

Realizacija i ispitivanje generatora impulsne komande protivoklopne rakete

Dr Miodrag Kobilarev, dipl.inž.¹⁾

Prikazana je hardverska realizacija generatora impulsne komande (GIK) primenom mikroprocesora MC 68000, koji izdaje komande i preko komunikacionog kanala šalje ka raketi sistemu za upravljanje vektorom potiska (UVP). Opisana je hibridna instalacija koja služi za proveru greške merenja ugla i ugaone brzine, zadavanje komandi bez sistema za UVP i sa sistemom za UVP pri konstantnoj i promenljivoj ugaonoj brzini rakete. Na ovaj način je izvršena provera programa rada GIK-a pri izdavanju komandi i korekcija komandi zbog kašnjenja sistema za UVP.

Ključne reči: Protivoklopna raketa, upravljanje raketom vektorom potiska, ugaona brzina rakete, generator impulsne komande, slobodni žiroskop.

Uvod

GENERATOR impulsne komande (GIK) je blok elektroničke u uređaju za vođenje i lansiranje (UVL), koji na osnovu izračunatih komandi u računaru lokatora i ugaonog položaja rakete u odnosu na njenu uzdužnu osu, izmerenog žiroskopom, izdaje komande u obliku širinski moduliranih bipolarnih impulsa i preko komunikacionog kanala (mikrokabla) šalje ka raketi sistemu za upravljanje vektorom potiska (UVP) ili nekom drugom upravljačkom sistemu.

Kada izračunate komande iz računara lokatora stignu u GIK, određuju se uglovi pod kojima se interceptori sistema za UVP uključuju φ_1 i isključuju φ_2 . Određivanje uglova se vrši u dve faze:

U prvoj fazi se odredi sredina sektora φ_{sr} i širina sektora φ_s u kome interceptor treba da bude uključen, a u drugoj fazi se vrši korekcija uglova uključivanja i isključivanja interceptora uzimajući u obzir vremena kašnjenja: signala od žiroskopa do GIK-a, signala od GIK-a do rakete i sistema za UVP pri izvršenju komande.

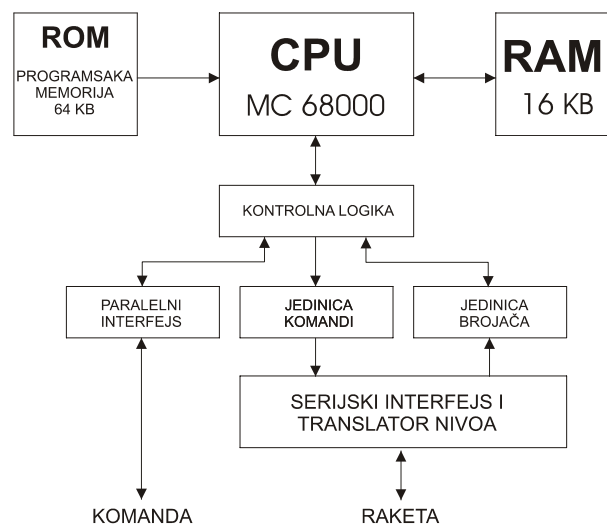
Algoritam rada GIK-a, čija je hardverska realizacija i ispitivanje prikazano u radu, dat je u [1], a opis snažnog sistema za UVP rakete je dat u [2].

Blok elektronike GIK-a

Blok elektronike GIK-a (sl.1) se sastoji od:

- centralne procesorske jedinice (CPU),
- programske memorije (EPROM-ROM), veličine 64KB u koju je smešten program,
- memorije podataka (RAM), veličine 16KB koja se koristi za smeštaj podataka pri izvršenju programa i kao hardverski stek procesora,
- paralelnog interfejsa za vezu sa procesorom lokatora, preko koga GIK dobija komandu koju treba da izvrši,
- jedinice komandi, kao izlaznog organa GIK-a preko koga se upravlja pokretačima aktuatora sistema za UVP,

- jedinice brojača koja obrađuje podatke dobijene od žiroskopa i precizno određuje ugaoni položaj rakete i
- serijskog interfejsa i translatora nivoa, koji vrši prilagođenje GIK-a na trožilni mikrokabl i ostvaruje dvosmernu vezu sa raketom.



Slika 1. Blok-šema hardverske realizacije GIK-a

GIK je realizovan na tri štampane ploče čije su veze i napajanje ostvareni preko osnovne ploče i 64-kontaktih DIN konektora.

Na prvoj štampanoj ploči se nalaze centralna procesorska jedinica, programska memorija i memorija podataka sa pripadajućim logičkim sklopovima. Softver obezbeđuje maksimalnu brzinu obrade signala u realnom vremenu i za čitav red veličine radi kraće od vremena odziva sistema za UVP. Maksimalan prioritet je dat obradi signala žiroskopa koji generiše dva interapta: jedan od signala vertikalne i drugi od signala ugla na svakih 45°.

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Drugi, po prioritetu, je interapt primljene komande φ_s i φ_{sr} sa paralelnog interfejsa. Oba podatka su 16-bitna sa rezolucijom od $0,1^\circ$. Na osnovu primljene komande i podataka o ugaonom položaju rakete sa žiroskopa GIK, prema algoritmu prikazanom u [1] generišu se komande za uključenje, odnosno isključenje interceptora.

Na drugoj štampanoj ploči je realizovan 32-bitni paralelni interfejs za vezu sa računarem lokatora. Prvi 16-bitni port je namenjen za prijem komandi φ_s i φ_{sr} , a drugi izlazni za slanje podataka o ugaonoj brzini rakete računaru lokatora, kao kontrolni parametar.

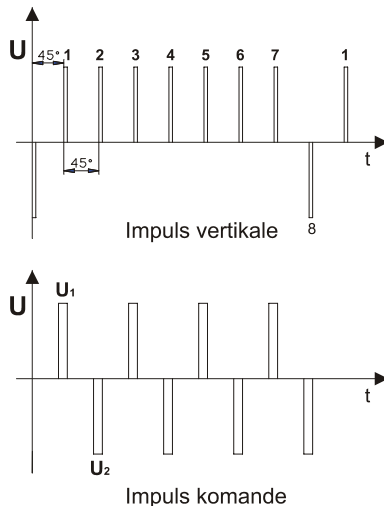
Na trećoj štampanoj ploči su smešteni jedinica brojača, jedinica komandi i serijski interfejs sa translatorom nivoa. Jedinica brojača se sastoji od dva brojača sa pripadajućom logikom koji obezbeđuju interpolaciju ugaonog položaja rakete svakih $0,5^\circ$. Minimalno vreme između dva interapta brojača je:

$$\tau = \frac{1}{\frac{n}{360^\circ}} = \frac{1}{\frac{10}{360^\circ}} = 138,8 \mu s \quad (1)$$

Softverska rutina za opsluživanje interapta traje $\approx 30-40 \mu s$, kako bi ostalo dovoljno vremena za izvršenje programa. Zato je za računar GIK-a izabran snažan procesor MC 68000 sa osnovnom frekvencijom takta od 8 MHz.

Jedinica komandi je jednostavan paralelni registar od dva bita, po jedan bit za svaki par interceptora koji se programski setuje.

Serijski interfejs prilagođava, po nivou i impedansi, izlazni registar komandi i ulazna kola signala sa žiroskopa koji su vezani na trožilni mikrokabl. Jedna od tri žile je zajednički vod izvršne komande i signala sa žiroskopa, drugim se prenosi izvršna komanda ka raketi, a trećom žilom se prenose impulsi sa žiroskopa (sl.2).



Slika 2. Izgled signala žiroskopa i komande

Ispitivanje GIK-a

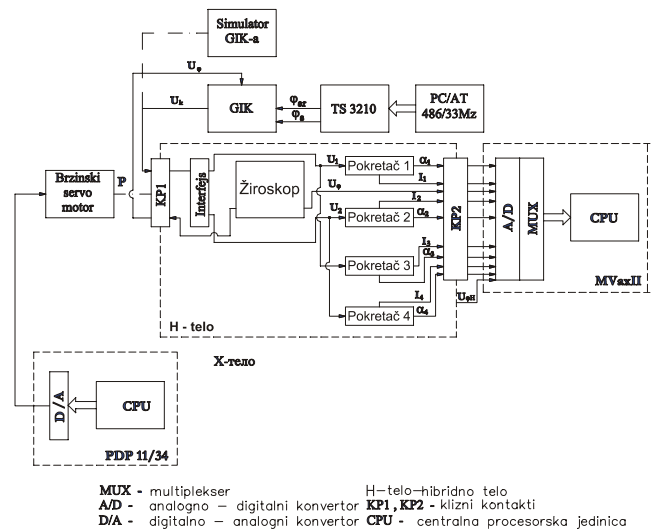
Ispitivanje GIK-a obuhvata:

- ocenu tačnosti merenja ugla i ugaone brzine pri:
 - konstantnoj ugaonoj brzini i
 - promenljivoj ugaonoj brzini,
- proveru tačnosti zadavanja komandi, bez sistema za UVP, u cilju provere algoritma rada GIK-a i ocene greške pri:

- konstantnoj ugaonoj brzini za različite smerove konstantne i promenljive komande
- promenljivoj ugaonoj brzini za različite smerove konstantne i promenljive komande,
- proveru tačnosti zadavanja komandi, sa dva para interceptora, u cilju provere algoritma rada GIK-a i ocene greške pri:
 - konstantnoj ugaonoj brzini za različite smerove konstantne i promenljive komande i
 - promenljivoj ugaonoj brzini za različite smerove konstantne i promenljive komande.

Instalacija za ispitivanje GIK-a je prikazana na sl.3 i sastoji se od:

- PC/AT 486/33MHz računara koji preko RS kompatibilnog interfejsa TS - 32-I0 zadaje konstantne i promenljive komande GIK-u,
- GIK-a,
- simulatora GIK-a koji služi za proveru bloka elektronike sistema za UVP,
- hibridnog tela (H-telo), koje predstavlja inertni deo rakete, koji se sastoji od odseka bojeve glave u kome je smešten blok elektronika sistema za UVP, inertnog marševskog raketnog motora (MRM) sa sistemom za UVP i prednjeg odseka u kome je smešten žiroskop sa blokom elektronike,
- računara $\mu VAX II$ koji meri:
 - ugaone položaje interceptora $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ i α_4 kao izlazne napone sa potencijometara,
 - struje kroz elektromagnete I_1, I_2, I_3 i I_4 ,
 - signal iz žiroskopa U_φ i
 - signal vertikale H-tela $U_{\varphi H}$ kao izlazni napon iz induktivnog blizinskog davača,
- računara PDP 11/34 koji zadaje promenu ugaone brzine H-telu preko D/A konvertora i brzinskog servomotora,
- brzinskog servomotora i
- kliznih prstenova preko kojih se dovode komandni naponi i električno napajanje bloku elektronike sistema sa UVP i bloku elektronike žiroskopa, a veličine koje se mere odvođe u računar $\mu VAX II$.



MUX - multiplexer
A/D - analogno - digitalni konvertor
D/A - digitalno - analogni konvertor
H-telo-hibridno telo
KPI, KP2 - klizni kontakti
CPU - centralna procesorska jedinica

Slika 3. Instalacija za ispitivanje GIK-a

Funkcija promene ugaone brzine se zadaje programski na računaru PDP 11/34 i preko D/A konvertora zadaje brzinskom servomotoru koji izvršava komandu i rotira H-telo. Ugaoni položaj i ugaona brzina H-tela se mere

slobodnim žiroskopom koji se zaleće neposredno pred početak eksperimenta i blizinskim induktivnim davačem 1, koji generiše impulse kada mehanički pinovi raspoređeni po obimu adaptera za prihvat H-tela prođu ispred njega. Signal sa žiroskopa se uvodi u GIK i radi kontrole u $\mu VAX II$.

Radi provere ispravnosti rada žiroskopa, vertikalni položaj H-tela se registruje blizinskim induktivnim davačem 2, koji generiše impulse $U_{\phi H}$, kada čelični pin prođe ispred njega. Ovaj signal se snima računarom $\mu VAX II$.

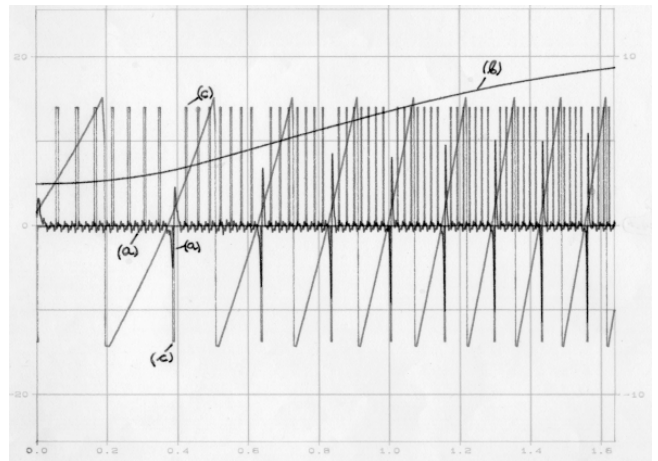
Tabela 1. Ulazne i izlazne veličine X – tela

Red. br.	Ulazne veličine	Oznaka ulaza	Izlazne veličine	Oznaka izlaza
1	Signal komande iz GIK-a	U_k	Signal iz žiroskopa	U_{ϕ}
2	Napon napajanja blokova elektronike H-tela	24 V	Ugaoni položaj interceptora 1	α_1
3	Zajednički " -- " kraj	--	Ugaoni položaj interceptora 2	α_2
4			Ugaoni položaj interceptora 3	α_3
5			Ugaoni položaj interceptora 4	α_4
6			Zajednički " -- " kraj	--
7			Struja pokretača 1	I_1
8			Struja pokretača 2	I_2
9			Struja pokretača 3	I_3
10			Struja pokretača 4	I_4
11			Komandni napon pokretača 1,3	U_1
12			Komandni napon pokretača 2,4	U_2

Različite komande φ_s i φ_{sr} se zadaju GIK-u iz računara PC/AT 486/33 MHz, preko RS kompatibilnog interfejsa TS - 32-10. Za zadate vrednosti komande φ_s i φ_{sr} , GIK generiše signale komande φ_1 i φ_2 i preko kliznih prstenova k_1 šalje u blok elektronike aktuatora sistema sa UVP. Ugaoni položaji interceptora $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ i α_4 se mere potencimetrima i preko kliznih prstenova k_2 , zajedno sa strujama pokretača I_1, I_2, I_3 i I_4 preko A/D konvertora registruju računarom $\mu VAX II$. U tabeli 1 su date veličine, koje se preko kliznih prstenova, dovode i odvođe sa H-tela.

Rezultat merenja ugaonog položaja i ugaone brzine

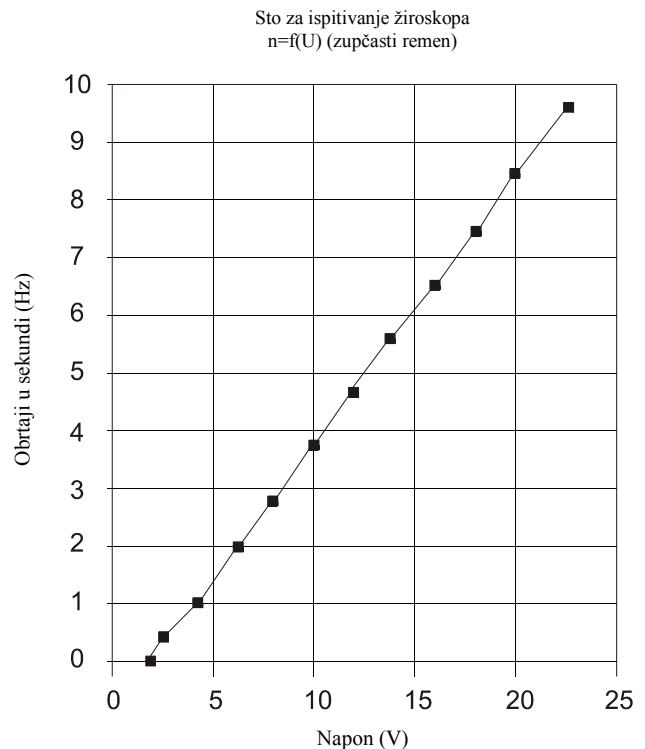
Ugaona brzina H-tela (sl.3) se kontroliše naponom sa D/A konvertora računara PDP 11/34 koji se dovodi na ulaz brzinskog servomotora koji rotira opitni sto sa H-telom. Opitni sto ima jedan stepen slobode, rotaciju oko podužne ose H-tela. Kao što je pomenuto u tački 3, ugaoni položaj i ugaona brzina se mere induktivnim davačima sa obe strane H-tela. Ispred induktivnog davača 1 (označeno sa P sa leve strane H-tela na sl.3) nalazi se prsten sa metalnim pinovima na svakih 15° , a ispred induktivnog davača 2 (označeno sa $U_{\phi n}$ sa desne strane H-tela na sl.3) nalazi se samo jedan metalni pin na mestu koje je usvojeno za vertikalni položaj H-tela u smeru zemlje. Impulsi iz induktivnog davača 1 se uvode u integrator koji daje kontinualnu promenu broja obrtaja H-tela u Hz, u funkciju vremena, sl.4.



Slika 4. Rezultati merenja ugaonog položaja i ugaone brzine induktivnim davačima: a) impulsi vertikale b) grafik promene ugaone brzine c) signal žiroskopa

Na sl.4 (dijagram a) se vide impulsi vertikale iz induktivnog davača 2 na početku svake periode rotacije H-tela i kontinualna kriva promene ugaone brzine H-tela na izlazu iz integratora, sl.4 (dijagram b).

Rezultati baždarenja opitnog stola, broj obrtaja u [Hz] u funkciji napona u [V] na ulazu brzinskog servomotora su prikazani na sl.5. Konstanta baždarenja u [Hz/V] je dobijena kao nagib baždarene prave $k = tg\alpha$ povučene metodom najmanjih kvadrata između baždarenih tačaka.



Slika 5. Rezultati baždarenja opitnog stola

Rezultati merenja ugaonog položaja i ugaone brzine slobodnim žiroskopom su prikazani na sl.4 (dijagram c). Opis rada žiroskopa i način merenja su prikazani u [1].

Ocena tačnosti merenja žiroskopom se vrši upoređivanjem signala sa sl.4 (dijagram c) sa signalima sa sl.4 (dijagram a i dijagram b). Pravac i smer vertikale žiroskopa je usaglašen sa vertikalom koja je definisana položajem

metalnog pina ispred induktivnog davača 2. Vertikalna žiroskopa odgovara negativnom impulsu na sl.4 (dijagram c), a sedam pozitivnih impulsa po periodi odgovara ugaonim položajima H-tela na svakih 45° . Ugaona brzina izračunata na osnovu ugaonog položaja izmerenog žiroskopom se slaže sa ugaonom brzinom H-tela izmerenom induktivnim davačem 1 i integratorom u granicama relativne greške od $\pm 0,1\%$, pri čemu je druga metoda uzeta za referentnu.

Ugaoni položaj se meri žiroskopom sa rezolucijom od 45° , ali se po potrebi može odrediti ugaoni položaj H-tela i sa rezolucijom od $0,5^\circ$, obzirom da je poznata promena ugaone brzine.

Rezultati ispitivanja GIK-a bez sistema za UVP

Ovo ispitivanje se vrši u cilju provere programa rada GIK-a, [1], koji generiše komande i preko mikrokabla šalje sistemu za UVP ka raketi koji ih izvršava.

Ova ispitivanja obuhvataju:

1. Korekcije komandi :

- kompenzaciju zemljine teže,
- ograničenje i korekciju vertikalne komande i
- odbacivanje premalih komandi i smanjenje prevelikih komandi.

2. Računanje uglova φ_1 i φ_2 , kada treba uključiti odnosno isključiti izvršne organe sistema za UVP i njihove korekcije s obzirom na trenutni položaj rakete φ , koje obuhvata: izdavanje komande i računanje ugaonog položaja rakete.

Ako komanda može da se izvrši, poredi se trenutni ugaoni položaj rakete φ sa uglom φ_1 kada komandu treba započeti. Ako je $\varphi < \varphi_1$, čeka se da bude $\varphi = \varphi_1$ i komanda započinje. Komanda se završava kada je $\varphi = \varphi_2$. Ako je $\varphi > \varphi_2$, komanda odmah započinje i izvršava se samo deo željene komande, a potom izračunava nova vrednost ugla φ_2 , simetrična sa φ_1 u odnosu na željeni pravac komande, uzimajući u obzir kašnjenje sistema za UVP.

Nove komande se ne primaju u toku izvršenja zadate komande.

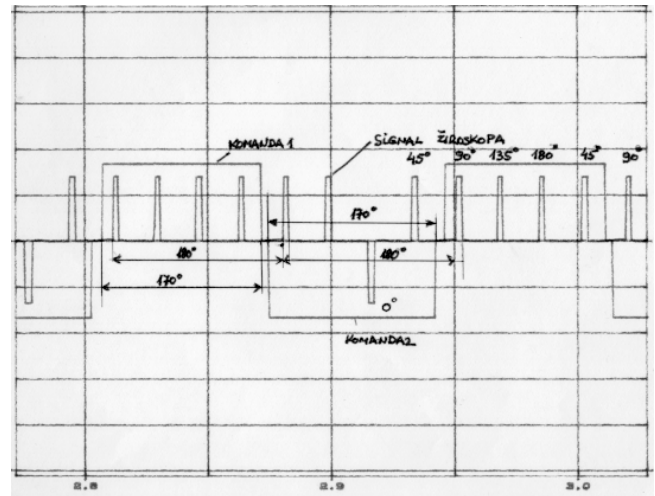
Za proveru rada GIK-a razvijen je poseban program koji, sa frekvencijom od 25 Hz, generiše komande na ulazu GIK-a, za promenljivu ugaonu brzinu rakete od 2 Hz do 15 Hz, i otkriva loše izvršene komande na izlazu iz GIK-a.

Ilustracije radi, na sl.6 je prikazan primer izvršenja nekoliko komandi:

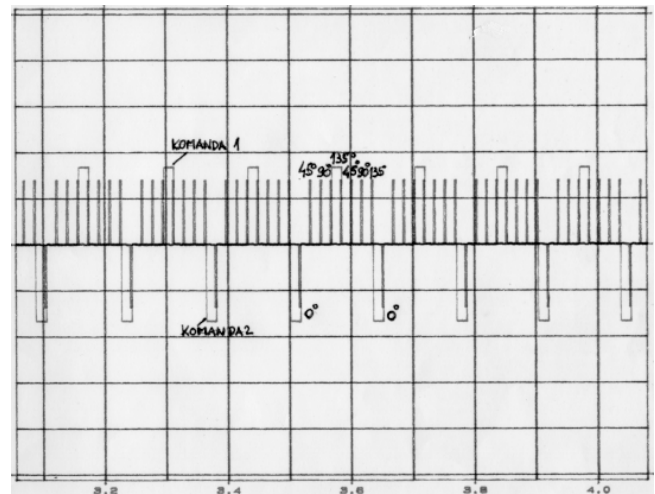
a) Na sl.6a je prikazan slučaj ograničenja vertikalne komande $\varphi_{sr} = 0^\circ$ i $\varphi_s = 180^\circ$ koja ima koeficijent jedan ($K=1$), na $K=9$ i $\varphi_s = 170^\circ$, pri čemu je izvršena korekcija komande u smislu njenog prednjačenja za 7 ms, zbog kašnjenja odziva sistema za UVP pri izvršenju komandi. Komandu za $\varphi_{sr} = 0^\circ$ izvršava prvi par interceptora, a za $\varphi_{sr} = 180^\circ$ drugi par interceptora sistema za UVP, [2], pri konstantnoj ugaonoj brzini 7,35 Hz. Pravac komande se meri u odnosu na signal žiroskopa. Prednja ivica negativnog impulsa označava vertikalnu (0°), a prednje ivice pozitivnih impulsa su na svakih 45° do kraja periode.

b) Na sl.6b su prikazane konstantne komande $\varphi_{sr} = 0^\circ$ i $\varphi_s = 45^\circ$ pri $\omega = 7,35$ Hz, koje imaju prednjačenje od 7 ms zbog kašnjenja odziva sistema za UVP.

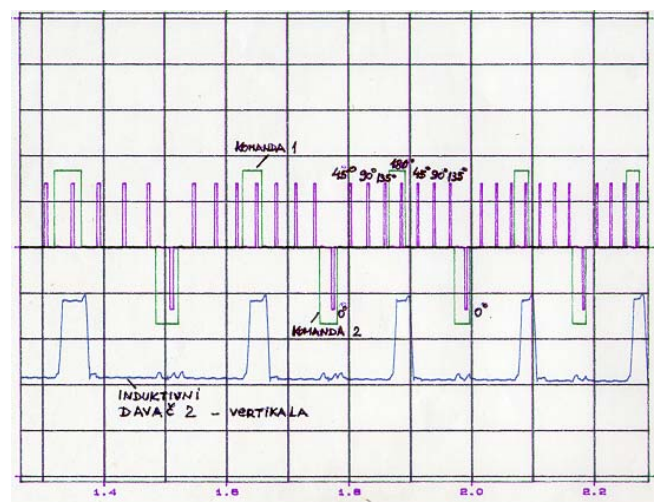
c) Na sl.6c su prikazane konstantne komande $\varphi_{sr} = 0^\circ$ i $\varphi_s = 45^\circ$ pri promenljivoj ugaonoj brzini koje imaju prednjačenje od 7 ms.



a)



b)



c)

Slika 6. Rezultati ispitivanja GIK-a: a) ograničenje vertikalne komande na $K=0,9$, pri $\omega=7,35$ Hz; b) $\varphi_{sr}=0^\circ$, $\varphi_s=45^\circ$, $\omega=7,35$ Hz; c) $\varphi_{sr}=0^\circ$, $\varphi_s=45^\circ$, ω promenljivo

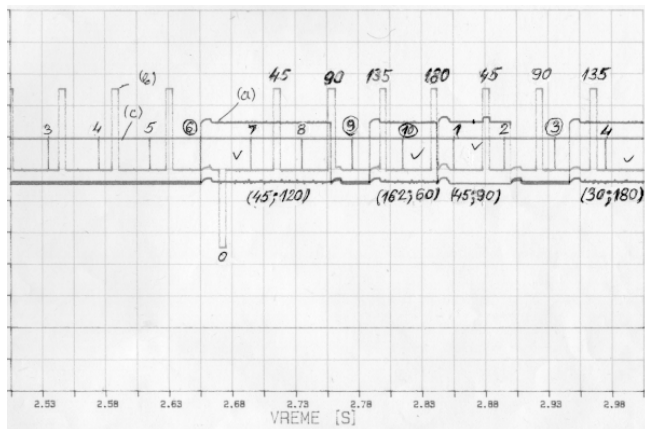
Rezultati ispitivanja GIK-a sa sistemom za UVP

Ispitivanje GIK-a sa sistemom za UVP se vrši u cilju provere da li su zadate komande na ulazu GIK-a zadržale pravac (φ_{sr}) i intenzitet (φ_s) kada ih izvršavaju interseptori sistema za UVP. Na izlazu iz GIK-a se vrši korekcija uglova uključenja i isključenja interseptora uzimajući u obzir vremena kašnjenja: signala od žiroskopa do GIK-a, signala od GIK-a do rakete i sistema za UVP. Kašnjenje signala od žiroskopa do GIK-a i od GIK-a do rakete je manje od 0,5 ms. Kašnjenje sistema za UVP pri izvršenju komandi iznosi oko 6,5 ms, [2], tako da ukupno prednjačenje zadatih komandi na izlazu iz GIK-a iznosi 7 ms.

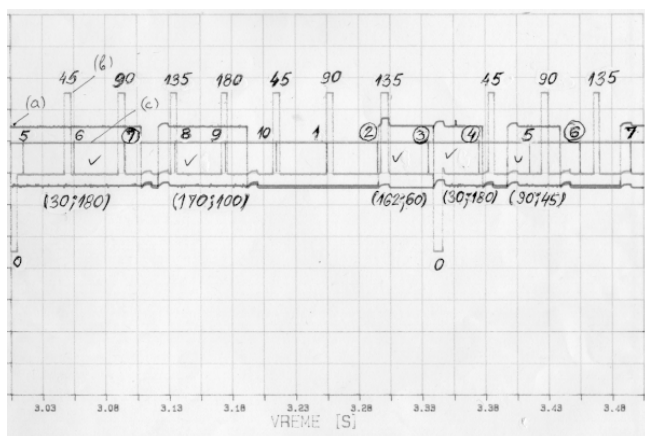
Komande koje sistem za UVP izvršava mere se potencimetrima na interseptorima i preko struja na aktuatorima interseptora, tabela 1.

Tabela 2. Komande na ulazu u GIK (φ_{sr} , φ_s) i komande na izlazu iz GIK-a (φ_1 , φ_2)

Red.br. merenja	φ_{sr} (°)	φ_s (°)	φ_1 (°)	$\varphi_{21-7\text{ ms}}$ (°)	φ_2 (°)	$\varphi_{21-7\text{ ms}}$ (°)
1	99	60	69	61,5	129	115,5
2	162	60	132	124,5	12	4,5
3	30	180	-55	-62,5	115	107,5
4	90	45	67,5	60	112,5	105
5	120	120	60	52,5	180	172,5
6	45	120	-15	-22,5	105	97,5
7	170	100	120	112,5	40	32,5
8	99	60	69	61,5	129	121,5
9	162	60	132	124,5	12	4,5
10	45	90	0	-7,5	90	91,5



a)



b)

Slika 7. Komande izmerene na interseptorima sistema za UVP: a) izmerene komande, b) signal žiroskopa, c) interapt komande

U tabeli 2 je dato 10 komandi koje se iz PC-486 i 16-bitnog paralelnog interfejsa (TS-16 - IO) u beskonačnoj petlji šalju na ulaz GIK-a. Na sl.7 su dati primeri izvršenih komandi koje su izmerene potencimetrima na interseptorima sistema za UVP. Radi lakše interpretacije rezultata merenja komande su izvršene pri konstantnoj rotaciji od 3 Hz. Na sl.7 su prikazane izvršene komande (φ_1 , φ_2), ugaoni položaj H-tela na signalu žiroskopa i interapt komande računara GIK-a sa periodom od 1 do 10.

Kada se uporede zadate komande iz tabele 2 i izvršene komande sa sl.7, vidi se da su komande izvršene u skladu sa programom rada GIK-a i kompenzacijom kašnjenja sistema za UVP.

Zaključak

GIK je blok elektronike u UVL koji izdaje komande i preko mikrokabla šalje ka sistemu za UVP.

Blok elektronike GIK-a je realizovan na tri štampane ploče čije su veze i napajanje ostvareni preko osnovne ploče i 64-kontaktnih DIN konektora. Na prvoj štampanoj ploči se nalaze CPU MC 68000, EPROM i RAM sa pripadajućim logičkim sklopovima. Na drugoj štampanoj ploči je realizovan 32-bitni paralelni interfejs za vezu sa računarnom lokatoru. Na trećoj štampanoj ploči su smešteni jedinica brojača, jedinica komandi i serijski interfejs sa translatorom nivoa.

Instalacija za ispitivanje GIK-a je razvijena radi provere: greške merenja ugla slobodnim žiroskopom i procene ugaone brzine, zadavanje komandi bez sistema za UVP i sa sistemom za UVP pri konstantnoj i promenljivoj ugaonoj brzini rakete.

Ugaona brzina je procenjena sa greškom manjom od 0,1%, a ugaoni položaj se može odrediti sa rezolucijom od 0,5°.

Provera programa rada GIK-a za računanje komandi, bez sistema za UVP, dala je dobre rezultate, a i korekcija komandi zbog kompenzacije kašnjenja sistema za UVP.

Literatura

- [1] KOBILAREV, M., LAZIĆ, R. Prilog upravljanju protivoklopnim raketama, *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.48, no.1, p.17-23.
- [2] KOBILAREV, M., BJELOGRLIĆ, Z. Identifikacija parametara snažnog sistema za upravljanje vektorom potiska protivoklopne rakete, *Naučnotehnički pregled*, 1999, vol.49, no.4, p.3-7.
- [3] KOBILAREV, M., i dr. *Protivoklopni raketni sistem za male daljine BUMBAR*. int. dok. VTI – 03-01-0311, Beograd, 1994.
- [4] MINOVIĆ, S. Odgovor laganorotirajućeg projektila na dejstvo upravljačke povorke širinsko-moduliranih impulsa. *Naučnotehnički pregled*, 1973, vol.23, no.8, p.3-24.
- [5] ČURČIN, M. *Izbor osnovnih raketodinamičkih veličina protivoklopne vođene rakete za male daljine BUMBAR*. int. dok. VTI – 03-01-0300, Beograd, 1993.
- [6] STEFANOVIĆ, A. i dr. *Eksperimentalno istraživanje izvršnog elementa sistema za upravljanje vektorom potiska – interseptora*. int. dok. VTI – 03-01-0228, Beograd, 1991.

Rad primljen: 4.9.2000.god.