, kanala procesora, bloka za napajanje, generatora taktnih impulsa i programabilnih brojača.

Povećanje pouzdanosti IMB postiže se redundantovanjem (rezerviranjem) pojedinih komponenti. Ovim se postiže da IMB može kontinualno da nastavi rad i nakon otkaza redundantovanih komponenti. Redundovanje kanala žiroskopa i akcelerometara, kao najnepouzdanijih komponenti, najčešće se koristi da bi se obezbedila FT osobina.

Kada je intenzitet otkaza, λ , komponenti i sistema konstantan, za period normalne eksploatacije, pouzdanost komponenti odnosno sistema data je formulom:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{m}} \quad (1)$$

gde je:

λ – intenzitet otkaza,

m – srednje vreme rada između otkaza komponenti odnosno sistema,

t – vreme.

Intenziteti otkaza svih komponenti IMB preuzeti su iz [1], gde su izračunati na osnovu pouzdanosti raznih mašinskih i elektronskih elemenata i delova, koji čine komponente IMB, datih u priručniku MIL-HDBK-217E. Pošto komponente mogu raditi u vazдушnom prostoru pod raznim uslovima, različiti su i intenziteti njihovog otkaza. Zbog pojednostavljenja računanja i obima rada, pri proračunu

Intenzitet otkaza komponenti IMB

Komponente IMB	Broj otkaza na milion časova rada	Napomena
Laserski žiroskop	2,7	Kanal žiroskopa
Pobuda žiroskopa	0,2	
Elektronika žiroskopa	0,4	
A/D RAM	0,3	
A/D konvertor	0,2	
Sklop za visoki napon	0,4	
Ukupno	4,2	
Akcelometar	1,2	Kanal akcelometra
Elektronika akcelometra	0,3	
A/D RAM	0,3	
A/D pretvarač	0,2	
Sklop za niski napon	0,6	
Ukupno	2,6	
Modul I/O	0,5	Unutrašnja magistrala podataka
Analogni transorb.	0,2	
Digitalni transorb.	0,1	
Ukupno	0,8	
1553B magistrala podataka	1,7	Spoljašnja magistrala podataka
Procesor	2,6	Kanal procesora
Blok za niski napon	0,6	
Ukupno	3,2	
Blok za napajanje	1,9	
Sat (Clock)	0,1	
Programabilni brojači	1,0	

pouzdanosti IMB i njegovih komponenti sve vrednosti intenziteta su prikazane za uslove rada na zemlji.

Nakon testiranja (14 000 000 radnih sati) laserskog žiroskopa (RLG) tipa GG1342 firme Honeywell, izračunato je da srednje vreme između otkaza (MTBF) iznosi 227 000 časova. Koristeći faktor 1,6 poboljšanja u uslovima rada na zemlji, MTBF je 365 000 časova, pa je dobijeno da je intenzitet otkaza ovog žiroskopa 2,7 otkaza/milion sati rada.

Za akcelometar ser. br. 34079318 firme Honeywell proračunato je da je MTBF 838 644 časova, a u uslovima rada na zemlji intenzitet otkaza treba da bude 1,2 otkaza/milion časova rada.

Intenziteti otkaza ostalih komponenti IMB prikazani su u tabeli 1.

Modeli pouzdanosti komponenti IMB

Pouzdanost bloka za napajanje

Pretpostavićemo da je blok za napajanje rezervisan – čine ga dva bloka, koji u smislu pouzdanosti čine paralelnu konfiguraciju, pa je njegova pouzdanost data formulom:

$$R_{2bn} = 1 - (1 - R_{bn})^2 = R_{bn}^2 + 2R_{bn}(1 - R_{bn}) \quad (2)$$

gde je R_{bn} – pouzdanost jednog bloka za napajanje.

Pouzdanost dve paralelne unutrašnje magistrale

Analogno pouzdanosti bloka za napajanje, pouzdanost dve paralelne unutrašnje magistrale podataka je:

$$R_{2um} = R_{um}^2 + 2R_{um}(1 - R_{um}) \quad (3)$$

gde je R_{um} – pouzdanost jedne unutrašnje magistrale podataka.

Pouzdanost dve paralelne spoljašnje magistrale

Pretpostavićemo da je pouzdanost dve paralelne spoljašnje magistrale podataka (1553B):

$$R_{2sm} = R_{sm}^2 + 2R_{sm}(1 - R_{sm}) \quad (4)$$

gde je R_{sm} – pouzdanost jedne spoljašnje magistrale podataka.

Pouzdanost programabilnih brojača

Programabilni brojači generišu vremenske signale koje koriste senzori radi sinhronizacije svojih izlaznih signala. Najmanje su potrebna dva brojača radi sinhronizacije izlaznih podataka od senzora.

Pouzdanost sinhronizacije sa tri brojača, koji su rezervisani po modelu „2 od 3“ prema [9] je:

$$R_{3pb} = R_{pb}^3 + 3R_{pb}^2(1 - R_{pb}) \quad (5)$$

gde je R_{pb} – pouzdanost jednog programabilnog brojača.

Pouzdanost sinhronizacije sa četiri brojača, od kojih dva treba pouzdano da rade, prema modelu „2 od 4“ [9] iznosi:

$$R_{4pb} = R_{pb}^4 + 4R_{pb}^3(1 - R_{pb}) + 6R_{pb}^2(1 - R_{pb})^2 \quad (6)$$

Pouzdanost proverom parnosti

Radi obezbeđivanja FT procesiranja signala od senzora sa dva procesora primenjuje se provera, pomoću programabilnih brojača, njihovih izlaznih signala metodom parnosti, skr. SCP (self-checking pair), radi utvrđivanja slaganja njihovih izlaznih signala bit-to-bit.

Bilo kakvo neslaganje prouzrokuje izbacivanje oba procesora iz sistema.

Sistem za utvrđivanje otkaza, ili FOS (fail-operational system), formira se od dva nezavisna kola za proveru parnosti (SCP) ili ukupno od četiri procesora. Analogno tome, udvostručeni FOS može se sačiniti od tri SCP ili ukupno od šest procesora.

Hardver od dva SCP izvršiće svoju funkciju bez otkaza procesora ili otkaza bilo kojeg procesora pojedinačno. Takođe, izvršiće funkciju ako otkazu dva procesora koji rade u paru. Tada je pouzdanost sa dva SCP data modelom „2 od 4“, [9]:

$$R_{2scp} = R_{pr}^4 + 4R_{pr}^3(1 - R_{pr}) + 2R_{pr}^2(1 - R_{pr})^2 \quad (7)$$

gde je R_{pr} – pouzdanost jednog procesora.

Pouzdanost hardvera od tri SCP je tada:

$$R_{3scp} = R_{pr}^6 + 6R_{pr}^5(1 - R_{pr}) + 15R_{pr}^4(1 - R_{pr})^2 + 12R_{pr}^3(1 - R_{pr})^3 + 3R_{pr}^2(1 - R_{pr})^4 \quad (8)$$

gde je $\binom{6}{5} = 6, \binom{6}{4} = 15, 3\binom{4}{3} = 12$ i $\binom{3}{2} = 3$

Pouzdanost redundovanih senzora

Za merenje inercijalnih brzina zahtevaju se minimalno tri žiroskopa. Pouzdanost žiroskopa u arhitekturi triade je:

$$R_{3z} = R_z^3 \quad (9)$$

gde je R_z – pouzdanost jednog žiroskopa.

Pouzdanost konfiguracije tetrade žiroskopa je po modelu „3 od 4“ i prema [9] iznosi:

$$R_{4z} = R_z^4 + 4R_z^3(1-R_z)R_{zBIT1} \quad (10)$$

gde je R_{zBIT1} – pouzdanost da je otkaz jednog žiroskopa otkriven ugrađenim sistemom za testiranje.

Pouzdanost konfiguracije heksade sa 6 žiroskopa je po modelu „3 od 6“ i prema [9] iznosi:

$$R_{6z} = R_z^6 + 6R_z^5(1-R_z)R_{zBIT1} + 15R_z^4(1-R_z)^2R_{zBIT2} + 20R_z^3(1-R_z)^3R_{zBIT3} \quad (11)$$

gde je $R_{zBIT1,2,3}$ – verovatnoća softverske detekcije i izolacije jednog, dva ili tri žiroskopa od 6 žiroskopa.¹

Analogno, i za akcelerometre važe gornje formule, tako da je za konfiguraciju triade:

$$R_{3a} = R_a^3 \quad (12)$$

za konfiguraciju tetrade:

$$R_{4a} = R_a^4 + 4R_a^3(1-R_a)P_{aBIT1} \quad (13)$$

za konfiguraciju heksade:

$$R_{6a} = R_a^6 + 6R_a^5(1-R_a)P_{aBIT1} + 15R_a^4(1-R_a)^2P_{aBIT2} + 20R_a^3(1-R_a)^3P_{aBIT3} \quad (14)$$

gde je $R_{aBIT1,2,3}$ – verovatnoća softverske detekcije i izolacije jednog, dva ili tri akcelerometra od 6 akcelerometara.

¹ U simulaciji je pretpostavljeno da je $R_{zBIT1} = R_{zBIT2} = R_{zBIT3} = R_{aBIT1} = R_{aBIT2} = R_{aBIT3} = 1$

Pouzdanost raznih arhitektura IMB

Pouzdanost arhitekture IMB u obliku triade

Pouzdanost arhitekture IMB sa jednom triadom (slika 1) data je formulom:

$$R_t = R_{bn} \cdot R_s \cdot R_{3z} \cdot R_{3a} \cdot R_{um} \cdot R_{pr} \cdot R_{sm} \quad (15)$$

gde je:

- R_{bn} – pouzdanost bloka za napajanje;
- R_s – pouzdanost generatora taktnih impulsa;
- R_{3z} – pouzdanost triade žiroskopa;
- R_{3a} – pouzdanost triade akcelerometara;
- R_{um} – pouzdanost unutrašnje magistrale podataka;
- R_{pr} – pouzdanost procesora;
- R_{sm} – pouzdanost spoljašnje magistrale podataka.



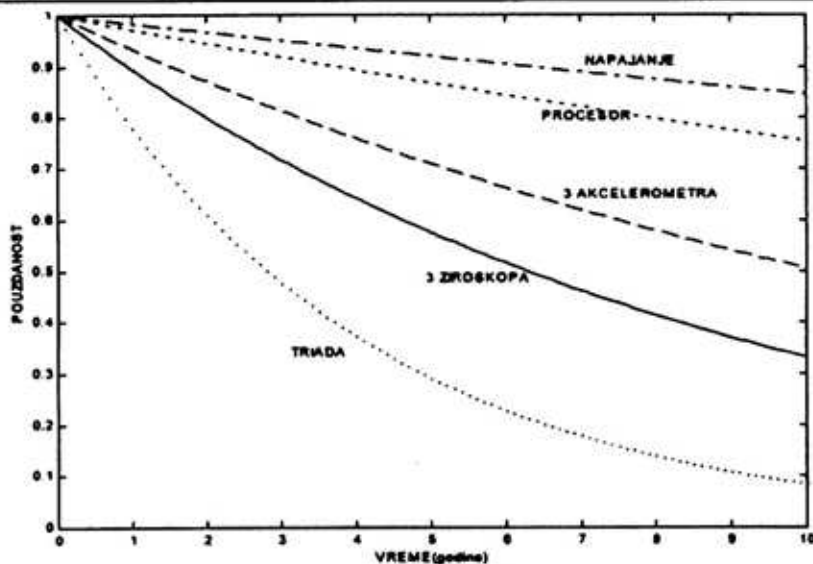
Sl. 1 – Arhitektura IMB-triada

Pouzdanost IMB u obliku triade i doprinos pojedinih njenih komponenti prikazan je na slici 2.

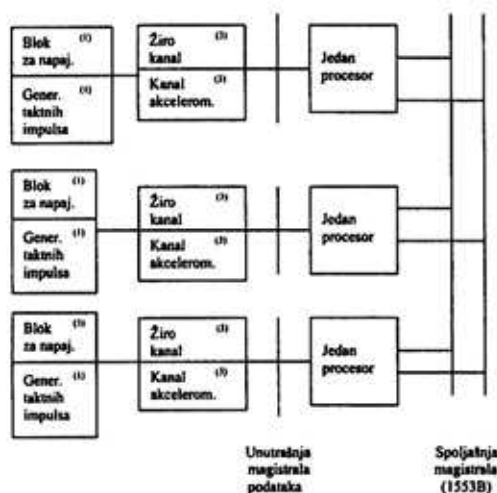
Pouzdanost arhitekture IMB u obliku trostruke triade

Arhitektura IMB u obliku trostruke triade prikazana je na slici 3.

Pouzdanost trostruke triade (da funkcionišu bar dve triade i bar jedna spoljašnja magistrala podataka) jeste:



Sl. 2 – Pouzdanost triade i njenih komponenti



Sl. 3 – Arhitektura IMB – trostruka triada

$$R_{3t} = [R_t^3 + 3R_t^2(1 - R_t)] \cdot R_{2sm} \quad (16)$$

gde je R_{2sm} – pouzdanost dvostruke spoljašnje magistralne podataka (1553B).

Pouzdanost arhitekture IMB u obliku tetrade

Pouzdanost arhitekture IMB sa jednom tetradom (slika 4) data je formulom:

$$R_q = R_{bn} \cdot R_s \cdot R_{4z} \cdot R_{4a} \cdot R_{um} \cdot R_{pr} \cdot R_{sm} \quad (17)$$

gde je:

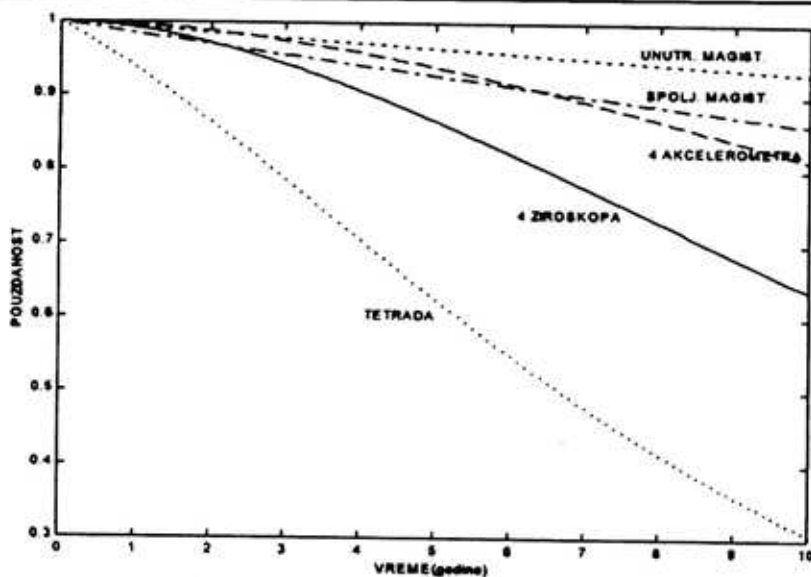
R_{4z} – pouzdanost tetrade žiroskopa;

R_{4a} – pouzdanost tetrade akcelometara.

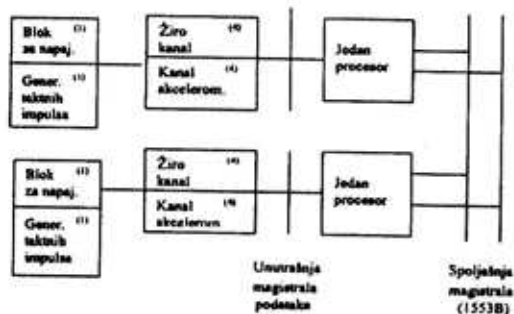


Sl. 4 – Arhitektura IMB-tetrada

Pouzdanost IMB u arhitekturi tetrade sa doprinosom njenih komponenti prikazana je na slici 5.



Sl. 5 – Pouzdanost tetrade i njenih komponenti



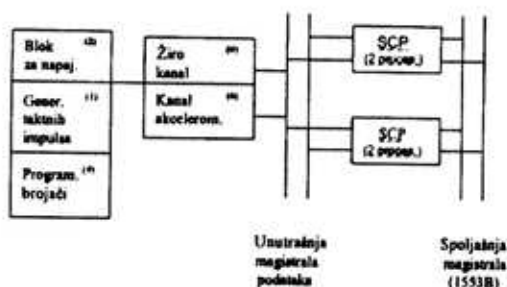
Sl. 6 – Arhitektura IMB – dvostruka tetrada

Pouzdanost arhitekture IMB u obliku dvostruke tetrade

Arhitektura IMB u obliku dvostruke tetrade prikazana je na slici 6.

Pouzdanost dvostruke tetrade (da funkcioniše bar jedna tetrada i bar jedna spoljašnja magistrala podataka) jeste:

$$R_{2q} = [R_q^2 + 2R_q(1-R_q)] \cdot R_{2sm} \quad (18)$$



Sl. 7 – Arhitektura IMB-heksada

Pouzdanost arhitekture IMB u obliku heksade

Arhitektura heksade prikazana je na slici 7.

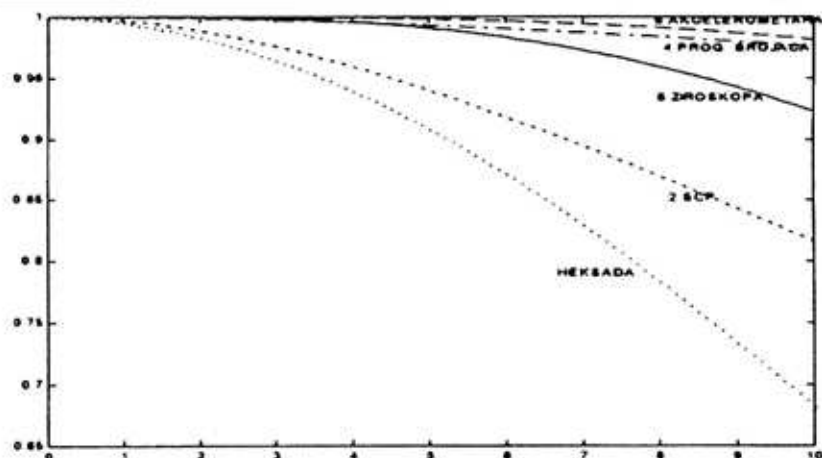
Pouzdanost arhitekture IMB sa jednom heksadom data je formulom:

$$R_h = R_{2sm} \cdot R_s \cdot R_{6z} \cdot R_{6a} \cdot R_{2sm} \cdot R_{2scp} \cdot R_{4pb} \cdot R_{2sm} \quad (19)$$

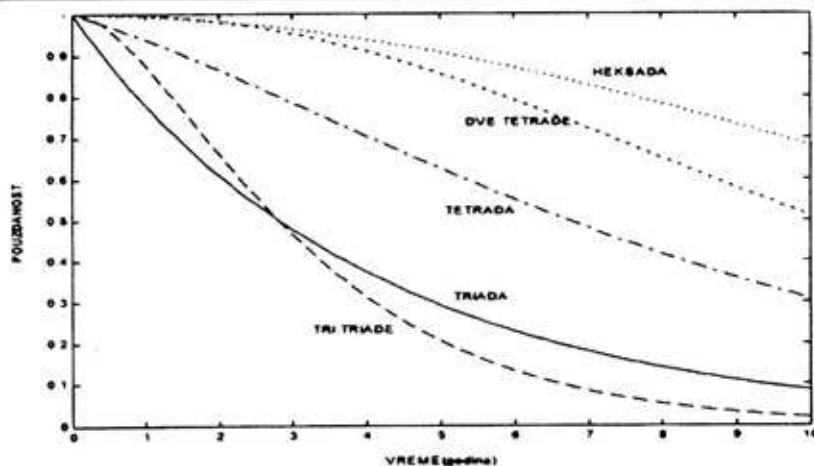
gde je:

R_{6z} – pouzdanost heksade žiroskopa;

R_{6a} – pouzdanost heksade akcelerometara;



Sl. 8 – Pouzdanost heksade i njenih komponenti



Sl. 9 – Pouzdanost raznih arhitektura IMB za period od 10 godina

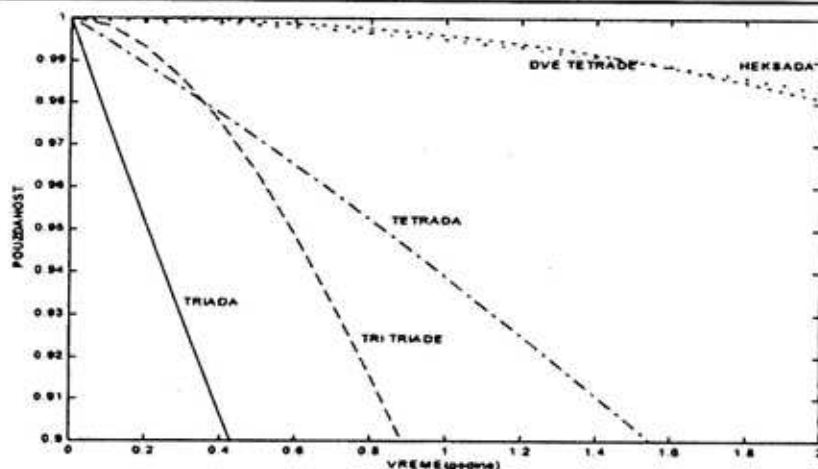
R_{4pb} – pouzdanost četiri programabilna brojača.

Pouzdanost IMB u arhitekturi heksade i njenih komponenti prikazana je na slici 8.

Uporedna analiza arhitektura IMB

Upoređenje pouzdanosti pet arhitektura prikazano je na slikama 9 i 10. Sa

slike 9 se vidi da je pouzdanost heksade u odnosu na sve ostale arhitekture mnogo veća za period 10 godina. Međutim, ako se posmatra period od 1,5 godine (slika 10), pouzdanost heksade je manja od pouzdanosti arhitekture sa dve tetrade, što nameće potrebu da se koristi pouzdaniji procesor ili tri SCP (šest procesora) umesto dva.



Sl. 10 – Pouzdanost raznih arhitektura IMB za period od 2 godine

Zaključak

Prilikom odlučivanja o nabavci borbenog aviona svakako treba imati na umu da je INS, pored avionskog radara, jedan od najvažnijih i najskupljih sistema, jer njegove podatke koristi veliki broj ostalih sistema na avionu.

Rezultati sprovedene analize ukazuju na to da je arhitektura IMB u obliku heksade najbolja od analiziranih arhitektura sa stanovišta pouzdanosti IMB, za period upotrebe duži od 1,5 godine, a za period upotrebe do 1,5 godine najbolja je dvostruka tetrađa.

Literatura:

[1] Jeerage, M. K.: Reliability Analysis of Fault - Tolerant IMU Architectures with Redundant Inertial Sensors, IEEE AES Magazine, July 1990.

[2] Brkić, D.: Proračun pouzdanosti mosne veze elemenata tehničkog sistema analitičkom metodom i metodom Monte Karlo, Vojnotehnički glasnik, 1/2000.

[3] Harrison, J., Gai, E.: Evaluating Sensor Orientations for Navigation Performance and Failure Detection, IEE Transaction on AES, Vol. AES-13, N°6 Nov. 1977.

[4] Gai, E., Harrison, J., K. Daly: FDI Performance of Two Redundant Sensor Configurations, IEEE Transaction on AES, Vol. AES-15, N°3, Nov. 1979.

[5] Walker, B.; Gai, E.: Fault Detection Threshold Determination Technique Using Markov Theory, AIAA J. Guidance and Control, Vol. 2, N°4, July-Aug. 1979.

[6] Satin, A.; Gates, R.; Evaluation of Parity Equations for Gyro Failure Detection and Isolation, AIAA, J. Guidance and Control, Vol. 2, N°1, Jan.-Feb. 1978.

[7] Dipasquo, M.: The Integrated Inertial Sensor Assembly (IISA): A redundant strapdown system for advanced aircraft navigation and flight control functions, AGARD 33 rd Symposium of the Guidance and Control Panel, New York, Oct. 1985.

[8] Baum, R. A., Morrison, G. E. S., Peters, R. C.: A redundant inertial navigation system for IUS, NAECON 1980, Dayton.

[9] Pokorni, S., Ramović, P., Parčina N.: Teorija pouzdanosti tehničkih sistema - zbirka rešenih zadataka, VA VJ, Beograd, 1997.