

## MOGUĆNOSTI PRIMENE KAPACITIVNOG "SMART" AKCELEROMETRA ZA ISPITIVANJE U LETU

Gordana Mitrović, Dejan Pavlović, Dragan Lazić *Vazduhoplovni opitni centar, Batajnica*

**Sadržaj** - U radu su prikazani primeri korišćenih mernih pretvarača ubrzanja za ispitivanje vazduhoplova u letu, sa kratkim prikazom ispitivanih parametara. Zatim je dat prikaz novog "smart" akcelerometra i razmatrana je mogućnost njegove primene za ispitivanje u letu.

### 1. UVOD

U Vazduhoplovnom opitnom centru, prilikom ispitivanja u letu, mere se parametri vezani za ubrzanje, kako statički tako i dinamički. U tu svrhu koriste se različiti tipovi pretvarača ubrzanja. Savremeni razvoj doveo je do pojave nove generacije tzv. "smart" (pametnih) pretvarača, koji svojim karakteristikama omogućavaju širi dijapazon primene prilikom ispitivanja u letu.

### 2. PRETVARAČI UBRZANJA

Do sada su korišćeni klasični pretvarači ubrzanja potencijometriškog tipa, servo pretvarači i pretvarači sa piezo-otpornim elementima. Prva dva tipa se koriste za merenje jednosmernih (statičkih) ubrzanja, a treći se pored toga može koristiti i za merenje dinamičkih ubrzanja (vibracija).

#### 2.1. Potencijometriški pretvarač ubrzanja

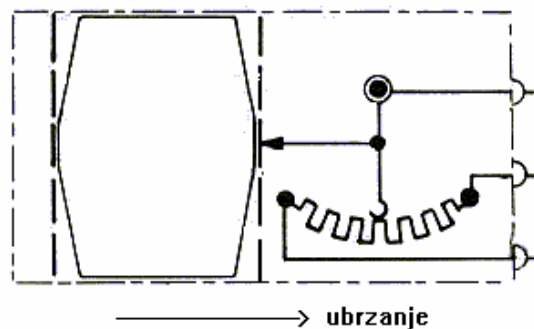
Rad ovih pretvarača zasnovan je na promeni izlaznog napona koji se menja linearno sa promenom jednosmernog (statičkog) ubrzanja primenjenog na pretvarač.

Merni element je masa postavljena na membrane. Merni pretvarač je potencijometar. Kod potencijometriškog mernog pretvarača ubrzanja, prilikom kružnog kretanja, usled centrifugalne sile, inercijalna masa se pomera prema obodu i povlačeći za sobom membranu, pomera klizač potencijometra, menjajući tako otpornost, odnosno. napon na izlazu. Nedostatak ovog mernog pretvarača je pomeranje težišta iz ravnotežne tačke, prilikom kružnog kretanja. Time se rastojanje težišta od centra povećava, pa pri nekoj konstantnoj ugaonoj brzini pokazuje veću vrednost ubrzanja.

Korišćeni merni pretvarači su tipa J 42\*1, firme SFIM, za merne opsege od  $\pm 0,6$  g do  $\pm 24$  g i sa dozvoljenom greškom izlaznog napona od  $\pm 0,5$  % od pune skale i greškom linearnosti  $\pm 0,5$  % od pune skale. Oznaka "g" predstavlja ubrzanje zemljine teže  $g = 980607 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  [1].

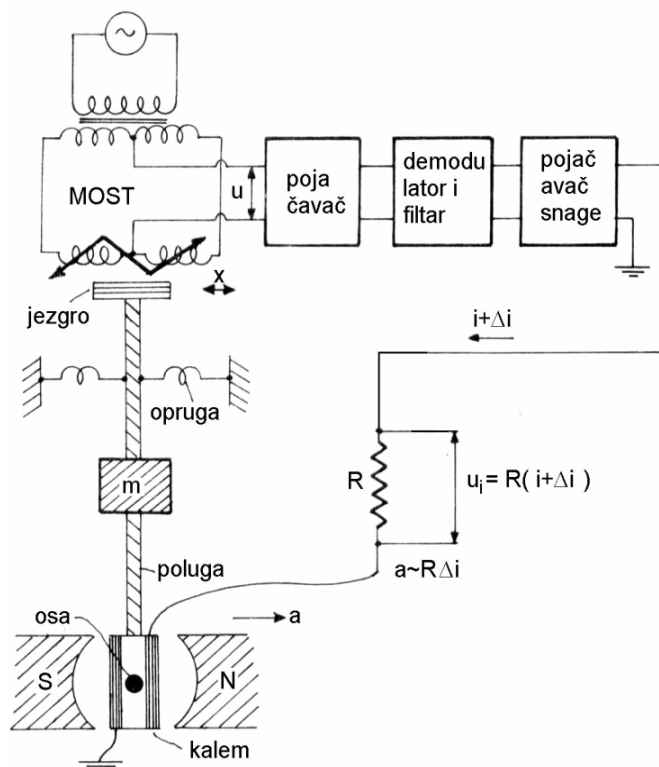
U daljem tekstu kao mera za ubrzanje biće korišćeno ubrzanje zemljine teže "g", što je uobičajeno u

vazduhoplovstvu. Blok šema jednog tipičnog mernog pretvarača ovoga tipa data je na slici 1.



Sl.1 Potencijometriški pretvarač ubrzanja

#### 2.2 Servo- akcelerometar



Sl.2 Servo-akcelerometar

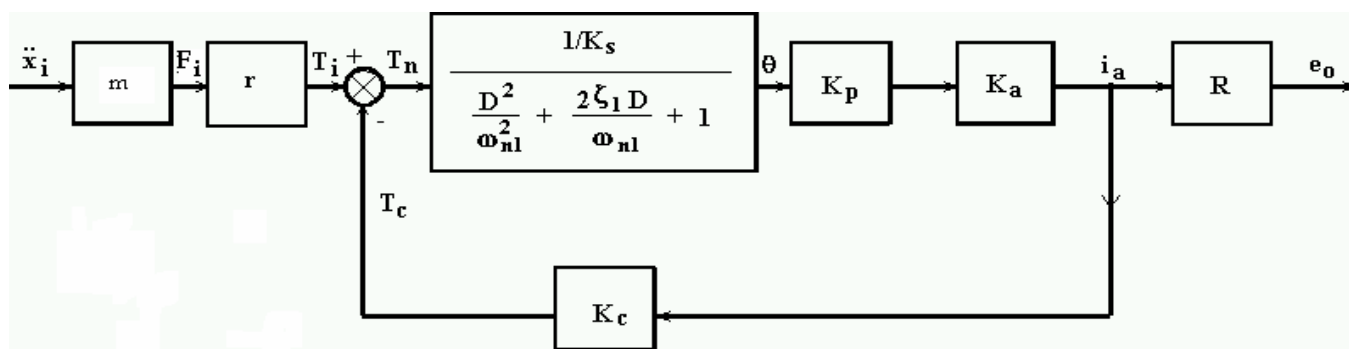
Servo-akcelerometar (vidi sl.2)[2] radi na principu povratne sprege za održavanje težišta u ravnotežnom položaju, pa se inercijalna masa "m", koja teži da se pomeri pod uticajem ubrzanja, održava u nultom položaju.

Rad akcelerometra baziran je na principu ravnoteže momenata. Pokretni krak izveden iz ravnoteže pod uticajem ubrzanja, razvija moment. Rotacija kraka generiše električni signal koji se, posle pojačanja, dovodi na namotaj na pokretnom kraku. Na njemu se, u ravnoteži, razvija moment jednak ali suprotnog smera od početnog mehaničkog momenta. Struja, koju generiše rezultatni moment, je proporcionalna vrednosti ubrzanja. Ova struja protiče kroz otpornik. Napon na krajevima otpornika vodi se na ulaz operacionog pojačavača postavljenog kao nisko-propusni filter, čiji je propusni opseg podešen na željenu vrednost.

Ovakav sistem eliminiše greške koje se, kod konvencionalnih uređaja, javljaju zbog histerezisa i nelinearnosti opruga.

Ova povratna sila igra istu ulogu kao mehanička sila opruge kod konvencionalnih akcelerometara, kao da je mehanička opruga zamenjena "električnom".

Kada bi detaljno analizirali međusobni uticaj svih postojećih mehaničkih i električnih elemenata mogli bismo servo-akcelerometar prikazati sledećom blok-šemom na slici 3:



Sl. 3 Blok šema servo-akcelerometra

$$\omega_{n1} = \sqrt{K_s/J}$$

$$\zeta_1 = B/2 \sqrt{K_s/J}$$

$x_i$  - ubrzanje

$m$  - masa

$F_i$  - sila inercije

$r$  - rastojanje mase od ose obrtanja

$J$  - moment inercije

$T_i$  - moment inercijalne sile

$T_n = T_i - T_c$  - rezultatni moment

$K_s$  - koeficijent krutosti opruge

$$D = i\omega, i = \sqrt{-1}$$

$\omega$  - ugaona brzina prigušenih oscilacija

$\omega_{n1}$  - ugaona brzina neprigušenih oscilacija

$\zeta_1$  - koeficijent prigušenja oscilacija

(obično oko 0.6 do 0.7)

$\theta$  - ugao skretanja inercijalne mase zbog ubrzanja

$K_p$  - prenosna funkcija senzora pomeraja

$K_a$  - prenosna funkcija pojačavača

$i_a$  - jačina struje posle pojačavača proporcionalna ubrzanju

$R$  - otpornik

$e_o$  - izlazni napon

$K_c$  - prenosna funkcija pretvaranja struje u elektromagnetni moment skretanja

$T_c$  - elektromagnetni moment

Analizom blok-šeme dolazimo do detalja o performansama a navedena prenosna funkcija servo-akcelerometra može se izraziti strujnom jednačinom (1)

$$\left(mrx_i - \frac{e_o K_c}{R}\right) \frac{\frac{K_p K_a}{K_s}}{\frac{D^2}{\omega_{n1}^2} + \frac{2\zeta_1 D}{\omega_{n1}} + 1} = \frac{e_o}{R} \quad (1)$$

Ovom jednačinom je izražena ravnoteža između izlazne struje i struje prouzrokovane razlikom momenata skretanja usled inercijalne sile i elektromagnetne sile. U samoj jednačini 1 [3] prvi izraz u zagradi je  $T_i$  - moment inercijalne sile, a drugi  $T_c$  - elektromagnetni moment. Izraz van zagrade odnosi se na proizvod tri prenosne funkcije od kojih prvi (najveći koeficijent u blok-šemi) rezultatni moment pretvara u ugao skretanja uzimajući u obzir viskozno prigušenje ( $B$ ), kružnu oprugu sa koeficijentom krutosti ( $K_s$ ) i dejstvo mase ( $m$ ).

Iz analize uticaja svih značajnih parametara, kao i mogućnosti praktičnog izvođenja, uz poštovanje navedenih uslova, može se zaključiti da su servo-akcelerometri, iako komplikovani po izvedbi, tačniji za merenje ubrzanja od potencijometarskih.

Korišćeni pretvarači su tip JT 21\*\*\*, firme SFIM, za merne opsege od  $\pm 5 \text{ m/s}^2$  do  $\pm 120 \text{ m/s}^2$  i sa dozvoljenim greškama linearnosti  $\pm 0.1 \%$  od pune skale i histerezisa  $\pm 0.05 \%$  od pune skale [1].

### 2.3 Piezo-rezistivni akcelerometar

Princip rada ove vrste mernih pretvarača ubrzanja se sastoji u pretvaranju relativnog pomeraja mase  $M$  u promenu otpornosti u dijagonali mernog piezorezistivnog mosta. Na slici 4 je data principijelna blok šema jednog piezo-rezistivnog akcelerometra. Sa  $x_0$  je označen relativni pomeraj mase  $M$  dok su apsolutni pomeraj kućišta i mase na istoj slici je označeni sa  $x_i$  i  $x_m$  respektivno. Sa  $K_s$  je označena krutost opruge a sa  $B$  viskozno prigušenje prigušnice sa tečnošću. Ukoliko za  $x_0$  odaberemo referentni položaj mase  $M$  tako da je  $x_0$  jednako nuli kada sila gravitacije (na masu  $M$ ) deluje statički duž "x" ose onda prenosnu funkciju ovog tipa mernih

pretvarača možemo izraziti u obliku jednačine (2)[3]. gde je u stvari izražen frekventni odziv koji je od primarnog interesa jer se ovi merni pretvarači prvenstveno i koriste za merenje vibracija.

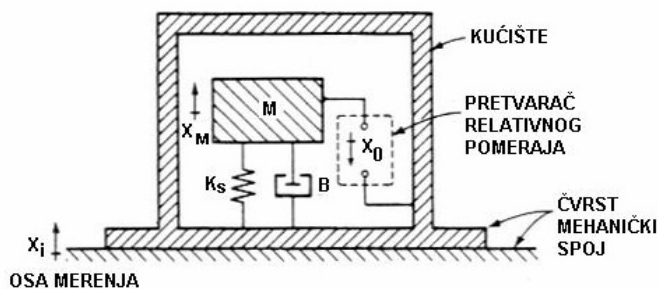
$$\frac{x_0}{x_i}(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left(\frac{j\omega}{\omega_n}\right)^2 + \frac{2\xi j\omega}{\omega_n} + 1} \quad (2)$$

gde su:

$$-\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M}}$$

$$-\xi = \frac{B}{2\sqrt{K_s M}}$$

Kao tipičan predstavnik piezo-rezistivnih akcelerometara možemo uzeti tip JS505-\*, koji kao osetljivi element imaju električni most sastavljen od piezo-rezistivnih mernih traka koje se nalaze na nosaču određene elastičnosti koji ujedno ima i funkciju opruge sa slike 4.



Sl. 4 Principijelna šema piezo-rezistivnog akcelerometra

Ovaj tip mernih pretvarača ubrzanja ima sledeće karakteristike: merni opseg od  $\pm 2$  g, do  $\pm 50$  g (u zavisnosti od serije), greška linearnosti manja od 0.2% mernog opsega, greška histerezisa 0.3% mernog opsega, opseg izlaznog napona za dati merni opseg je  $\pm 50$  mV, napon napajanja 10 V[1]. Pored toga ovaj merni pretvarač ima malu poprečnu osetljivost tj osetljivost po osi normalnoj na osu merenja kao i zaštitu od preopterećenja koja sprečava oštećenje mernog pretvarača pri uticaju opterećenja koja su i do deset puta veća od normalnog opsega merenja.

Akcelerometri tipa JS 505-\* imaju sopstvenu rezonantnu učestanost od 100 Hz do 800 Hz i namenjeni su prvenstveno za merenje vibracija u opsegu od 0 Hz do 1 kHz [1], kao i za merenje sporopromenljivih ubrzanja.

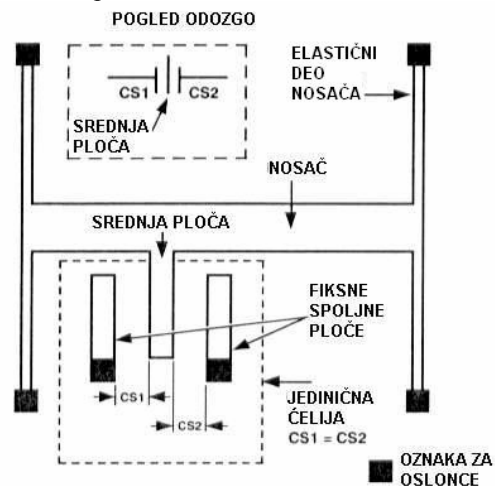
## 2.4 "Smart" akcelerometar

Takozvani "smart" ili "pametni" merni pretvarači ubrzanja serije ADXL50\* proizvođača "Analog Devices" kod kojih se kao osetljivi element koristi promenljiva kapacitivnost imaju sledeće karakteristike: merni opseg  $\pm 50$  g, osetljivost od 19mV/g, što za puni opseg merenja daje izlazni napon u rasponu od  $\pm 0.95$  V koji je temperaturno kompenzovan, grešku nelinearnosti 0.2 % od pune skale, napon napajanja +5 V[4].

Ovaj tip mernih pretvarača se proizvodi u obliku monolitnog integralnog kola koje sem napajanja, ne zahteva nikakve dodatne eksterne aktivne komponente za vezu sa bilo kojim A/D konvertorom. Upotrebom jednog spoljašnjeg otpornika može se menjati nivo nultog g ubrzanja, i izlazna osetljivost, dok se sa dva spoljna kondenzatora može menjati način filtriranja (sa jednim ili dva pola). Uprošćen izgled jednog osetljivog elementa u režimu mirovanja dat je na slici 5.

Stvarna struktura mernog pretvarača uključuje 42 jedinične ćelije koje se nalaze na zajedničkom nosaču. Diferencijalni kapacitivni senzor se sastoji od dve nezavisne fiksne ploče između kojih se nalazi centralna ili srednja ploča koja se otklanja zajedno sa nosačem pod uticajem ubrzanja. Nosač zajedno sa osloncima drži srednju ploču u položaju nulte vrednosti "g". Dve kapacitivnosti CS<sub>1</sub> i CS<sub>2</sub> su serijski povezane formirajući kapacitivni razdelnik sa zajedničkom pokretnom srednjom pločom.

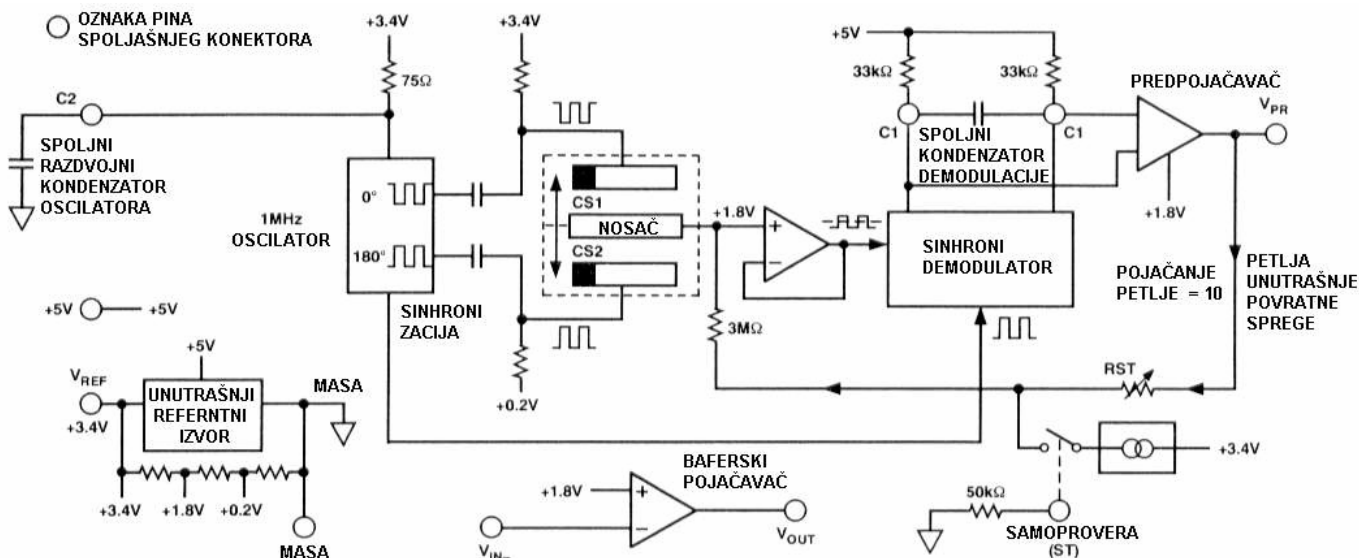
Fiksne ploče ove dve kapacitivnosti se napajaju sa pravougaonim impulsima podjednake amplitude, učestanosti 1 MHz ali fazno pomereni za 180°.



Sl. 5 Osetljivi kapacitivni element – jedinična ćelija mernog pretvarača

Kada je merni pretvarač u mirovanju onda su vrednosti dve kapacitivnosti jednake, te je naponski izlaz na srednjoj ploči nula volti. Kada dođe do kretanja mernog pretvarača, dolazi i do promene vrednost njegovih kapacitivnosti i stvaranja izlaznog signala na srednjoj ploči. Amplituda izlaznog signala raste sa porastom ubrzanja koje deluje na merni pretvarač. Informacija o smeru kretanja nosača sa srednjom pločom je sadržana u fazi signala pri čemu se koristi sinhrona demodulacija za izdvajanje te informacije. Uvek treba nastojati da se osa merenja ubrzanja poklapa sa osom merenja mernog pretvarača.

Na slici 6 je prikazana blok šema "smart" mernog pretvarača. Naponski izlaz sa srednje ploče se vodi na međustepen (bafer) a zatim na sinhroni demodulator.



Sl. 6 Blok šema kapacitivnog "smart" mernog pretvarača

Demodulator se takođe napaja sa pravougaonim signalom takta, učestanosti 1 MHz iz istog oscilatora koji napaja i fiksne površine osetljivog elementa-jedinične ćelije. Demodulator će izdvojiti bilo koji signal koji je sinhronizovan sa njegovim signalom takta i daće na svom izlazu pozitivan signal. Ukoliko je ulazni signal sinhronizovan ali suprotan za  $180^{\circ}$  po fazi izlaz demodulatora će biti negativan. Svi ostali signali će biti prigušeni. Eksternim kondenzatorom C1 se podešava propusni opseg demodulatora.

Izlazni signal iz demodulatora se vodi na prepojačavač koji se takođe napaja i referentnim naponom od 1.8 V. Izlaz iz prepojačavača se vodi preko kola povratne sprege koje u sebi sadrži otpornik od 3 MΩ, na srednju ploču osetljivog elementa. Napon korekcije koji je potreban da bi se srednja ploča osetljivog elementa elektrostatičkim putem držala u položaju nultog "g" je direktna mera primenjenog ubrzanja na merni pretvarač. Na izlazu iz prepojačavača je tako pri nultom ubrzanju "g" napon od 1.8 V koji se pri merenju ubrzanja u granicama  $\pm 50$  g menja u opsegu od  $\pm 0.95$  V i predstavlja izlazni napon mernog pretvarača.

Propusni opseg petlje povratne sprege korespondira sa vremenom potrebnim da povratna sprega počne da deluje na osetljivi element i on se može menjati spoljnim kondenzatorom C1. Odziv povratne sprege je dovoljno brz tako da se mogu propratiti promene nivoa ubrzanja do 1 KHz pa i preko toga ( do 2.25 KHz ). Sposobnost mernog pretvarača da održava ravan odziv unutar ovog opsega stvara privid nepomičnosti osetljivog elementa. Ova osobina u osnovi eliminiše efekat starenja koji utiče na mehaničku konstantu gipkosti nosača osetljivog elementa. Pored toga merni pretvarač ovog tipa ima i mogućnost samoprovere koja se vrši priključenjem TTL visokog naponskog nivoa ( $> 5$  V) na pin za samoproveru pri čemu se vrši otklon nosača osetljivog elementa koji je ravan uticaju ubrzanja od  $-50$  g. ( i to je potpuni otklon u stranu koja odgovara negativnoj polovini opsega merenja.).

### 3. ZAKLJUČAK

Potenciometerski i servo akcelerometri koji se koriste u ispitivanjima u letu su ograničeni svojom namenom tj. merenjem pretežno ubrzanja dok se piezo-rezistivni opet uglavnom koriste kod merenja vibracija. Za piezo-električne merne pretvarače se mora još obezbediti i kondicioner izlaznog signala za njegovo prilagođenje na ulaz A/D konvertora. Obzirom na najvažnije karakteristike četiri tipa mernih pretvarača koje su prethodno u tekstu navedene zaključak je da su "smart" merni pretvarači znatno pogodniji od ostalih za primenu u ispitivanjima u letu prvenstveno zbog veće osetljivosti, male greške nelinearnosti, bolje temperaturne kompenzacije u odnosu na piezo-električne i piezo-rezistivne merne pretvarače, kompenzacije uticaja starenja gipkih delova, odsustva dodatnih električnih kola kondicionera, mogućnosti samoprovere kao i zbog znatno većeg opsega merenja od  $\pm 50$  g, i izuzetno malih gabarita.

### LITERATURA

- [1] Katalog proizvođača "SFIM".
- [2] Stanković Dragan, "Fizičko tehnička merenja-merenje neelektričnih veličina električnim putem", 1987.
- [3] Ernest O. Doebelin, "Measurement Systems application and design", 1975.
- [4] Katalog proizvođača "Analog Devices".

**Abstract:** This paper gives the examples of used acceleration transducers in aircraft flight testing and short description of tested parameters. There is also presented new "smart" accelerometer and possibilities for it's usage in aircraft flight testing.

### POSSIBILITIES FOR CAPACITOR ACCELEROMETER USAGE IN AIRCRAFT FLIGHT TESTING

Gordana Mitrović, Dejan Pavlović, Dragan Lazić