

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ И РЕГУЛАЦИЈА ПОЛОЖАЈА ПОГОНА СА МОТОРОМ  
ЈЕДНОСМЈЕРНЕ СТРУЈЕ****DESIGN AND POSITION CONTROL OF DC MOTOR DRIVE**Слађан Плавшић, Владимир Поповић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – Мехатроника, роботика и аутоматизација**

**Кратак садржај** – Главна тема овог рада је каскадна регулација положаја погона са мотором једносмјерне струје. Теоријски је извршена анализа математичког модела мотора једносмјерне струје и проучена је основна теорија аутоматског управљања у апликацији електромоторног погона. Извршена је анализа и одабир структуре регулатора за каскадну регулацију положаја као и синтеза регулационих петљи унутар дефинисане каскадне структуре. Верификација теоријских разматрања прво је извршена путем симулација у програмском пакету СИМУЛИНК, симулационог окружења МАТЛАБ. На крају извршена су релевантна експериментална тестирања на развијеном микропроцесорском систему.

**Кључне ријечи:** Мотор једносмјерне струје, регулација, каскадна регулација положаја, моделовање система

**Abstract** – The main topic of the paper is the cascaded structure of the servo drive with a DC motor. Theoretical framework including mathematical modeling of DC motor is given, as well as the theory regarding the automatic control of the DC drive. Analysis and synthesis of the control structure in DC servo drive is given to obtain the superior transient performances. Verification of the theoretical considerations is given by extensive simulation and experimental tests on the simulation model and microprocessor based system, respectively.

**Keywords:** Direct Current Motors, Cascade Position Control, System Modeling

**1. УВОД**

У раду је коришћен мотор једносмјерне струје (МЈС) са сталним магнетима у сврхе регулације положаја ротора. Коришћени мотор има занемариву динамику успостављања струје у односу на појаве у механичком систему, што ће се показати као веома битна карактеристика приликом пројектовања каскадне регулације положаја. Због предности у односу на остале врсте мотора, МЈС као објекат управљања и даље представља атрактиван извршни орган (актуатор), који се користи у оквиру апликација где се уграђују погони са сервомоторима, [1].

**НАПОМЕНА:**

Овај рад произтекао је из мастер рада, чији ментор је био доц. др Владимир Поповић

**2. УВОД У РЕГУЛИСАНЕ ЕЛЕКТРОМОТОРНЕ ПОГОНЕ**

Електромоторни погон (ЕМП) је електромеханички систем који електричну енергију из примарног извора на контролисани начин претвара у механички рад која се користи за покретање механичких оптерећења. Регулисани електромоторни погон (РЕМП) је ЕМП у коме су додате регулационе структуре, помоћу којих је могуће регулисати одговарајуће излазне величине. У зависности од примјене, у РЕМП је потребно регулисати: струју ротора/електромагнетни момент, брзину ротора и положај ротора, [1].

**2.1 МЈС као објекат управљања у РЕМП-У**

РЕМП са МЈС се може подјелити на два подсистема, механички и електрични подсистем. Механички подсистем обухвата све обртне дијелове укупног момента инерције сведеног на вратило мотора  $J_m$  који се обрћу механичком угаоном брзином  $\omega_m$ . Електромагнетном моменту мотора  $T_m$  супротставља се моменат оптерећења  $T_L$  као и моменат трења механичких делова, са коефицијентом трења  $B_m$ . Једначином 2.1 описана је динамика механичких појава МЈС:

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m(t) - (T_L(t) + B_m\omega_m(t)) \quad 2.1$$

Једначином 2.2 описан је електрични подсистем који се може посматрати као редно коло отпорника отпорности  $R_a$ , калема индуктивности  $L_a$  и електромоторне силе услед ротације  $e_b$ :

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) \quad 2.2$$

где су са  $u_a$  и  $i_a$  ефинисани напон и струја роторског намотаја (арматура).

Пребацавањем једначина 2.1 и 2.2 у  $s$  домен, и сређивањем у форми функције преноса, добијамо релације за струју и брзину:

$$\omega_m(s) = \frac{1/B_m}{1 + (J_m/B_m)s} T_m(s) - \frac{1/B_m}{1 + (J_m/B_m)s} T_L(s) \quad 2.3$$

$$i_a(s) = \frac{1/R_a}{1 + (L_a/R_a)s} u_a(s) - \frac{1/R_a}{1 + (L_a/R_a)s} e_b(s) \quad 2.4$$

Функција преноса између брзине и положаја гласи:

$$\theta_m(s) = \frac{1}{s} \omega_m(s) \quad 2.5$$

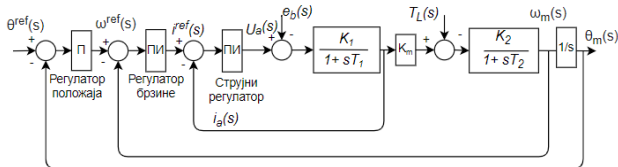
**3. КАСКАДНА РЕГУЛАЦИЈА ПОЛОЖАЈА МЈС**

Каскадна регулација је концепт где се конструише структура која се састоји од више регулационих петљи,

поређаних на хијерархијски начин. Унутрашња петља, на најнижем нивоу, са негативном повратном везом од струје мотора и регулатором струје, дјелује директно на мотор.

На следећем, вишем нивоу је надређена петља са повратном везом од брзине мотора и регулатором брзине, чији је излаз референтна вриједност за унутрашњу петљу по струји.

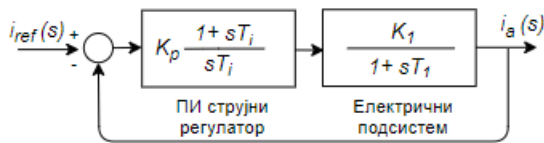
Главна и надређена петља је петља са повратном везом по положају ротора мотора и регулатором положаја, чији је излаз референтна вриједност за регулатор брзине, Сл. 1 [3].



Слика 1 Каскадна регулација положаја погона МЈС

### 3.1 Каскадна регулација положаја са унутрашњом струјном петљом

Блок дијаграм регулације струје ПИИ регулатором без уваженог кашњења погонског претварача приказан је на Сл. 2.



Слика 2 Регулација струје ПИИ регулатором

Пошто се ПИИ регулатором пропорционалног појачања  $K_p$  и времена реакције  $T_i$  ефикасно регулише систем првог реда, синтеза параметара регулатора се своди на компензацију доминантне временске константе  $T_i = T_1$ . Након поступка компензације, добија се еквивалентна функција спрегнутог преноса жељеног пропусног опсега  $\omega_{gr} = 1/T_{gr}$ :

$$W_s(s) = \frac{K_p K_1 / T_1}{s + K_p K_1 / T_1} = \frac{1}{1 + T_{gr} s} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}} \quad 3.1$$

Пропорционално и интегрално појачање се рачунају према једначини:

$$K_p = \frac{T_1}{T_{gr} K_1}, K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad 3.2$$

### 3.2 Каскадна регулација положаја са подређеним регулатором брзине

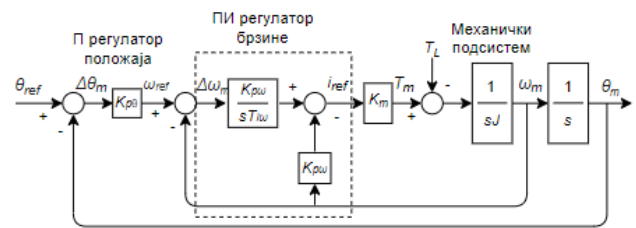
На Сл. 3 приказан је блок дијаграм каскадне регулације положаја са П регулатором и унутрашњим ПИИ регулатором брзине.

Надређена петља положаја обухвата унутрашњу петљу брзине, па функција отвореног преноса грешке положаја зависи од  $W_{s\omega}(s)$ ,

$$W_{o\theta}(s) = \frac{\theta_m(s)}{\Delta\theta_m(s)} = K_{p\theta} W_{s\omega}(s) \frac{1}{s}, \quad 3.3$$

а функција спрегнутог преноса положаја је,

$$W_{s\theta}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{p\theta}} s + \frac{T_{i\omega}}{K_{p\theta}} s^2 + \frac{T_{i\omega} J}{K_{p\omega} K_m K_{p\theta}} s^3} \quad 3.4$$



Слика 3 Регулација положаја са П регулатором положаја и ПИИ регулатором брзине

Постоји више метода за одређивање параметра  $K_{p\theta}$ ,  $K_{p\omega}$  и  $T_{i\omega}$  регулатора положаја и регулатора брзине. Оптимални начин да се параметри регулатора изабере јесте да сва три пола функције преноса буду једнаки, реални и негативни, [3], описано једначином 3.5:

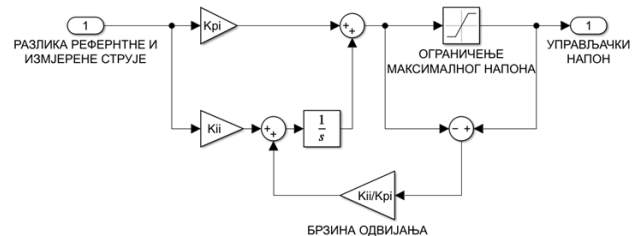
$$1 + \frac{1}{K_{p\theta}} s + \frac{T_{i\omega}}{K_{p\theta}} s^2 + \frac{T_{i\omega} J}{K_{p\omega} K_m K_{p\theta}} s^3 = 1 + s3T_h + s^23T_h^2 + s^3T_h^3 \quad 3.5$$

Решење једначине 3.5 је:

$$K_{p\theta} = \frac{1}{3T_h}, T_{i\omega} = T_h, K_{p\omega} = \frac{3J}{K_m T_h} \quad 3.6$$

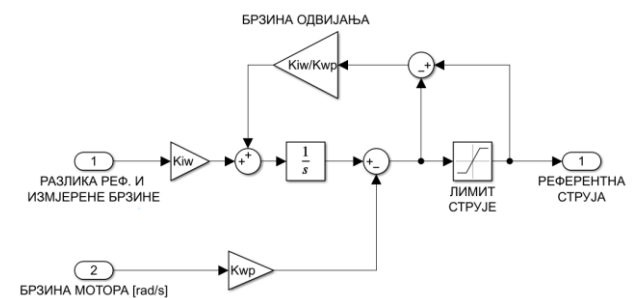
## 4. РАЗВОЈ И ПРОЈЕКТОВАЊЕ СИСТЕМА СИМУЛАЦИОНОМ ОКРУЖЕЊУ МАТЛАБ

У сврхе симулационих анализа, као актуатор коришћен је МЈС компаније Максон, ознаке DCX26L GB KL 12V. Овај мотор је дио модуларног система, који се још састоји од механичког редуктора са степеном редуције 21 и инкременталног енкодера за детекцију механичких координата положаја и брзине обртања, чија је резолуција 1024 импулса по кругу.



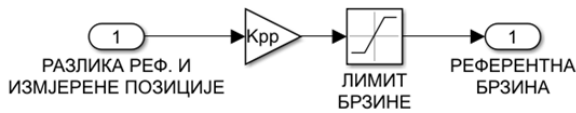
Слика 4. Реализација струјног ПИИ регулатора

Реализација ПИИ струјног регулатора и регулатора брзине са anti-wind-up структуром приказана је на Сл. 4 и 5, респективно. Структура за одмотавање интегралног дејства, AWU, (енгл. Anti Wind-Up) омогућава тренутан излазак регулатора из лимита у линеарни режим.



Слика 5 Реализација ПИИ регулатора брзине

На Сл. 6 приказана је надређена петља са П регулатором положаја.

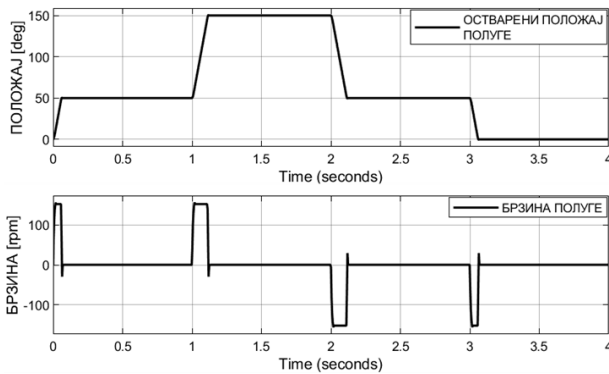


Слика 6. Реализација П регулатора положаја

#### 4.1 Резултати каскадне регулације положаја са унутрашњом струјном петљом

Синтеза параметара регулатора одрађена је према поглављу 3. Приликом синтезе параметара ПИ струјног регулатора усвојен је пропусни опсег  $\omega_{gr} = 15000 \text{ rad/s}$ , на основу којег се могу израчунати појачања  $K_{pi}$  и  $K_{ii}$ . Синтеза регулатора брзине и регулатора положаја, одрађена је према поступку који је описан у поглављу 3.2. Усвојена је доминантна временска константа  $T_h = 1.25 \text{ [ms]}$ , на основу које се добијају појачања  $K_{p\theta}$ ,  $K_{p\omega}$  и  $T_{i\omega}$ .

На Сл. 7 приказани су резултати регулације референтног положаја и одзив брзине, за случај када су уважени лимити регулационих величина.



Слика 7. Регулација референтног положаја и одзив брзине са унутрашњом струјном петљом

#### 4.2 Резултати каскадне регулације положаја без унутрашње струјне петље

Синтеза регулатора је одрађена као у поглављу 3.2, при чему је занемарена струјна петља. Како је динамика успостављања струје занемарена при анализи механичких појава, излаз из регулатора брзине представља референцу напона.

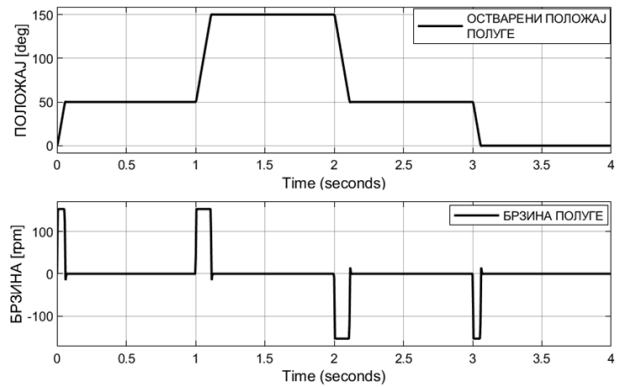
У складу са начелом каскадне регулације где је излаз референца струје ротора, извршено је рескалирање референце са појачањем  $R_a$ ,  $K_{p\omega} = 3J_{uk}/(K_m T_h R_a)$ . На Сл. 8 приказани су резултати регулације референтног положаја и одзив брзине, за случај када су уважени лимити регулационих величина.

На основу добијених резултата закључено је да нема потребе за унутрашњом струјном петљом и да се идентични резултати за коришћени мотор добијају и без струјне петље.

Добијени резултати показују да регулатор брзине улази у лимит, гдје у том случају регулатор ради у нелинераном режиму, при чему одзив зависи од момента оптерећења и инерције.

Ово неповољно утиче на перформансе система, јер може доћи до осцилација и пребачаја референтне величине.

Због овога је у наставку представљено рјешење са нелинераним П регулатором положаја.

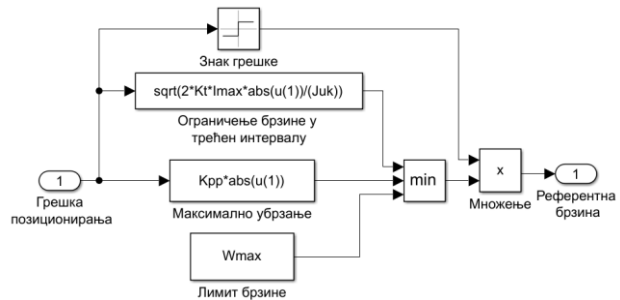


Слика 8. Регулација референтног положаја и одзив брзине без унутрашње струјне петље

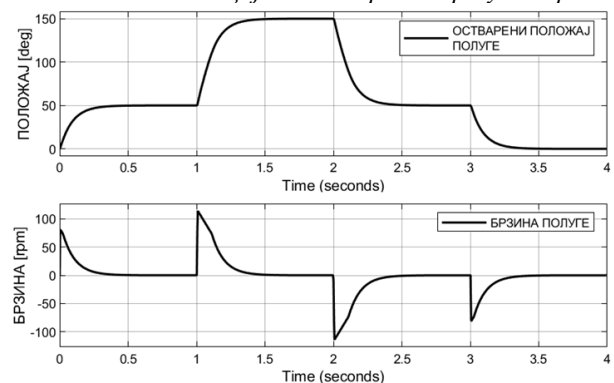
#### 4.2 Резултати каскадне регулације положаја без унутрашње струјне петље и са нелинераним П регулатором положаја

Нелинерани регулатор положаја задаје регулатору брзине референтну брзину у зависности од интервала у коме се налази. У I интервалу мотор убрзава максималним убрзањем, у II брзина се одржава на максималној, а у III интервалу, кочи максималним негативним моментом. Да би се добио аperiодичан одзив, неопходно је да на крају трећег интервала, у тренутку достизања референтног положаја, брзина буде једнака нули. [1] [2]

На Сл. 9 приказана је реализација нелинеарног П регулатора положаја у оквиру каскадне структуре.



Слика 9 Реализација нелинеарног П регулатора

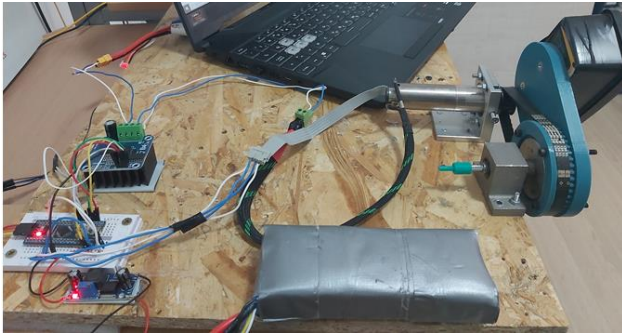


Слика 10. Регулација референтног положаја и одзив брзине са нелинераним П регулатором положаја

На Сл. 10 приказани су резултати добијени са нелинеарним П регулатором положаја. Резултати регулације показују да се добије аperiодичан одзив положаја ротора.

## 5. РЕЗУЛТАТИ ТЕСТИРАЊА ФИЗИЧКОГ СИСТЕМА

За потребе рада развијена је макета која симулира роботску руку са једним степеном слободе. На развијеној макети су вршена тестирања, како би се добијени резултати упоредили са резултатима добијеним путем рачунарских симулација у СИМУЛИНК програмском пакету. На Сл. 11 приказан је развијени систем са МЈС.

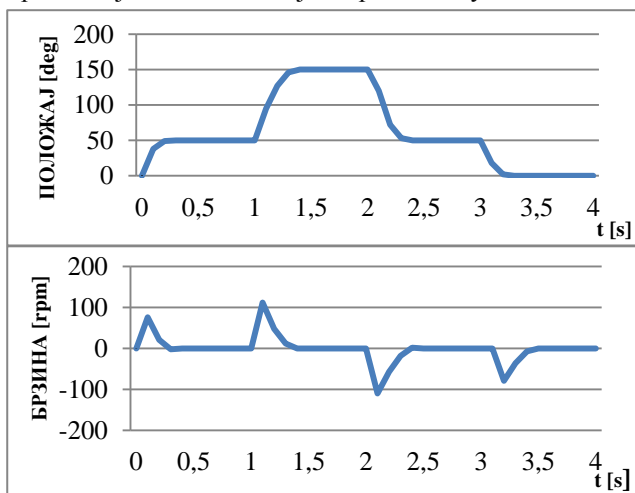


Слика 11. Развијена експериментална макета са МЈС

Програм за регулацију МЈС се извршава на STM32F103C8 микроконтролеру, који се налази на развојном окружењу "Blue Pill".

За претварач енергетске електронике коришћен је драјвер мотора са два полумоста ознаке BTS7960. Драјвер може да поднесе фреквенцију до 25 [kHz] и струју до 43 [A].

Развијен је C програм за каскадну регулацију положаја са нелинераним регулатором положаја. Синтеза регулатора урађена је у складу са разматрањима датим у поглављу 4, са разликом да је интегрално појачање регулатора брзине, прилагођено према усвојеној периоди одабирања брзинске петље, како би се интеграл у континуланом домену еквивалентирао сумом инкремената. На Сл. 12 приказан је одзив положаја и брзине полуге.



Слика 12. Одзив положаја и брзине полуге

## 6. ЗАКЉУЧАК

Приказани резултати показују да за серво МЈС снаге до 100W, каскадна регулација положаја без унутрашње струјне петље не деградира перформансе одзива у поређењу са структуром са унутрашњом струјном петљом.

У оба случаја постоји проблем уласка регулатора у лимит услед великих помјераја и поремећаја. Овај проблем рјешен је са нелинераним П регулатором положаја, који у зависности од вредности грешке угла, адаптира референцу брзине према нелинерном закону.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дарко Марчетић, Петар Матић, *Дигитално регулисани електромоторни погони*, Академска мисао, Београд, Електротехнички факултет, Бања Лука, 2020.
- [2] Слободан Вукосавић, *Дигитално управљање електричним погонима*, Академска мисао, Београд 2003.
- [3] Владан Вучковић, *Електрични погони*, Академска мисао, Београд 2002.

### Кратка биографија:



**Слађан Плавшић** рођен је у Добоју 1996. год. Дипломирао је 2019. год. на Факултету техничких наука, смијер Мехатроника, роботика и аутоматизација, на којем је исте године уписао и мастер студије.