

Prednosti kombinacije PD i PID regulatora u odnosu na PID regulator na primeru upravljanja i stabilizacije kvadrokoptera

Milan Božić, Vladimir Rajs, Marko Vasiljević Toskić, Milan Bodić

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije

Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Novi Sad, Srbija

milan.bozic@uns.ac.rs, vladimir@uns.ac.rs, markovt@uns.ac.rs, milanbodid@uns.ac.rs

Sažetak— U ovom radu predstavljen je problem upravljanja i stabilizacije kvadrokoptera i jedno od rešenja poboljšanja klasičnog PID regulatora primenom kombinacije PID i PD regulatora. Dat je algoritam implementacije PID regulatora sa mogućnošću isključivanja integralnog dejstva regulatora tokom rada. Rezultati su dobijeni u simulacijama, a zatim i eksperimentalim putem testiranjem na razvojnom sistemu OROZ (kvadrokopteru) i data su poređenja jedne i druge metode upravljanja.

Ključne reči- Kvadrokopter; PID regulacija; PD regulacija;

I. UVOD

Razvoj letelica odavno predstavlja inženjerski izazov sa kojim su se susretali mnogi inženjeri tokom istorije. Najveći napredak u oblasti razvoja bespilotnih letelica, a samim tim i kvadrokoptera dogodio se krajem prošlog i početkom ovog veka i napredak je proizašao iz brzog razvoja tehnologije. Tokom razvoja, ove vrste letelica susrele su se sa velikim brojem problema koji direktno utiču na performanse letelice. Razvojem MEMS (eng. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) tehnologije početkom devedesetih godina [1] započeo je razvoj akcelerometara i žiroskopa koji su do tada bili usko grlo u razvoju kvadrokoptera. U isto vreme događa se i napredak u razvoju baterija kao i mikroprocesora što zajedno dovodi do prvih kako vojnih tako i komercijalno dostupnih letelica krajem XX veka. Kvadrokopteri predstavljaju podvrstu letelica na daljinsko upravljanje koji se odlikuju osobinom da sadrže četiri uzgonska motora čijim se upravljanjem vrši kretanje letelice. Iako ovo izgleda kao jednostavan problem veoma se komplikuje samom činjenicom da je šest stepeni slobode letelice potrebno upravljati sa četiri ulazna parametra tj. četiri brzine pogonskih motora. Kako je problem upravljanja kompleksan, nije moguće koristiti ON/OFF regulaciju pa je potrebno preći na neku sofisticiraniju metodu upravljanja kao što je PID regulator. Integralno dejstvo PID regulatora ima svoje pozitivne i negativne strane prilikom upravljanja kvadrokopterom i kombinacijom PD i PID regulatora ove mane se neutrališu.

U radu je predstavljen PID i PD regulator u diskretnom obliku i dat algoritam kombinacije PID i PD regulatora. Za potrebe istraživanja razvijena je platforma u vidu kvadrokoptera sa mikrokontrolerom STM32F103 na kome su vršeni

eksperimenti. Tokom istraživanja kvadrokopter je bio pričvršćen tako da mu je rotacija omogućena po jednom stepenu slobode.

II. PID I PD REGULATOR U DISKRETNOM OBLIKU

PID regulator u vremenskom domenu [2] predstavlja osnovu za implementaciju algoritma u digitalnom obliku. PID regulator u vremenskom domenu predstavljen je jednačinom (1).

$$u_c(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

Konverzijom (1) u Laplasov domen dobija se regulator pogodan za konverziju u Z domen. Jednačina (2) predstavlja Laplasovu transformaciju koja je izvedena u [2].

$$U_c(s) = \left[k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right] E(s) \quad (2)$$

Jednačina (3) predstavlja PID regulator u Z domenu koja je pogodna za implementaciju u digitalnom sistemu kao što je mikrokontroler. Jednačina (3) dobijena je metodom diskretizacije Euler II (korak unazad) koja je detaljno izvedena u radu [3].

$$u_k = u_{k-1} + \left(K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d}{T} \right) e_k + \left(-K_p + \frac{K_i T}{2} - \frac{2K_d}{T} \right) e_{k-1} + \frac{K_d}{T} e_{k-2} \quad (3)$$

U jednačini (3) u_k – izlazna veličina, u_{k-1} – prethodna vrednost izlazne veličine, e_k – trenutna greška, T – period uzorkovanja ulaznog signala, K_p , K_i , K_d – koeficijenti P, I i D regulatora redom.

Kada se prilikom diskretizacije zanemari I deo regulatora kako bi se dobilo PD regulator, dobija se jednačina (4).

$$u_k = K_p e_k + \frac{K_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \quad (4)$$

Jednačine (3) i (4) predstavljaju pogodnu predstavu jednačina regulatora za implementaciju u nekom programskom jeziku, a samim tim i u mikrokontroleru.

III. IMPLEMENTACIJA PID/PD REGULATORA

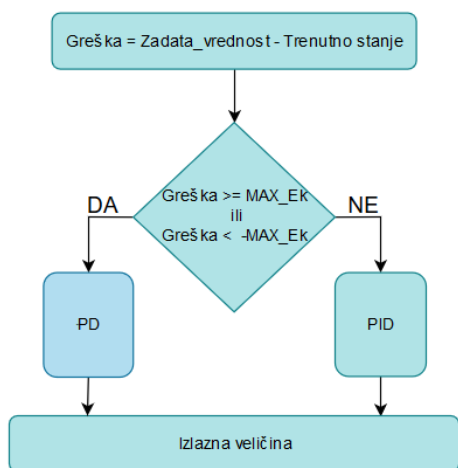
Kombinacija PID i PD regulatora moguća je na više načina. Zapravo, to je kriterijum za uključivanje/isključivanje I regulatora.

Kriterijum odstupanja od zadate vrednosti podrazumeva definisanje dozvoljene vrednosti razlike ulazne veličine od zadate veličine. Ako je razlika veća od definisane, I regulator se isključuje i izlazna veličina kontrolisana je isključivo PD regulatorom. U suprotnom I regulator se uključuje i izlazna veličina kontrolisana je PID regulatorom.

Kriterijumi za uključivanje/isključivanje I regulatora mogu biti različiti i treba ih birati u zavisnosti od konkretne situacije tj. sistema. Mogu zavisiti od ulazne veličine, izlazne veličine, vremena trajanja greške ili čak od neke sprege svega već pomenutog.

Korišćenjem nekih složenijih kriterijuma za uključivanje i isključivanje I regulatora bilo bi potrebno koristiti tajmere, ako bi se merilo vreme trajanja greške, ili brojače ako bi se brojao broj preskoka zadate veličine.

U ovom istraživanju za kriterijum je korišćen kriterijum odstupanja od zadate veličine i on je definisan vrednošću MAX_Ek , menjanjem ove vrednosti moguće je podešavati odnos rada regulatora u PID ili PD režimu. Pored ove veličine potrebno je podesiti Kp , Ki , Kd , parametre regulatora proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva, redom i uneti period uzorkovanja tj. parametar T kao i kod klasičnog PID regulatora. U konkretnom primeru vrednost MAX_Ek zadata je proizvoljno i iznosi 5% maksimalne moguće greške. Parametri Kp , Ki , Kd podešeni su ručno. Ovi parametri su ostali isti i pri testovima sa PID i sa PID/PD regulatorom čime se onemogućava njihov uticaj na upoređivanje ova dva regulatora.



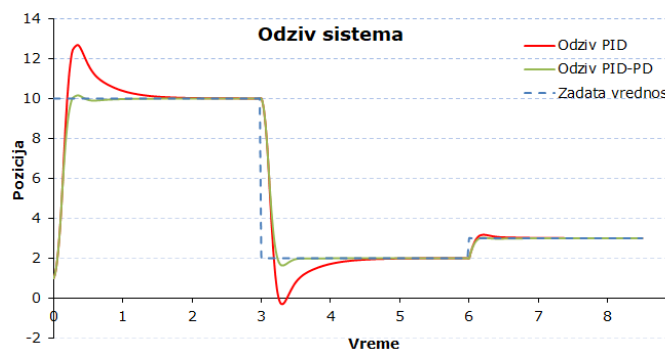
Slika 1. Algoritam rada PID/PD regulatora sa kriterijumom odstupanja od zadate vrednosti

Na slici 1. prikazan je algoritam rada kombinacije PID i PD regulatora sa kriterijumom odstupanja od zadate vrednosti.

Zadata vrednost (MAX_Ek) predstavlja vrednost koja je fiksna i unapred definisana. Pre svake iteracije izračunavanja vrši se provera da li je apsolutna greška veća od granične. Ako je uslov ispunjen onda je izlazna veličina kontrolisana PD regulatorom dok je u suprotnom kontrolisana PID regulatorom.

IV. REZULTATI SIMULACIJE

U Microsoft-ovom programskom alatu Excel napisan je model klasičnog PID regulatora i na isti sistem primenjen je PID u kombinaciji sa PD regulatorom kako bi se rezultati mogli uporediti.



Slika 2. Odziv sistema na PID (crvenom linijom) i PID u kombinaciji sa PD regulator (zelenom linijom)

Na slici 2. prikazan je odziv sistema klasičnog PID i PID-PD regulatora sa istim parametrima Kp , Ki , Kd . Pored toga prikazana je i zadata vrednost koju sistem treba da dostigne. Crvenom linijom predstavljen je klasičan PID regulator i vidi se da zbog velikog I dejstva postaje jako trom sistem koji se opire naglim promenama. Ovo se odražava i na veličinu preskoka zadate vrednosti i na trajanje dostizanja zadate vrednosti.

Zelenom linijom prikazan je PID u kombinaciji sa PD regulatorom i vidi se da njegov odziv znatno bolje dostiže zadatu vrednost. Nakon malog preskoka zadatu veličinu dostiže znatno brže i drži je kako za velike tako i za male promene zadate veličine.

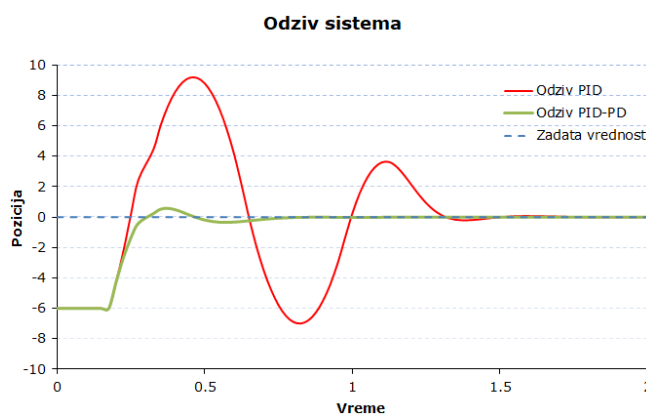
Na slici 3. prikazane su greške u odzivu sistema koje ostvaruju jedan i drugi regulator na istom sistemu. Jasno se uočava da su greške iste do trenutka dostizanja zadate vrednosti jer su u tim delovima i jednom i drugom regulatoru dominantno P i D dejstvo. Nakon dostizanja zadate vrednosti klasičan PID regulator nastavlja da napreduje zbog velike vrednosti I regulatora dok PID/PD regulator može mnogo bolje da isprati promenu jer je njegov I regulator uključen tek nekoliko iteracija petlje pre dostizanja zadate vrednosti. Ovo mu omogućava da uz mali prebačaj izlazne veličine u suprotnu stranu brzo dostigne zadatu vrednost.

Iako kombinacija regulatora dodaje još jednu veličinu koju je potrebno podešavati (MAX_Ek), to se opravdava rezultatima koje donosi ovakav koncept regulacije.



Slika 3. Greške u odzivu sistema sa PID (crvenom linijom) i PID u kombinaciji sa PD regulator (zelenom linijom)

Problem u regulaciji sa klasičnim PID regulatorom koji se javlja pri stabilizaciji kvadrokoptera dešava se pri poletanju. Kritično je vreme od trenutka uključivanja motora, a samim tim i početka rada PID regulatora, do trenutka odvajanja kvadrokoptera od podloge. Ovo vreme predstavlja interval u kome regulator nije u mogućnosti da svojim delovanjem ispravi grešku. Ako podloga za poletanje nije idealno ravna tada se javlja greška koja ulazi u regulator kako bi bila ispravljena. S obzirom na to da letelica još uvek stoji na podlozi, ta se greška zapravo ne može ispraviti i sabira se u I regulatoru. Ovo nakupljanje ima samo negativne strane jer tada I regulator postaje dominantan u sistemu i po inerciji sprečava brzu stabilizaciju sistema.



Slika 4. Odziv sistema nakon što je greška bila konstantna određeni vremenski interval

Na slici 4. prikazana je situacija u kojoj je greška konstantna određeni vremenski period, što se može poistovetiti sa kvadrokopterom koji se nalazi na krivoj podlozi, i nakon tog perioda greška počinje da se ispravlja što bi bio trenutak odvajanja kvadrokoptera od podloge.

Crvenom linijom prikazan je odziv PID sistema koji zbog jakog I dejstva, generisanog iz razloga što je sistem duže vreme bio u režimu greške, zaosciluje nakon „oslobađanja“ sistema što dovodi do oscilacija letelice koje nisu poželjne.

S druge strane zelenom linijom prikazan je odziv PID/PD regulatora koji nije akumulirao grešku i nakon odvajanja ima isti odziv kao da nije bilo blokiranja sistema.

V. RAZVOJNI SISTEM *OROZ* – KVADKOPTER

Razvojni sistem *Oroz* nastao je kao plod diplomskog (master) rada autora ovog rada Milana Božića. Sam razvojni sistem sadrži dve osnovne jedinice, kvadrokopter i daljinski upravljač. I jedna i druga komponenta sadrže *bluetooth* konekciju koja im omogućava povezivanje sa računarom bežičnim putem što je omogućilo da se podaci o trenutnom položaju u realnom vremenu proslede na računar i zatim prikažu na graficima.



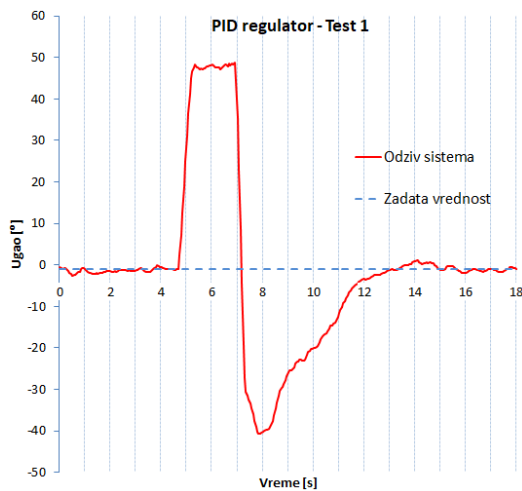
Slika 5. Razvojni sistem Oroz (kvadrokopter)

VI. REZULTATI SA KVADKOPTERA

Na razvojnem sistemu *Oroz* implementirani su algoritmi klasičnog PID i PID/PD regulatora kako bi se testovi simulacija uporedili sa testovima u praksi. Oba regulatora podvrgnuta su testovima.

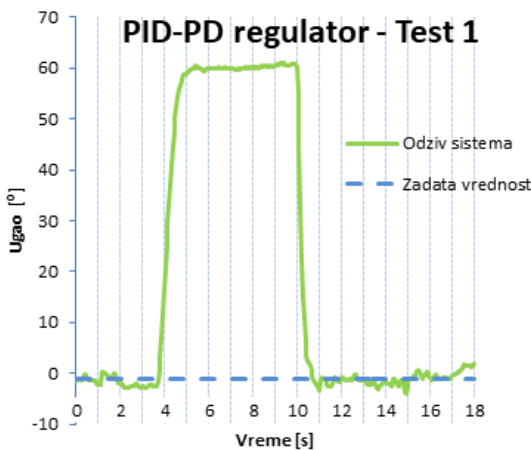
Prvi test podrazumeva stabilizaciju kvadrokoptera. Za fiksnu ulaznu veličinu prati se izlazna veličina, pri tom se letelica spoljašnjim uticajem dovede u stanje konstantne greške i u tom položaju se drži određeno vreme. Nakon toga se ukloni spoljašnji uticaj i prati se stabilizacija sistema na zadatu veličinu. Ovaj test simulira situaciju pred poletanje, kada regulator nije u stanju da ispravi grešku nakon čega sledi period letenja, gde regulator preuzima kontrolu.

Drugi test podrazumeva test upravljanja letelice. Menja se ulazna veličina tokom vremena i prati se izlazna veličina tj. položaj kvadrokoptera. Ovaj test ima za cilj da pokaže koliko dobro regulatori vrše upravljanje kretanjem kvadrokoptera.



Slika 6. Odziv sistema sa PID regulatorom sa testom stabilizacije (test 1)

Na slici 6. prikazan je odziv kvadrokoptera koji je upravljao klasičnim PID regulatorom. Sistem je podvrgnut testu 1. U vremenskom intervalu od pete do sedme sekunde, na sistem je delovala spoljašnja sila. Nakon toga sistemu je omogućeno da se stabilizuje na zadatu vrednost. Kao što se vidi sa grafika sistem se stabilizuje tek nakon ogromnog preskoka zadate veličine, i tek posle više od pet sekundi dostiže zadatu veličinu. Ovaj efekat javlja se kao posledica sabiranja I regulatora tokom trajanja spoljašnje sile.

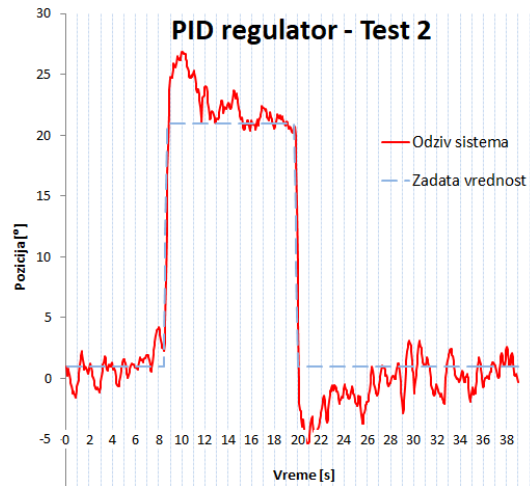


Slika 7. Odziv sistema sa PID-PD regulatorom sa testom stabilizacije (test 1)

Na slici 7. prikazan je odziv sistema sa kombinacijom PID i PD regulatora. Zadatu ulaznu vrednost je konstantna, sistem se nalazi u stabilnom stanju i spoljašnja sila dovodi ga u režim konstantne greške koji traje od četvrte do desete sekunde. Nakon toga uklonjena je spoljašnja sila i vidi se da je sistem bez dodatnih oscilacija i preskoka dostigao zadatu vrednost za razliku od klasičnog PID regulatora. Kao što je pokazano simulacijama, konkretan sistem je i dokazao da konstantna greška u kojoj se sistem može naći zbog delovanja spoljašnjih sila nema uticaja na PID/PD regulator.

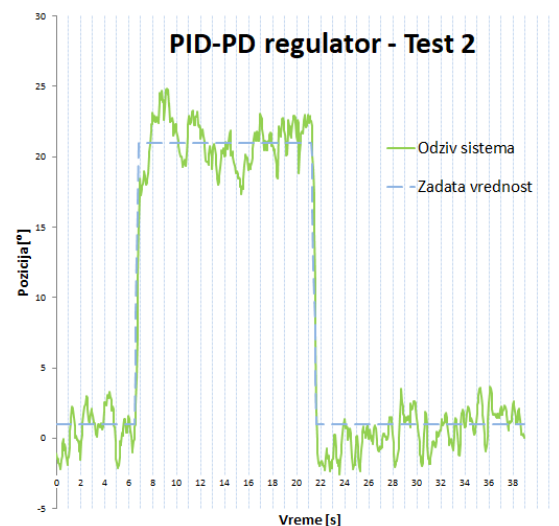
PID/PD regulator nije potpuno imun na spoljašnje sile. Ako se sistem dovede u stanje konstantne greške, a pri tom je greška

manja od kritične (MAX_Ek) u tom slučaju će sistem raditi u PID režimu i sabiranje I regulatora biće omogućeno. S obzirom na to da je tad greška mala uticaj I regulatora će biti smanjen iz tog razloga bitno je dobro izabrati vrednost MAX_Ek .



Slika 8. Odziv sistema sa PID regulatorom sa testom upravljanja (test 2)

Na slici 8. prikazan je odziv sistema na promenu zadate veličine. Ovo predstavlja test upravljanja kvadrokopterom iz razloga što se upravljanje vrši naginjanjem kvadrokoptera u zenuenom pravcu kretanja. Za klasičan PID regulator predstavljen na slici 8. vidi se da postoje preskoci nakon dostizanja zadatih veličina u trenutcima devet sekundi i 20 sekundi na vremenskoj skali.



Slika 9. Odziv sistema sa PID-PD regulatorom sa testom upravljanja (test 2)

Na slici 9. Prikazan je odziv PID/PD regulatora na testu 2. Za razliku od klasičnog PID regulatora kod ovog regulatora preskoci pri dostizanju zadate vrednosti nisu toliko izraženi.

S obzirom na to da su testovi vršeni u kontrolisanim uslovima, gde je kvadrokopter bio slobodan samo po jednoj osi rotacije,

vibracije koje su proizvodili propeleri u ovakvoj postavci, superponirale su se u sistem pa su direktno vidljive na odzivu sistema.

VII. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je jedan od načina poboljšanja klasičnog PID kontrolera kombinovanjem prednosti PD i PID regulatora. Date su jednačine regulatora u diskretnom obliku kao i algoritam implementacije u upravljačkoj jedinici sistema. Izvršene su simulacije proizvoljno izabranog sistema u *Excel* alatu. Na razvojnom sistemu *Oroz* testiran je i klasičan PID i verzija PID/PD regulatora. I jedan i drugi regulator radili su sa istim PID parametrima (K_p , K_i , K_d) kako bi upoređivanje koncepta ovakvog vida regulacije bilo relevantno.

ZAHVALNICA

Ovaj rad finansijski je podržan od strane Ministarstva za nauku Republike Srbije u okviru projekata pod brojem III 43008.

LITERATURA

- [1] Yilong Hao and Dacheng Zhang, "Silicon-based MEMS process and standardization," *Proceedings. 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, 2004.*, Beijing, China, 2004, pp. 1835-1838 vol.3.
- [2] Michael A. Johnson and Mohammad H. Moradi, *PID Control*, Springer-Verlag London Limited 2005.
- [3] C. S. Gohiya, S. S. Sadistap, S. A. Akbar and B. A. Botre, "Design and development of digital PID controller for DC motor drive system using embedded platform for mobile robot," *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Ghaziabad, 2013, pp. 52-55. doi: 10.1109/IAdCC.2013.6514193.
- [4] R. K. Megalingam, R. V. R. Raj, A. Masetti, T. Akhil, G. N. Chowdary and V. S. Naick, "Design and Implementation of an Arena for Testing and Evaluating Quadcopter," *2018 4th International Conference on*

Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India, 2018, pp. 1-7. doi: 10.1109/CCAA.2018.8777578

- [5] V. N. V. A. Sharma and M. Rajesh, "Building a quadcopter: An approach for an Autonomous Quadcopter," *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Bangalore, 2018, pp. 1252-1258. doi: 10.1109/ICACCI.2018.8554718
- [6] J. J. Castillo-Zamora, K. A. Camarillo-Gómez, G. I. Pérez-Soto and J. Rodríguez-Reséndiz, "Comparison of PD, PID and Sliding-Mode Position Controllers for V-Tail Quadcopter Stability," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38086-38096, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2851223
- [7] E. Paiva, J. Soto, J. Salinas and W. Ipanaque, "Modeling, simulation and implementation of a modified PID controller for stabilizing a quadcopter," *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, Curico, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778507

ABSTRACT

This paper presents the problem of control and stabilization of a quadcopter and one of the solutions for improving the classical PID controller using a combination of PID and PD controller. An algorithm for implementing a PID controller with the ability to switch off the integral effect of the controller during operation is given. The results were obtained in simulations and then experimentally by testing on the OROZ (quadcopter) development system and comparisons of the first and second management methods were given.

ADVANTAGES OF COMBINATION OF PD AND PID CONTROLLER OVER PID CONTROLLER IN THE EXAMPLE OF QUADCOPTER CONTROL AND STABILIZATION

Milan Božić, Vladimir Rajs, Marko Vasiljević Toskić, Milan Bodić