

## REALIZACIJA BESPILOTNE LETELICE SA ČETIRI ELISE QUADCOPTER IMPLEMENTATION

Mladen Divac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – MEHATRONIKA

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je opisana analiza izrade bespilotne letelice sa četiri elise. Detaljan proračun pri izboru motora i propelera, potrebne elektronike, kao i diskusija o algoritmu koji je primenjen. Na kraju rada su data merenja kao i analize dobijenih rezultata.

**Ključne reči:** bespilotna letelica, motor, propeler

**Abstract** – In this paper the analysis of quadcopter described. Calculation of motors and propellers, required electronics and analysis of a modified algorithm is given. Measurement and analysis of results are given at the end.

**Keywords:** quadcopter, motors, propellers

### 1. UVOD

Razlog za izbor bespilotne letelice, pored svojih prednosti, jeste izazov i problemi sa kojima se susrećemo pre svega, jer su bespilotne letelice, ne-linearni, multivarijabilni sistemi sa 6 stepena slobode. Pošto poseduje samo 4 upravljačka ulaza, a 6 stepena slobode, sistem je teško kontrolisati zbog nestabilnosti.

Definicija bespilotne letelice je da su to mali avioni bez pilota. Mogu biti kontrolisane od strane čoveka, mogu biti potpuno autonomni gde sa njima upravlja računar. Najpre su korištene u vojnim istraživanjima, a od nedavno su dostupni i u civilne svrhe.

Prva interesovanja za razvoj bespilotnih letelica pokazale su SAD, u Prvom svetskom ratu [1].

Intenzivniji razvoj desio se 50 – tih godina, tokom Vijetnamskog rata, gde su ih SAD koristile da bi smanjile gubitak pilota prilikom nadgledanja neprijateljske teritorije. Tokom Zalivskog rata 1991. na bespilotne letelice su dodate i kamere [1].

Pored vojne upotrebe, bespilotne letelice se koriste i u civilne svrhe.

Poljoprivredne letelice u SAD već sada nadziru polja i snimaju useve. Bespilotne letelice koriste policija i spasilačke službe. Naučnici koji ispituju okeane više ne moraju da ogromnu količinu vremena provode na brodovima, a arheolozi mnogo lakše i jeftinije skeniraju zemljište infracrvenim senzorima, čime posao za koji bi im doskora trebalo nekoliko godina završe za samo nekoliko nedelja [1].

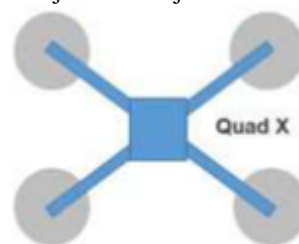
### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Jovan Bajić, docent.

### 2. MEHANIČKA KONSTRUKCIJA LETELICE

#### 2.1. Konstrukcija

Na slici 1 prikazan je osnovni model konstrukcija bespilotne letelice sa 4 elise. Bespilotna letelica ima 6 stepeni slobode, 3 translacije i 3 rotacije.

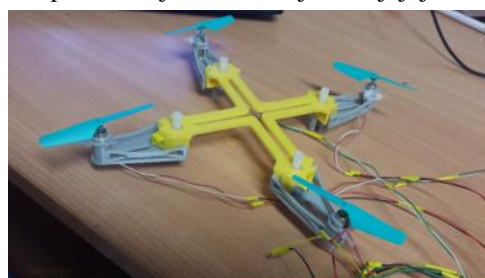


Slika 1. Model konstrukcija bespilotne letelice [1]

Model koji je izabran sastoji se od 4 motora na krajevima. Prednost ove konstrukcije je prilikom regulacije, gde akcelerometar možemo postaviti tako da x-osa bude postavljena ka motorima na jednom kraku, dok y-osa bude postavljena ka drugom kraju.

Prilikom modelovanja jedan od problema je problem ravnoteže, gde je potrebno da centar mase bude na sredini modela. Drugo problem je da letelica bude što lakša kako bi motori uspeali da podignu.

Na slici 2 prikazana je konstrukcija u krajnjoj fazi.



Slika 2. Konstrukcija letelice u završnoj fazi

#### 2.2. Proračun propelera i motora

Jedan od glavnih problema prilikom izbora propelera jeste taj što se on smatra sastavni deo motora, pa se njegov izbor vrši na osnovu izbora motora. Dve osnovne karakteristike propelera su prečnik i korak.

Prilikom izbora potrebnog propelera, u obzir se uzima kombinacije dve teorije, Teorija diska i Teorija elementarnog kraka [6].

Mane kod ove kombinacije jesu kompleksne jednačine, sa dvostrukim integralima i varijacijama aerodinamičkih koeficijenata, dužine propelera i ugla nagiba duž propelera. Pa je potrebno uvesti određene aproksimacije gde je:

- Ukupna sila potiska [6]:

$$T = \frac{\rho N_P C_{PR}}{4} \left( \frac{2}{3} C_{LT} - \alpha v_{3,ind} \right) v_T^2 \quad (1)$$

gde je :

$C_p$  - tetiva srednje linije i iznosi 0.75R

$C_{LT}$  - vrednost koeficijenta potiska pod konstantnim uglom nagiba.

$\alpha$  - nagib krive potiska

$v_t$  - tangentska komponenta brzine

$v_{3,ind}$  - brzina rotora

$\rho$  - gustina vazduha

$N_p$  - broj krakova propelera

$R$  - radijus propelera.

Ponašanje motora jednosmerne struje može se opisati preko dve fundamentalne jednačine koje su poznate kao jednačina obrtnog momenta i naponska jednačina [7]:

$$Q = K_g I \quad (2)$$

$$V = R_a I + K_e \omega \quad (3)$$

gde je:

$Q$  - obrtni moment koji stvara motor

$K_g$  - konstanta obrtnog momenta

$I$  - struja u kolu rotoru

$V$  - indukovani napon u rotoru zbog obrtanja u magnetnom polju rotora

$R_a$  - otpornost u kolu rotora

$K_e$  - naponska konstanta

$\omega$  - ugaona brzina obrtanja rotora motora

- Ukupna sila motora [6]:

$$F = -D_b e_v + m g e_d + \sum_{i=1}^4 (-T_i R_{Rib}, Z_{Ri}) \quad (4)$$

- Ukupan moment [6]:

$$M = \sum_{i=1}^4 (M_i + r_i (-T_i R_{Rib} Z_{Ri})) \quad (5)$$

gde je :

$D_b$  - sila otpora kretanja tela kroz vazduh,

$e_v$  - vektor pravca brzine,

$m$  - masa tela,

$g$  - konstanta gravitacije,

$e_d$  - jedinični vektor duž D - smeru u NED ,

$T_i$  - potisak proizveden sa  $i$  - tog rotora,

$R_{Rib}$  - matrica rotacije  $i$  - tog rotora,

$Z_{Ri}$  - osa duž koje deluje potisak  $i$  - tog rotora.

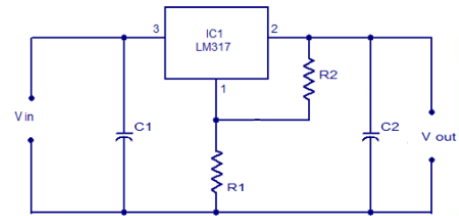
Formule koje su izvedene mogu se samo koristiti pri malom broju obrtaja rotora, gde uticaj aerodinamičkih efekata možemo zanemariti. U aerodinamici, postoje četiri efekta koja se uključuju u razmatranja prilikom modelovanja letelice.

Efekat nestabilnog protoka vazduha se može zanemariti, zbog toga što zavisi od propelera koje je moguće redizajnirati tako da se ovaj efekat dovede na minimuma. Ostala tri efekta su: ukupan potisak, nestabilan potisak i efekat "Blade Flapping" [6].

### 3. ELEKTRONSKI SISTEM LETELICE

#### 3.1 Regulator napona

Letelica se napaja sa izvora napajanja od 5V. Kako bi se zaštitio mikrokontroler od brzih promena ulaznog napona, na ulaz mikrokontrolera je povezan regulator napona LM317, šema regulatora data je na slici 3.



Slika 3. Šema regulatora napona LM317

Vrednost otpornika  $R_1, R_2$  iznosi  $240\Omega$  i  $720\Omega$ , dok vrednost kondenzatora  $C_1, C_2$  iznosi  $0.1\mu F$  i  $1\mu F$ . Problem sa ovim regulatorom što postoji određeni pad napona na njemu, negde oko 2V.

#### 3.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler koji se koristi u projektu je MINI-AT firme Mikroelektronika, koji poseduje mikroprocesor Atmega 328, razvojno okruženje MINI-AT može se videti na slici 4.



Slika 4. Razvojno okruženje MINI-AT[2]

Karakteristike mikrokontrolera MINI-AT [2]:

- Atmega 328 sa 32KB Flash, 2 KB RAM memorije
- USB – UART,
- тастер за ресет,
- LED индикатор,
- регулатор напона,
- SMD осцилатор од 16 MHz

#### 3.3 Senzor za orijentaciju u prostoru

Da bi se odredila pozicija letelice u prostoru, koristi se elektronski sklop koji u sebi poseduje troosni akcelerometar i troosni žiroskop, GY-521, sa čipom MPU6050. Na slici 5, prikazan je modul GY-521.



Slika 5. Modul GY-521[3]

Karakteristike modula GY-521 [3]:

- Napon napajanja: 3V-5V
- Komunikacija se odvija preko IIC magistale
- U poseduje 16-bitni A/D konvertor
- Troosni akcelerometar sa opsegom  $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g$  i  $\pm 16g$

Za potrebe IIC komunikacije potrebno je povezati pinove SCL (Serial Clock) i SDA (Serial Data) na portove za komunikaciju sa kontrolerom. Da bi očitavali vrednosti akcelerometra kao i žiroskopa sa senzora MPU6050, bilo je potrebno da se senzor poveže sa kontrolerom preko IIC magistrale.

IIC magistrala ima dve linije. Jednu za slanje podataka (SDA) i jednu za sinhronizaciju podataka clock signal (SCL). Koristi half duplex i može da ima više master i slejv uređaja [9].

Frekvencija uzorkovanja podataka sa senzora MPU6050 je 40 kHz. Pinovi na kontroleru preko kojih se vrši IIC komunikacija su A5(SCL) i A4 (SDA).

### 3.2 Drajveri za upravljanje motorom

Drajver koji se koristi je DRV8833. Na slici 6, možemo videti drajver DRV8833.



Slika 6. Drajver DRV8833[4]

Karakteristike drajvera DRV8833 [4]:

- Ulazni napod napon: do 5V,
- Izlazna struja: 1,2A po motoru, moguće je da na izlazu dobijemo i 2A u kratkom vremenskom intervalu do nekoliko sekundi,
- Zaštita od prekomerne struje i prekomerne temperature

Preko AIN1i AIN2, ulaznih pinova, kontrolišu se izlazni pinovi AOUT1 i AOUT2, dok preko ulaznih pinova BIN1 i BIN2, kontrolišu se izlazni pinovi BOUT1 i BOUT2. U tabeli 1 može se videti, kako se u odnosu na stanja ulaznih pinova, menjaju stanja izlaznih pinova.

Tabela 1. Promena stanja izlaza u zavisnosti od ulaza[4]

xIN1	xIN2	xOUT1	xOUT2	FUNCTION
0	0	Z	Z	Coast/fast decay
0	1	L	H	Reverse
1	0	H	L	Forward
1	1	L	L	Brake/slow decay

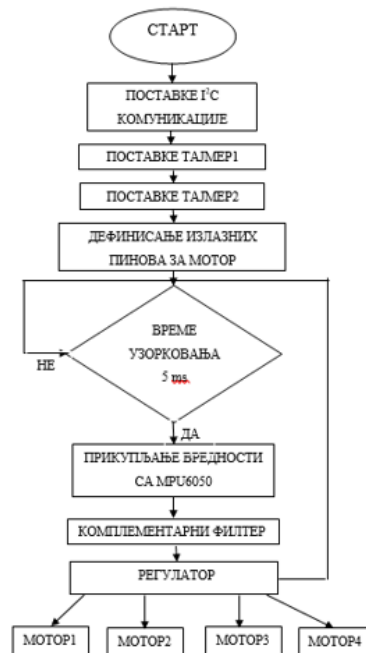
Na ulaze drajvera moguće je dovesti i PWM signale. U tabeli 2, može se videti, stanje H-mosta, u zavisnosti u ulaza na koje smo doveli PWM signal.

Tabela 2. Stanje H-mosta u zavisnosti od ulaza na koje smo doveli PWM signal[4]

xIN1	xIN2	FUNCTION
PWM	0	Forward PWM, fast decay
1	PWM	Forward PWM, slow decay
0	PWM	Reverse PWM, fast decay
PWM	1	Reverse PWM, slow decay

## 4. ALGORITAM RADA

Algoritam koji je implementiran dat je slici 6.



Slika 7. Algoritam rada bespilotne letelice

### 4.2 Komplementarni (Kalmanov) Filtar

Usled šuma prilikom očitavanja sa akcelerometra potrebno je izvršiti filtraciju signala. Prednost komplementarnog filtera jeste jednostavnost implementacije i kratko vreme izvođenja. Jednačina komplementarnog filtera [9].

$$\Theta(t) = \text{Gain} * (\Theta(t-\Delta t) + \omega(t) * dt) + (1 - \text{Gain}) * \varphi(t) \quad (8)$$

### 4.3 Regulator stabilnosti

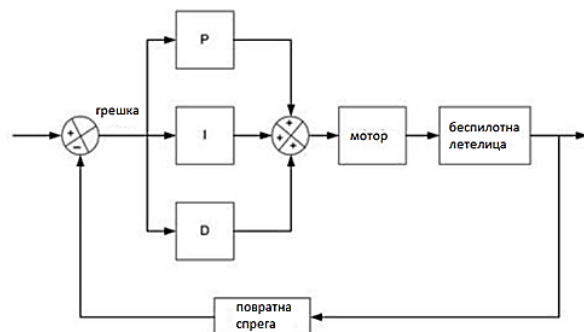
Dva najčešća tipa regulatora koji se mogu implementirati u bespilotnu letelicu:

- PID regulator,
- LQR regulator.

Glavni ciljevi koje PID regulator treba da ispuni su:

- Stabilnost sistema,
- Tačnost,
- Brzina odziva.

Na slici 8 dat je dijagram PID regulacije bespilotne letelice.

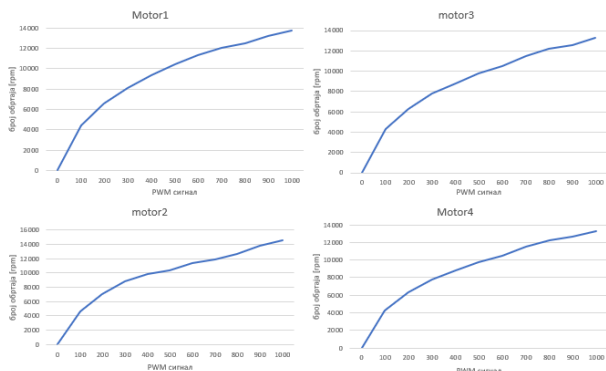


Slika 8. Dijagram PID regulacije bespilotne letelice

Da bi postojala bilo kakvu kontrolu na bespilotnom letelicom, mora imati mogućnost merenje izlaza senzora, u ovom slučaju to je senzor koji poseduje akcelerometar i žiroskop MPU6050, tako da se može proceniti greška (npr. koliko smo daleko od željenog ugla nagiba, koji iznosi nula stepeni).

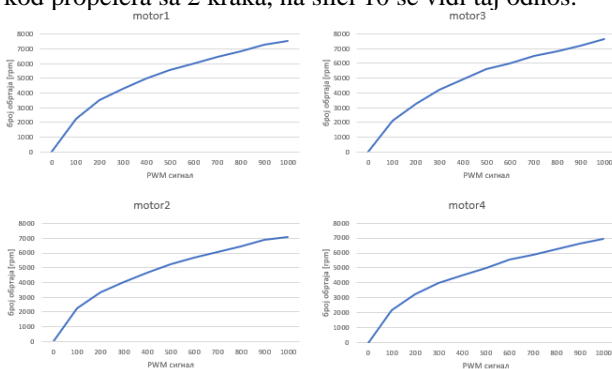
## 5. MERENJA I REZULTATI

Prilikom merenja trebalo je prikazati odnos broja obrtaja RPM i PWM signala koji se zadaje preko kontrolera. Prvo merenje se vrši sa propelerom sa 3 kraka. Na slici 9 se videti odnos RPM i PWM.



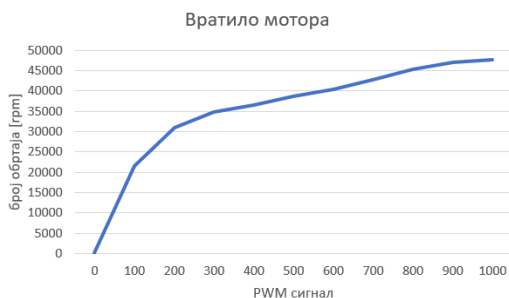
Slika 9. Odnos RPM i PWM kod propelera sa 3 kraka

Sledećim merenjem je trebalo utvrditi odnos RPM i PWM kod propelera sa 2 kraka, na slici 10 se vidi taj odnos.



Slika 10. Odnos RPM i PWM kod propelera sa 2 kraka

Poslednjim merenjem je trebalo utvrditi odnos RPM i PWM signala ko motora bez propelera, rezultati se mogu videti na slici 11.



Slika 11. Odnos RPM i PWM kod vratila motora

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena detaljna analiza bespilotne letelice sa 4 propelera. Na početku je analizirana mehanika letelice, prednosti i mane, kao i problemi koji se mogu javiti prilikom projektovanja, nakon toga, su date elektronske komponente koje su korištene u radi, zatim smo diskutovali o primenjenom algoritmu. Akcenat na rad treba staviti na sistem upravljanja, gde je pored PID regulacije, data kratka analiza o LQR regulatoru.

## 7. LITERATURA

- [1] Mohamed Nabil ElKholly „Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches”, Egypt, 2014.
- [2] <https://download.mikroe.com/documents/starter-boards/mini/avr/mini-at-manual-v102.pdf> (pristupljeno u julu 2018.)
- [3] <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (pristupljeno u julu 2018.)
- [4] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8833.pdf> (pristupljeno u julu 2018.)
- [5] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf> (pristupljeno u julu 2018.)
- [6] Duc Kien Phung „Conception, modeling, and control of a convertible mini-drone”, France, 2016.
- [7] dr Laslo Nadj „Primena senzora i aktuatora”, Novi Sad, 2016.
- [9] Nemanja Plavšić „Samobalansirajući robot“, Osijek, 2016.

### Kratka biografija:



**Mladen Divac** rođen u Prijepolju 1994 godine. Osnovne studije završio na Fakultetu tehničkih nauka, smer Mehatronika, 2017. godine.  
kontakt: divacmladen9@gmail.com