

## Uticaj pobudnih učestanosti mikrokabla na slobodni žiroskop u vođenoj protivoklopnj raketi

Mr Vladimir Vukmirica, dipl. inž.<sup>1)</sup>  
Dimitar Velev, dipl. inž.<sup>1)</sup>

Nestacionarni let protivoklopnih vođenih raketa bitno utiče na rad senzora ugrađenih u telo rakete. Promena brzine rakete tokom njenog leta na različitim temperaturama okoline, može da izazove takve pobudne učestanosti mikrokabla za prenos signala vođenja, kakve su na određenim segmentima putanje bliske nutacionim učestanostima slobodnog žiroskopa. Prikazana je takva mogućnost, koja je dovela do rezonance žiroskopa i njegovog neregularnog rada kao senzora ugla valjanja rakete i rezultati eksperimentalnih istraživanja novog konstrukcionog rešenja kojim se amortizuju pobudne oscilacije i otklanja rezonanca žiroskopa.

*Cljučne reči:* Žiroskop, slobodni žiroskop, ugao valjanja rakete, pobudna učestanost.

### Uvod

VEĆINA protivoklopnih (PO) vođenih raketa su rotirajuće sa jednodokanalnim vođenjem i upravljanjem. Za davanje podatka o vertikalnom položaju koristi se slobodni žiroskop. Spoljašnja osa slobodnog žiroskopa je uležištena tako, da je paralelna sa uzdužnom osom rakete oko koje rotira. Uobičajeno se žiroskop čvrsto vezuje za telo rakete, da bi se održala paralelnost njegovih osa sa osama rakete. U fazi projektovanja ovog žiroskopa nije postojao zahtev za izolacijom vibracija, jer se smatralo da su pobudne vibracije zanemarljive. Pre ugradnje u raketu, svaki žiroskop se ispituje prema odgovarajućim propisima o kvalitetu proizvoda.

U toku poligonskih ispitivanja raketa na sniženim temperaturama je primećeno da dolazi do otkaza u radu žiroskopa. Svi žiroskopi su ispitivani u toku proizvodnje i na sniženim temperaturama i nije konstatovan nikakav otkaz. Cilj istraživanja je da otkrije zašto žiroskopi koji ispravno rade na sniženim temperaturama u laboratorijskim uslovima, ne rade ispravno u raketi. Bilo je očigledno da žiroskopi ne otkazuju samo zbog snižene temperature, pa su istraživani drugi mogući uzroci otkaza, koji na sniženim temperaturama dolaze do izražaja.

### Parametri konstrukcije žiroskopa

Šematski prikaz slobodnog žiroskopa dat je na sl.1. Za određivanje referentnog pravca vertikale koristi se stabilisana osa rotora žiroskopa u inercijalnim koordinatama. Očitavanje referentnog pravca se vrši očitavanjem položaja tela rakete u odnosu na stabilisani položaj spoljašnjeg rama, referentni ugao  $\alpha$ .

Kućište žiroskopa je čvrsto vezano za telo rakete. Tegovi služe za kompenzaciju momenta trenja u ležajevima spoljašnjeg rama usled rotirajućeg kretanja rakete. Disk je sa prerezom za očitavanje referentnog ugla  $\alpha$  i čvrsto je vezan za spoljni ram.

Definisani koordinatni sistemi:

- $x_0, y_0, z_0$  - nepokretni koordinatni sistem u inercijalnom sistemu koordinata,
- $x, y, z$  - koordinatni sistem čvrsto vezan za unutrašnji ram,
- $x_1, y_1, z_1$  - koordinatni sistem čvrsto vezan za spoljašnji ram,
- $x_R, y_R, z$  - koordinatni sistem čvrsto vezan za rotor.

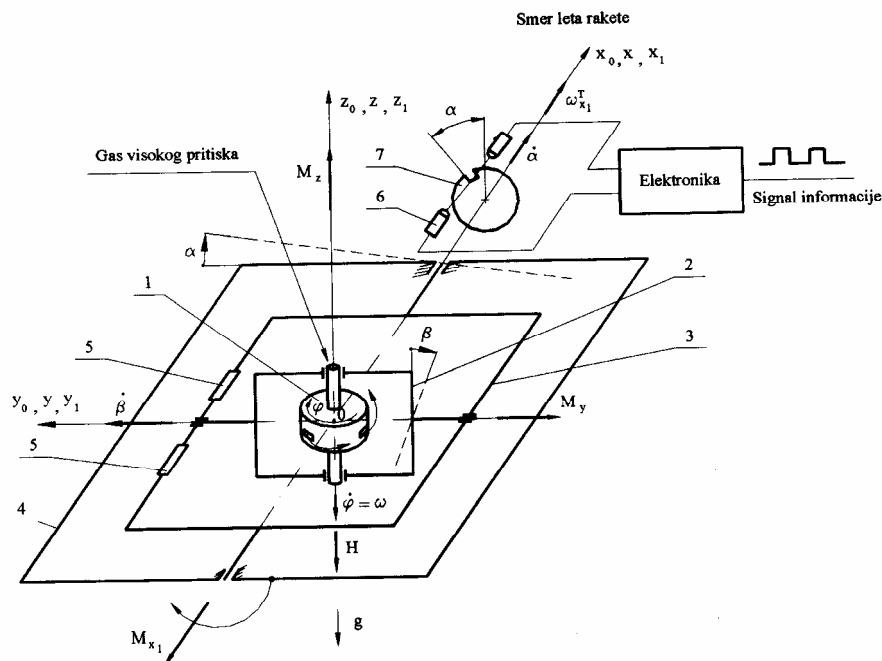
Nepokretni koordinatni sistem  $x_0, y_0, z_0$  definisan je u trenutku odbravlivanja žiroskopa na lansirnoj rampi pre lansiranja rakete. Početni položaji koordinatnih sistema  $x, y, z$  i  $x_1, y_1, z_1$  se poklapaju sa nepokretnim koordinatnim sistemom  $x_0, y_0, z_0$ .

Ostali kinematički parametri su:  $\alpha$  - ugao zaokretanja spoljašnjeg rama u odnosu na nepokretni koordinatni sistem;  $\beta$  - ugao zaokretanja unutrašnjeg rama u odnosu na spoljašnji ram;  $\varphi$  - ugao zaokretanja rotora oko ose  $z$ ;  $\dot{\varphi} = \omega$  - ugaona brzina rotora;  $\omega_{x_1}^T$  - ugaona brzina tela rakete;  $g$  - pravac Zemljine gravitacije.

Zaletanje rotora žiroskopa vrši se azotom ili suvim vazduhom pritiska  $p = 200$  bara iz rezervoara, poz.7. na sl.2. Zaletanje rotora je u zabavljenom položaju žiroskopa pre starta rakete. Položaj ramova u zabavljenom položaju prikazan je na sl.1. U poslednjoj fazi zaletanja, kada pritisak iz rezervoara opadne na vrednost 0,75 bara, brava se automatski odbravljuje i oslobodi osu rotora žiroskopa. Odbravljeni položaj ose rotora je referentni položaj vertikale u trenutku lansiranja. Ugaona brzina rotora u trenutku odbravlivanja je početna ugaona brzina i na normalnim temperaturnim uslovima iznosi 36000 ob/min. Od trenutka odbravlivanja prestaje dovod azota, a početna brzina rotora počinje da opada usled kočenja, momenta trenja u ležajevima i otpora vazduha.

Potrebno je odrediti precesiono kretanje spoljnog rama  $\alpha(t)$ , i precesiono kretanje unutrašnjeg rama  $\beta(t)$ , u

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15



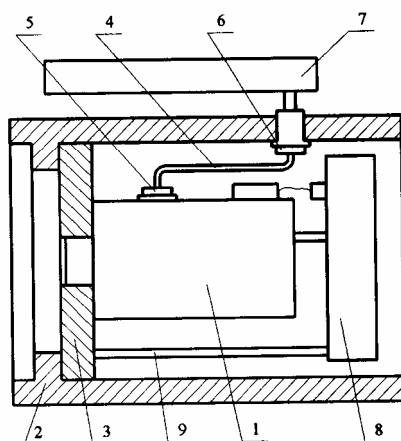
Slika 1. Šematski prikaz žiroskopa: 1- rotor žiroskopa, 2- unutrašnji rim, 3- spoljašnji rim, 4- kućište žiroskopa, 5- tegovi, 6- foto čitač, 7- disk

uslovima kada rotor ima promenljivu (opadajuću) brzinu obrtanja i kada postoje spoljašnji momenti u osama kardanskih ramova.

Precesiono kretanje spoljašnjeg rama  $\alpha(t)$  je veoma važno zato što predstavlja ugaonu grešku referentnog pravca koji se koristi u sistemu vođenja rakete.

Precesiono kretanje unutrašnjeg rama  $\beta(t)$  mora da bude u određenim granicama i ne sme da dostigne graničnu vrednost  $\beta_A = 40^\circ$ , kada se unutrašnji ram osloni na graničnik spoljašnjeg rama. U tom slučaju žiroskop gubi jedan stepen slobode kretanja što dovodi do kolapsa slobodnog žiroskopa.

Način ugradnje žiroskopa u raketu dat je na sl.2.



Slika 2 - Način ugradnje žiroskopa u raketu: 1- žiroskop, 2- telo rakete, 3- noseća ploča, 4- cevčica, 5- priključak na žiroskopu, 6- priključak na raketi, 7- rezervoar, 8- elektronika, 9- nosač elektronike

### Jednačine kretanja slobodnog žiroskopa u kardanskom vešanju sa promenljivom brzinom rotora

Koordinatni sistemi, ugaona zaokretanja  $\alpha, \beta, \varphi$  i ugaone brzine  $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\varphi}$  su prikazani na sl.1.

Obrađene su kinematičke veze uglova i ugaonih brzina, kinetički momenti rotora i kardanskih ramova i zakon o promeni kinetičkog momenta  $\frac{dH}{dt} = M$  [1].

Diferencijalna jednačina kretanja za rotor oko ose  $z$  posle sređivanja je [1]:

$$C \frac{d\omega_z}{dt} = M_z \quad (1)$$

gde su:  $C$  - moment inercije rotora oko ose  $z$ ,  $M_z$  - moment spoljašnjih sila oko ose  $z$ .

Diferencijalna jednačina kretanja za sistem unutrašnji ram + rotor oko ose  $y$  je:

$$(A + B_1)\ddot{\beta} - (C_1 - A - A_1)\dot{\alpha}^2 \sin \beta \cos \beta - C\omega_z \dot{\alpha} \cos \beta = M_y \quad (2)$$

gde su:  $A$  - moment inercije rotora oko ose  $x$  i  $y$  (simetrično telo),  $C_1$  - moment inercije unutrašnjeg rama oko ose  $z$ ,  $A_1$  - moment inercije unutrašnjeg rama oko ose  $x$ ,  $M_y$  - moment spoljašnjih sila oko ose  $y$ .

Diferencijalna jednačina kretanja za sistem spoljašnji ram + unutrašnji ram + rotor oko ose  $x_1$  glasi:

$$\begin{aligned} & [(A + A_1)\cos^2 \beta + C_1 \sin^2 \beta + A_2] \ddot{\alpha} + \\ & + C \frac{d\omega_z}{dt} \sin \beta + C\omega_z \dot{\beta} \cos \beta + \\ & + 2(C_1 - A - A_1)\dot{\alpha}\dot{\beta} \sin \beta \cos \beta = M_{x_1} \end{aligned} \quad (3)$$

gde su:  $A_2$  - moment inercije spoljašnjeg rama oko ose  $x_1$ ,  $M_{x_1}$  - moment spoljašnjih sila oko ose  $x_1$ .

Za slučaj "brzorotirajućeg" žiroskopa  $\omega = \dot{\varphi}$  i brzina  $\omega_z = \dot{\varphi} + \dot{\alpha} \sin \beta$  je značajno velika u poređenju sa precesionim brzinama  $\dot{\alpha}$  i  $\dot{\beta}$ . U jednačinama (2 i 3) članovi koji sadrže množitelje  $\dot{\alpha}^2$  i  $\dot{\alpha}\dot{\beta}$  su značajno manji u pore-

đenju sa članovima  $\omega_z \dot{\alpha}$  i  $\omega_z \dot{\beta}$ . Zanimarivanjem ovih članova, jednačine dobijaju oblik:

$$\begin{aligned} & [(A + A_1) \cos^2 \beta + C_1 \sin^2 \beta + A_2] \ddot{\alpha} + \\ & + C \frac{d\omega_z}{dt} \sin \beta + C \omega_z \dot{\beta} \cos \beta = M_{x_1} \\ & (A + B_1) \ddot{\beta} - C \omega_z \dot{\alpha} \cos \beta = M_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$C \frac{d\omega_z}{dt} = M_z$$

Ove diferencijalne jednačine opisuju kretanje brzorotirajućeg žiroskopa u kardanskom vešanju.

U ovom slučaju, kinetički moment rotora je promenljiva veličina i funkcija je vremena:

$$H = C \omega_z(t)$$

Ugaona brzina rotora je  $\omega_z = \dot{\varphi} + \dot{\alpha} \sin \beta$  i zato što je  $\dot{\alpha}$  mnogo manje od  $\dot{\varphi}$ , pa je  $\omega_z = \dot{\varphi} = \omega(t)$  i kinetički moment:

$$H = C \omega(t) \quad (5)$$

Treća jednačina sistema (4) može da se izrazi u obliku:

$$\frac{dH}{dt} = M_z \quad (6)$$

Rešavanjem ove jednačine proizlazi izraz kinetičkog momenta usporavajućeg rotora:

$$H = H_0 - \int_0^t M_z dt \quad (7)$$

gde su:  $H_0 = C \omega_0$  - kinetički moment u početnom trenutku,  $\omega_0$  - početna ugaona brzina rotora,  $M_z$  - moment trenja u ležajevima rotora i moment otpora vazduha.

Ako se u prve dve jednačine sistema (4) zanemari uticaj mase ramova, uvede izraz za kinetički moment (5) i spoljašnji momenti budu momenti trenja u uležištenju ramova, jednačine postaju:

$$\begin{aligned} \dot{H} \sin \beta + H \dot{\beta} \cos \beta &= M_{x_1}(\dot{\alpha}) \\ -H \dot{\alpha} \cos \beta &= M_y(\dot{\beta}) \end{aligned} \quad (8)$$

Nezavisno od oblika karakteristike trenja, uvek je  $\text{sign } M_y = -\text{sign } \dot{\beta}$ , pošto se trenje neprekidno suprotstavlja kretanju. Iz druge jednačine (8), u slučaju kada je  $H > 0$  i  $\cos \beta > 0$ , sledi  $\text{sign } \dot{\alpha} = \text{sign } \dot{\beta}$ . Zbog toga je udaljšavanje od obe ose uvek u istom pravcu. Zamenom  $\text{sign } M_{x_1} = -\text{sign } \dot{\alpha} = -\text{sign } \dot{\beta}$  u (8) dobija se izraz:

$$\dot{H} \sin \beta + H \dot{\beta} \cos \beta + |M_{x_1}| \text{sign } \dot{\beta} = 0 \quad (9)$$

što se vrši, kada je:

$$\text{za ubrzavajući rotor } (\dot{H} > 0) \begin{cases} \sin \beta > 0 & \dot{\beta} < 0, \\ \sin \beta < 0 & \dot{\beta} > 0, \end{cases}$$

$$\text{za usporavajući rotor } (\dot{H} < 0) \begin{cases} \sin \beta > 0 & \dot{\beta} > 0, \\ \sin \beta < 0 & \dot{\beta} < 0 \end{cases}$$

Znači da, nezavisno od konkretnog oblika karakteristike trenja, za usporavajući rotor ( $\dot{H} < 0$ ), unutrašnji ram uvek beži od osnovnog položaja. Za ubrzavajući rotor  $\dot{H} > 0$ , unutrašnji ram uvek teži ka osnovnom položaju. Slučaj ubrzavajućeg rotora ne razmatra se zato što se zaletanje vrši u zabavljenom položaju žiroskopa.

Precesiono kretanje unutrašnjeg rama  $\beta(t)$  može da se odredi iz prve jednačine sistema (8):

$$\begin{aligned} \frac{d(H \sin \beta)}{dt} &= M_{x_1} \\ H \sin \beta - H_0 \sin \beta_0 &= \int_0^t M_{x_1} dt \\ \sin \beta &= \frac{H_0 \sin \beta_0 + \int_0^t M_{x_1} dt}{H} \end{aligned} \quad (10)$$

Zamenom izraza za kinetički moment (7) dobija se:

$$\sin \beta = \frac{H_0 \sin \beta_0 + \int_0^t M_{x_1} dt}{H_0 - \int_0^t M_z dt} \quad (11)$$

Ako se zna početna brzina rotora  $\omega_0$ , spoljašnji momenti  $M_{x_1}(t)$  i  $M_z(t)$ , može da se odredi kretanje unutrašnjeg rama  $\beta(t)$ .

Precesiono kretanje spoljašnjeg rama  $\alpha(t)$  dobija se iz druge jednačine (8):

$$\dot{\alpha} = -\frac{M_y}{H \cos \beta} \quad (12)$$

Zamenom vrednosti za  $H$  u izrazu (7), dobija se:

$$\dot{\alpha} = -\frac{M_y}{\left( H_0 - \int_0^t M_z dt \right) \cos \beta} \quad (13)$$

Ako se analizira jednačina (13), zaključuje se da, smanjenjem ugaone brzine rotora se povećava precesiona ugaona brzina spoljašnjeg rama  $\dot{\alpha}$ , što dovodi do povećanja ugla greške  $\alpha(t)$ . Žiroskopski kolaps može da se objasni jednačinama (7,11 i 13). Usporavajući rotor  $\dot{\omega}_z < 0$  i  $\dot{\beta} > 0$  povlači udaljšavanje unutrašnjeg rama. Kada unutrašnji ram isprecesira do oslanjanja u graničnik,  $\beta_A = 40^\circ$ , gubi se njegov stepen slobode kretanja i dolazi do skokovitog povećanja momenta  $M_y$  na  $M_2$ , usled reaktivnog pritiska oslanjanja. U tom slučaju jednačina (13) glasi:

$$\dot{\alpha} = -\frac{M_2}{H(t) \cos \beta_A}$$

Dolazi do skokovitog povećanja ugaone brzine spoljašnjeg rama.

Za određivanje precesionog kretanja ramova  $\alpha(t)$  i  $\beta(t)$  za vreme leta rakete, potrebno je odrediti momente spoljašnjih sila  $M_{x_1}(t)$ ,  $M_y(t)$  i  $M_z(t)$ .

Let rakete se obično sastoji iz tri faze:

- impulsnog izbacivanja rakete iz lansirne cevi (30-50ms),
- ubrzavanja rakete do nominalne brzine-buster faza (3-5 s) i
- održavanja postignute brzine-marš faza ( $\approx 10$  s)

Momenti trenja u ležajevima rotora i moment usled otpora vazduha određuju se dijagramom promene broja obrtaja, sl. 3, snimljenih u laboratorijskim uslovima. U izbacnoj i marš fazi, momenti trenja su određeni u statičkim uslovima merenjem pri opterećenju ležajeva, koje odgovara sili usled ubrzanja u svakoj fazi leta. Kinematički moment trenja, usled obrtanja tela rakete kompenzira se odgovarajućim tegom na spoljašnjem ramu. Određeni momenti koji deluju na sistem u toku leta, prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Spoljašnji momenti koji deluju na žiroskop

Momenti $\times 10^4$ (Nm)	Vreme leta (s)		
	0 do 0,03	0,03 do 3	3 do 13
$M_{x_1}$	57	3	0,16
$M_y$	6	0,824	0,426
$M_z$ za $\omega_0 = 36000$	8,5	4,1	2,74
$M_z$ za $\omega_0 = 22000$	6,95	2,16	1,1

Moment inercije rotora oko ose  $z$  je  $J_{zR} = C = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$ .

Na osnovu navedenih podataka mogu da se izračunaju precesiona kretanja unutrašnjeg rama  $\beta(t)$  i spoljašnjeg rama  $\alpha(t)$  u fazi leta. Numerički rezultati simulacije prikazani su u tabelama 2 i 3. U tabeli 3 dati su rezultati za najnepovoljniji dozvoljeni slučaj, kada je početni broj obrtaja rotora minimalan,  $\omega_0 = 22000 \text{ ob/min}$ . Rezultati simulacije pokazuju da su u 13 s za početne uslove:

$$\omega_0 = 36000 \text{ ob/min}, \alpha = 2,145^\circ \text{ i } \beta = 4,827^\circ$$

$$\omega_0 = 22000 \text{ ob/min}, \alpha = 3,457^\circ \text{ i } \beta = 6,746^\circ$$

što znači da žiroskop radi ispravno i da je daleko od uslova  $\beta_A = 40^\circ$  kada dolazi do kolapsa žiroskopa. Ugaone greške  $\alpha$  su prihvatljive za vođenje rakete.

Tabela 2. Precesiona kretanja unutrašnjeg i spoljašnjeg rama u letu za  $\omega_0 = 36000 \text{ ob/min}$

	Vreme leta (s)					
	0	0,03	3	6	9	13
$\omega$ (ob/min)	36000	35956	33797	32345	30912	28988
$\beta$ (°)	0	0,469	3,179	3,476	3,802	4,827
$\dot{\alpha}$ (°)	1,648	1,65	0,24	0,129	0,136	0,145
$\alpha$ (°)	0	0,05	0,77	1,157	1,565	2,145

Tabela 3. Precesiona kretanja unutrašnjeg i spoljašnjeg rama u letu za  $\omega_0 = 22000 \text{ ob/min}$

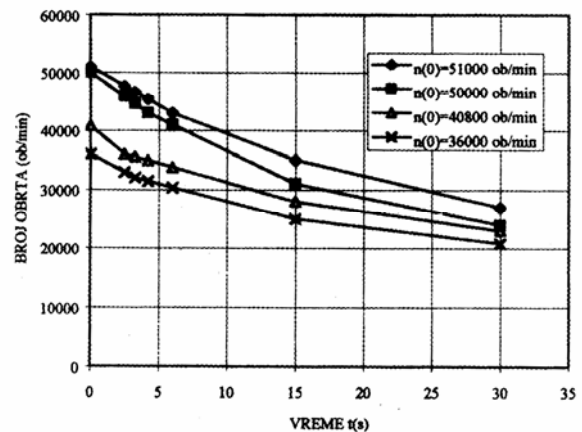
	Vreme leta (s)					
	0	0,03	3	6	9	13
$\omega$ (ob/min)	22000	21962	21716	21126	20536	19748
$\beta$ (°)	0	0,798	5,373	5,758	6,165	6,746
$\dot{\alpha}$ (°)	2,795	2,8	0,406	0,207	0,214	0,223

$\alpha$ (°)	0	0,084	1,302	1,922	2,563	3,457
--------------	---	-------	-------	-------	-------	-------

Provera rezultata simulacije u laboratorijskim uslovima se vrši samo za marš fazu, a kompletna provera u realnim uslovima leta.

Za analizu otkaza žiroskopa nije dovoljno samo da se posmatra precesiono kretanje, već je potrebno da se računa na uticaj mase ramova i da se razmotri kretanje žiroskopa prikazano sistemom jednačina (4). Potrebno je utvrditi promenu nutacione učestanosti ose rotora u funkciji smanjenja broja obrtaja rotora  $\omega(t)$ , a potom ispitati područja poklapanja učestanosti pobudnih oscilacija tela rakete i nutacionih oscilacija ose rotora, kada dolazi do rezonantnih pojava i otkaza žiroskopa.

Promena broja obrta rotora zavisi od veličine pritiska za zaletanje, trenja u ležajevima, temperature okoline, otpora vazduha i sl. Na sl.3 su prikazane tipične vrednosti promena broja obrtaja rotora od minimalnih do maksimalnih početnih vrednosti  $n(0)$ , koje su dobijene ispitivanjem na većem uzorku žiroskopa [2].



Slika 3. Promena broja obrtaja rotora

Kružna učestanost nutacionih oscilacija žiroskopa data je izrazom [3]:

$$\omega_n = \frac{H}{\sqrt{J_{x_1} J_y}} \quad (14)$$

gde su:  $J_{x_1}$  - moment inercije spoljašnjeg rama sa unutrašnjim ramom i rotorom za osu uležištenja spoljašnjeg rama,  $J_y$  - moment inercije unutrašnjeg rama sa rotorom za osu  $y$ ,  $H$  - kinetički moment rotora.

$$H = J_z \omega \quad (15)$$

Ugaona brzina rotora  $\omega$  data je izrazom:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (16)$$

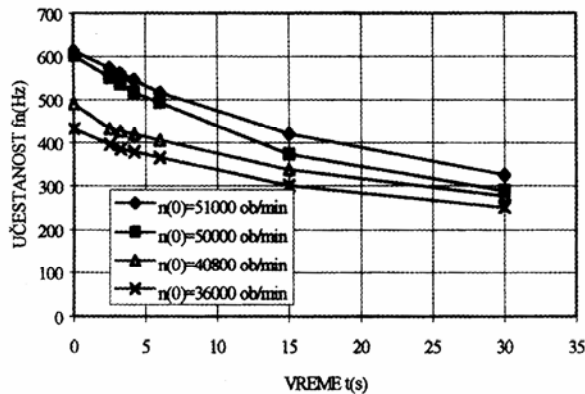
gde je  $n$  broj obrtaja rotora definisan na sl.3.

Kada se (5) zameni i uvrste vrednosti za momente inercije u (14) dobije se:

$$\omega_n = \frac{J_z}{\sqrt{J_{x_1} J_y}} \omega = 0,721 \omega \quad (17)$$

Pošto je broj obrtaja rotora promenljiv, nutaciona učestanost ose rotora će biti promenljiva saglasno promeni broja obrtaja rotora. Dijagram promene nutacione

učestanosti dat je na sl.4.

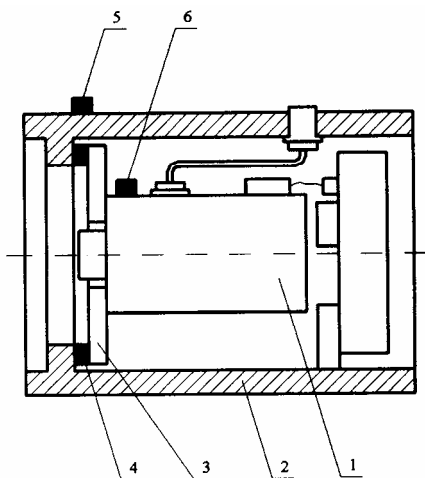


Slika 4. Nutacione učestanosti ose rotora

### Uticao vibracija na slobodni žiroskop

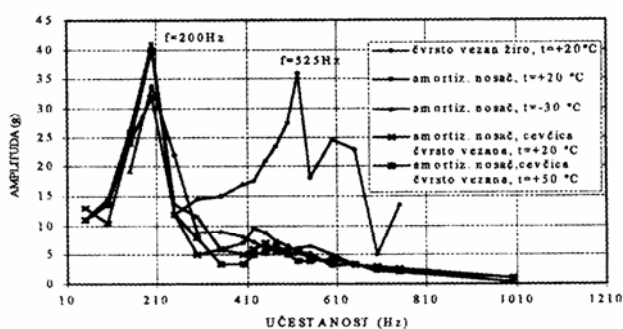
Ispitivanje na uticao vibracija je izvršeno na vibratoru VP-85 DERRITRON, a ubrzanja su merena piezo-električnim akcelerometrima. Na vibratoru su zadavana ubrzanja sinusnog oblika.

Žiroskop je ispitan na uticao vibracija u vertikalnoj ravni (osa z, sl.1). Pri tome su vršene dve vrste ispitivanja. U prvom ispitivanju žiroskop je zabavljen i ne zaleće se, dok se zadaje konstantno ubrzanje amplitude 10 g na telu rakete i snima odgovor na telu žiroskopa, što je prikazano na sl.5. Ispitivan je žiroskop pomoću amortizera čvrsto vezan za telo.



Slika 5. Merenje ubrzanja na žiroskopu: 1- žiroskop, 2- telo rakete, 3- noseća ploča, 4- amortizer, 5- akcelerometar na telu rakete, 6- akcelerometar na žiroskopu

Rezultati merenja su prikazani na sl.6.



Slika 6. Amplitude ubrzanja na žiroskopu

Na sl. 6 može da se uoči da je rezonantna učestanost na kućištu žiroskopa 525 Hz, kada je on čvrsto vezan za nosač. Kada je žiroskop vezan za nosač pomoću amortizera, rezonantna učestanost je 200 Hz.

U drugom ispitivanju, žiroskop je zalećen i snimana su odstupanja unutrašnjeg rama i odstupanja spoljašnjeg rama oko merne ose pri amplitudi pobudne učestanosti od 10g. Ispitivan je žiroskop čvrsto vezan za telo i žiroskop vezan pomoću amortizera.

Korišćen je amortizer koji je projektovan tako da rezonantnu učestanost od 525 Hz pomera na 200 Hz.

Kada je žiroskop čvrsto vezan, na svim učestanostima osim na 525 Hz odstupanja ramova žiroskopa su u prihvatljivim granicama. Na rezonantnoj učestanosti 525 Hz unutrašnji ram žiroskopa u roku od 1 s do 2 s odstupa do graničnika. Pri udaru unutrašnjeg rama u graničnik, spoljašnji ram naglo promeni svoj položaj čime menja i informaciju o vertikalnoj referenci.

Odsupanja unutrašnjeg rama, kada je žiroskop vezan pomoću amortizera, prikazana su u tabeli 4.

Tabela 4. Odstupanje unutrašnjeg rama amortizovanog žiroskopa

Učestanost pobude Hz	Odstupanje unutrašnjeg rama žiroskopa (°)						
	10s	15s	20s	25s	30s	35s	40s
150	10	15		30	40		
200	-1				-1		
250		3			20		
300	0				0		
400	0					0	5
450	0	-0.5		2			2
500	-1	-1		1	3	4	4
525	0	0		1		1	5(45s)
550	0			0			2
600	0		0	1	4	10	

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 4, uočava se da je najveće odstupanje rama na 150 Hz.

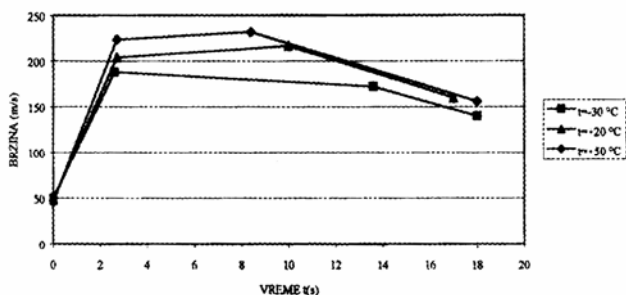
Ispitivanja čvrsto vezanog i amortizovanog žiroskopa pokazuju da, u slučaju poklapanja pobudne učestanosti sa rezonantnom učestanošću kućišta žiroskopa, dolazi do naglog odstupanja unutrašnjeg rama žiroskopa. Kada unutrašnji ram žiroskopa udari u graničnik, počinje naglo odstupanje spoljašnjeg referentnog rama. Kada je žiroskop čvrsto vezan, odstupanje unutrašnjeg rama je mnogo brže nego kada je žiroskop vezan pomoću amortizera.

### Analiza pobudnih oscilacija usled uticaja mikrokabla

U analizi mogućih izvora pobudnih oscilacija pošlo se od kretanja rakete kao mogućeg izvora oscilacija. Dinamika oscilovanja rakete u vertikalnoj ravni oko poprečne ose je sa učestanostima reda veličine nekoliko herca. Pokretači krmila, kao mogući izvor pobude, odražuju sa učestanostima reda veličine učestanosti obrtanja rakete oko podužne ose, što je približno 10 Hz. Sopstvene i nutacione učestanosti su mnogo veće od navedenih, pa se pristupilo analizi pobudnih učestanosti koje mogu da izazovu odmotavanje mikrokabla. Za analizu tih učestanosti potrebno je poznavanje geometrije kalema mikrokabla i brzine leta rakete.

Kalem mikrokabla je namotan na telo koje je konzolno vezano za raketu. Namotavanje kalema je izvršeno u 18 slojeva.

Promena brzine rakete zavisno od temperature okoline je prikazana na sl.7.

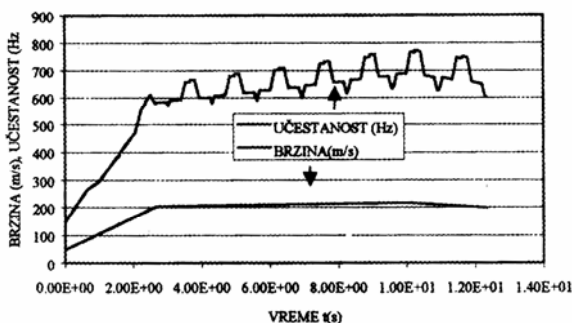


Slika 7. Promena brzine rakete

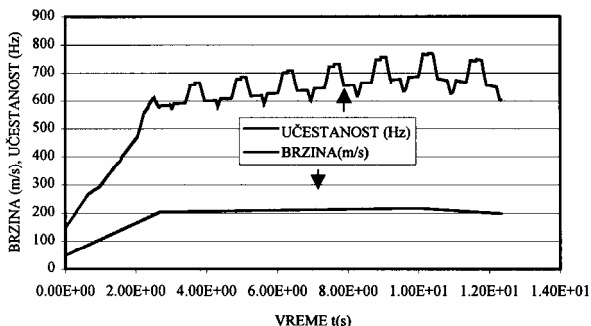
Kako je poznata brzina rakete, može da se izračuna pređeni put rakete. Kada se zna prečnik jednog namotaja mikrokabla, može da se odredi njegova odmotana dužina koja odgovara jednom segmentu pređenog puta. Razlika trenutka poklapanja početka namotaja i trenutka poklapanja kraja namotaja sa segmentom puta, odgovara periodu odmotavanja jednog namotaja. Kada postoji određena sila pri odmotavanju namotaja, onda postoji i periodičnost njenog ponavljanja.

Na osnovu podataka o geometriji kalema mikrokabla i o brzinama rakete, izračunate su pobudne učestanosti mikrokabla.

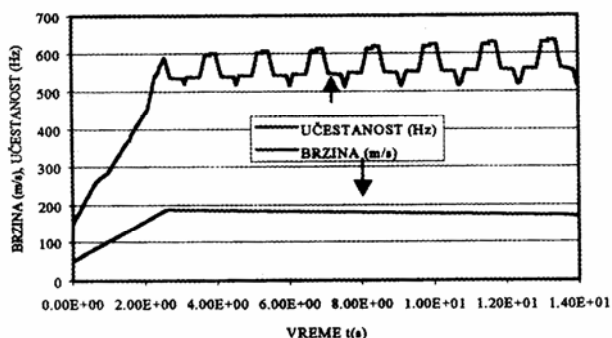
Pobudne učestanosti mikrokabla u funkciji vremena za razne temperature su prikazane na slikama 8, 9 i 10.



Slika 8. Pobudne učestanosti na +50°C

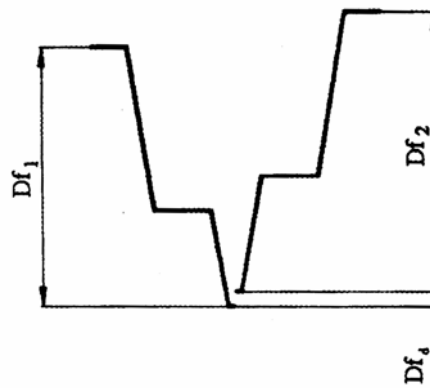


Slika 9. Pobudne učestanosti na +20°C



Slika 10. Pobudne učestanosti na -30°C

Na slikama 8, 9 i 10 se uočava ciklična promena učestanosti, a direktno je vezana za prečnik sa koga se odmotava pojedinačni namotaj. Za konstantne brzine leta rakete, promena učestanosti pri odmotavanju sa najmanjeg do najvećeg prečnika i ponovo sa najvećeg do najmanjeg prečnika, treba da ima oblik prikazan na sl.11.



Slika 11. Idealni oblik promene učestanosti

Raspon učestanosti  $Df_1$  je direktno proporcionalan razlici maksimalnog i minimalnog prečnika sloja koji se odmotava. Posle odmotavanja jednog sloja počinje odmotavanje sledećeg sloja čiji je prečnik manji za debljinu žice, što uslovljava skok učestanosti  $Df_d$  koji je proporcionalan debljini žice. Raspon učestanosti sledećeg sloja  $Df_2$  je veći od prethodnog, jer se smanjuju prečnici odmotavanja, a njihova razlika ostaje konstantna.

Ako je:  $v$  – brzina rakete,  $D_{max}$  – maksimalni prečnik sloja,  $D_{min}$  – minimalni prečnik sloja,  $H = D_{max} - D_{min}$  – razlika prečnika,  $d$  – prečnik žice mikrokabla, dobija se:

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{1/t_{min}}{1/t_{max}} = \frac{v/\pi D_{min}}{v/\pi D_{max}} = \frac{D_{max}}{D_{min}} = \frac{D_{min} + H}{D_{min}} = 1 + \frac{H}{D_{min}}$$

U narednom sloju je:

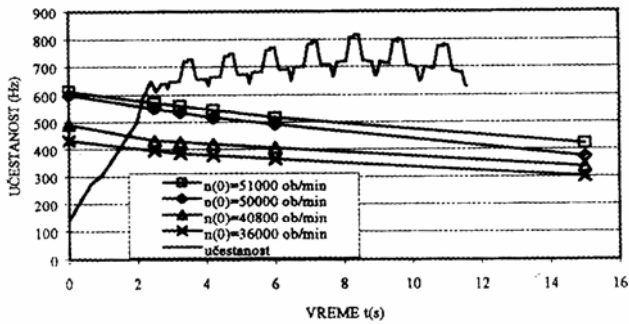
$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = 1 + \frac{H}{D_{min} - d}$$

što znači da se raspon učestanosti povećava u svakom sledećem sloju, pa se pri konstantnoj brzini leta rakete očekuje ponavljanje oblika promene učestanosti (sl.11) sa širenjem raspona maksimalne i minimalne učestanosti u jednom sloju. Kada je brzina leta rakete promenljiva, karakter navedene zavisnosti ostaje, samo što se još menja u skladu sa promenom brzine, što je dobijeno izračunavanjem za realne uslove, a prikazano je na slikama 8, 9 i 10.

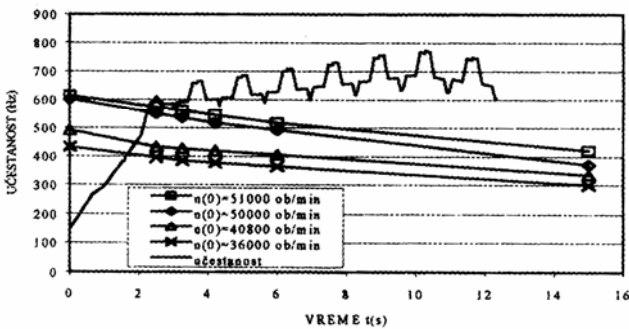
Na slikama 12,13 i 14, dat je uporedni prikaz promene nutacione učestanosti žiroskopa i pobudne učestanosti mikrokabla.

Na osnovu dijagrama na slikama 12, 13 i 14 zaključuje se da, na temperaturama +50°C i +20°C (sl.12 i 13) nema značajnijeg preklapanja nutacionih i pobudnih učestanosti. Na temperaturi -30°C postoji značajno preklapanje nutacionih i pobudnih učestanosti u periodu između 2 i 5 s (sl.14) za nutacione učestanosti koje odgovaraju početnom broju obrtaja rotora 51000 ob/min. To poklapanje je na učestanostima od 500 Hz i 600 Hz. Ako je žiroskop čvrsto vezan za kućište, onda se rezonantna učestanost žiroskopa poklapa sa ovim učestanostima. To su izuzetno nepovoljni uslovi za rad žiroskopa pri kojima dolazi do naglog

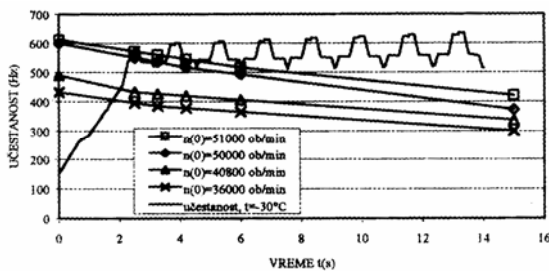
odstupanja ramova žiroskopa i njegovog otkaza u radu.



Slika 12. Pobudne i nutacione učestanosti na +50°C



Slika 13. Pobudne i nutacione učestanosti na +20°C



Slika 14. Pobudne i nutacione učestanosti na -30°C

Ako je žiroskop vezan za kućište preko amortizera, onda nema poklapanja rezonantnih učestanosti kućišta žiroskopa sa nutacionim i pobudnim učestanostima.

Da bi se izbeglo poklapanje pobudnih i nutacionih učestanosti, nužno je da se žiroskop zaleće na početni broj obrtaja, manji od 51000 ob/min. Konstrukciono rešenje uležištenja rotora žiroskopa je takvo da su momenti trenja manji na niskim temperaturama nego na visokim, što omogućava veće početne brojeve obrtaja rotora na niskim temperaturama pri istom pritisku gasa za zaletanje.

### Zaključak

Pokazano je da nestacionarnost brzine leta rakete na različitim temperaturama okoline dovodi učestanost odmotavanja mikrokabla na vrednosti koje su bliske nutacionim učestanostima žiroskopa. Konstrukciono rešenje, kojim se žiroskop direktno ugrađuje na telo rakete, proizvodi rezonanciju žiroskopa i dovodi do njegovog neregularnog rada kao senzora ugla valjanja rakete.

Eksperimentalno je potvrđeno da se, novim konstrukcionim rešenjem u kome se žiroskop ugrađuje u telo rakete preko amortizera i zaletanjem žiroskopa na početne brojeve obrtaja rotora manje od 51000 ob/min, izbegava poklapanje pobudnih učestanosti mikrokabla sa rezonantnim učestanostima kućišta i nutacionim učestanostima rotora žiroskopa, čime je obezbeđen regularan rad žiroskopa tokom leta na svim temperaturama njegove primene.

### Literatura

- [1] NIKOLAJ, E. L. *Giroskop v kardanovom podvese.*, Izdateljstvo "NAUKA", Moskva, 1964.
- [2] VUKMIRICA, V. *Slobodni žiroskop.* int.dok. VTI-03-01-0274.
- [3] WRIGLEY, W., HOLLISTER, W., DENHARD, W. *Gyroscopic theory, design, and instrumentation.* The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, and Lo

Rad primljen: 12.7.2000.god.