

45. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

45th JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



**INOVACIONI CENTAR MAŠINSKOG FAKULTETA U BEOGRADU
UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

**THE INNOVATION CENTER OF THE FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING IN BELGRADE
UNIVERSITY OF BELGRADE, FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING**

Beograd, jun 2026.

45. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNIK RADOVA

Organizator i izdavač:

**INOVACIONI CENTAR MAŠINSKOG FAKULTETA U BEOGRADU
UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

Adresa:

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Tel: 011/3370341, Fax: 011/3370364

El. pošta: jupiter@mas.bg.ac.rs

Za izdavača: Dekan, dr Vladimir Popović, red. prof.

Urednik: dr Nebojša Manić, red. prof., Predsednik komisije za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta u Beogradu

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta i Dekan Mašinskog fakulteta

Odlukom br. 11/2026 od 26.05.2026.

Tehnički urednici:

Prof. dr Saša Živanović

Prof. dr Miloš Pjević

Doc. dr Dušan Nedeljković

Lazar Matijašević, mast. inž. maš.

Beograd, jun 2026.

ISBN 978-86-6060-250-5

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 2

Janjić, M.

KOMPARATIVNA ANALIZA ALGORITAMA VJEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA U
MODELIRANJU SILE KOVANJA 3.67

Janković, D.

MODEL BUDUĆEG AUTOMATIZOVANOG PALETNOG SISTEMA U PROIZVODNJI
ALATA U KOMPANIJI INMOLD 3.75

Madić, M., Janković, P., Petković, D., Đorđević, N., Mladenović, S.

ANALYSIS OF KERF WIDTH IN FIBER LASER CUTTING OF MILD STEEL S235JRG2 3.83

Marinković, D., Živković, A., Mladenović, C. Knežev, M., Antić, A.

OPTIMIZACIJA REŽIMA REZANJA PRI STRUGANJU PRIMENOM TAGUČI METODE:
ANALIZA HRAPAVOSTI POVRŠINE I ANOVA EVALUACIJA 3.88

Matijašević, L., Suvajac, Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.

PROJEKTOVANJE PODAKTUIRANOG ADAPTIVNOG ROBOTSKOG HVATAČA
ZASNOVANOG NA POLUŽNOM MEHANIZMU 3.94

Milutinović, M., Stamenović, M., Matić, N., Ugrinić, U.

UTICAJ HABANJA STRUGARSKOG NOŽA NA SILE REZANJA I POSTOJANOST PRI
OBRADI ČELIKA 42CRMO4 3.103

Milutinović, V., Suvajac, Ž., Matijašević, L., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.

SIMULACIJA RADA ELEKTROPNEUMATSKOG SISTEMA ZA MONTAŽU U
VIRTUELNOJ REALNOSTI 3.111

Момчиловић, Б., Славковић, Н., Живановић, С., Воркапић, Н.

КОНТРОЛЕР КРЕТАЊА ЧЕТВОРООСНОГ SCARA РОБОТА 3.118



Matijašević, L., Suvajac Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.¹⁾

PROJEKTOVANJE PODAKTUIRANOG ADAPTIVNOG ROBOTSKEG HVATAČA ZASNOVANOG NA POLUŽNOM MEHANIZMU²

Rezime

Robotski sistemi za hvatanje omogućavaju interakciju između robota i okruženja, odnosno između robota i objekata manipulacije različitih oblika, dimenzija i mase. Predstavljaju ključni element svakog robotskog sistema i njihovo unapređenje ima značajnu ulogu u razvoju moderne robotike. U ovom radu predstavljen je postupak projektovanja podaktuiranog robotskog hvatača zasnovanog na zglobnom četvorouglu. Polazna osnova je analiza kinematskog lanca hvatača na osnovu koje je izvršeno dimenzionisanje poluga, kao i projektovanje i izrada prototipa. U radu je prikazana eksperimentalna analiza pogonskog sistema zasnovanog na primeni pametnih servo motora. Razmatrane su mogućnosti i ograničenja korišćenja očitanih vrednosti pozicije i opterećenja motora u svrhu detekcije kontakta i regulacije hvatanja u razvijenom upravljačkom sistemu zasnovanom na diskretnim događajima.

Ključne reči: podaktuirani hvatač, pametan servo motor, zglobni četvorougao, diskretna stanja

1. UVOD

Industrijski roboti imaju široku primenu u savremenim proizvodnim procesima, naročito pri izvršavanju zadataka koji zahtevaju povišenu tačnost, ponovljivost i brzinu. Savremeni robotski sistemi uveliko prevazilaze čoveka kada su u pitanju ove karakteristike, međutim kada je reč o hvatanju i manipulaciji objekata različitih dimenzija, oblika i mehaničkih karakteristika ljudska šaka je i dalje neprevaziđena [1].

Tradicionalni robotski sistemi za hvatanje objekata najčešće su projektovani za rad sa predmetima poznate geometrije u jasno definisanom okruženju. Ovakav pristup izuzetno je efikasan u serijskoj proizvodnji kada se manipuliše istim ili sličnim predmetima. Međutim, kada je zahtev da se manipuliše objektima različitih oblika i dimenzija tradicionalni sistemi pokazuju nizak nivo fleksibilnosti i zahtevaju konstantna podešavanja i prilagođavanja [2]. Savremena paradigma masovne kastomizacije zahteva veliku prilagodljivost hvatača i zbog toga se razvoj fleksibilnih i adaptivnih sistema za hvatanje i manipulaciju postavlja kao jedan od ključnih pravaca razvoja savremene industrijske robotike.

Prednost adaptivnih robotskih sistema za manipulaciju objektima ogleda se u mogućnosti prilagođavanja obliku objekta tokom procesa hvatanja. Posebnu grupu adaptivnih robotskih hvatača predstavljaju podaktuirani hvatači kod kojih je broj aktuatora manji od broja stepeni slobode. Kod ovih sistema prilagođavanje objektu ostvaruje se primenom pasivnih elemenata i nije potrebno da se svaki zglob pokreće sopstvenim aktuatorom.

Zahvaljujući ovakvom principu rada, podaktuirani hvatači imaju jednostavniju konstrukciju i upravljanje u odnosu na potpuno aktuirane robotske hvatače. Prilikom kontakta sa objektom jedan deo mehanizma prestaje sa kretanjem dok preostali delovi prsta nastavljaju kretanje i prilagođavaju se konturi objekta. Na taj način se ostvaruje stabilno hvatanje bez potrebe za složenim mehanizmima i algoritmima upravljanja.

Prema načinu aktucije, podaktuirani hvatači dele se na hvatače sa tetivama [3], sa krutim polugama [4] i

¹⁾ Lazar Matijašević, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (lmaticasevic@mas.bg.ac.rs), Živojin Suvajac, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zsuvajac@mas.bg.ac.rs), Doc. dr Dušan Nedeljković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs), Prof. dr Živana Jakovljević, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-34/2026-03/ 200105 od 05.02.2026. godine i ostvareni u okviru projekta Fonda za nauku Republike Srbije broj 17801, Cybersecurity of Motion Control Systems in Industry 4.0 - MCSecurity

hvatače sa kombinovanim sistemom aktucije [5]. Mehanizmi sa krutim polugama posebno su pogodni za primene u kojima su potrebni pouzdan prenos opterećenja, veća krutost i ponovljivost. U odnosu na aktuacione mehanizme sa tetivama, mehanizmi sa krutim polugama imaju jednostavniju kinematiku i omogućavaju efikasniji prenos momenta od aktuatora do kontaktnih površina prsta.

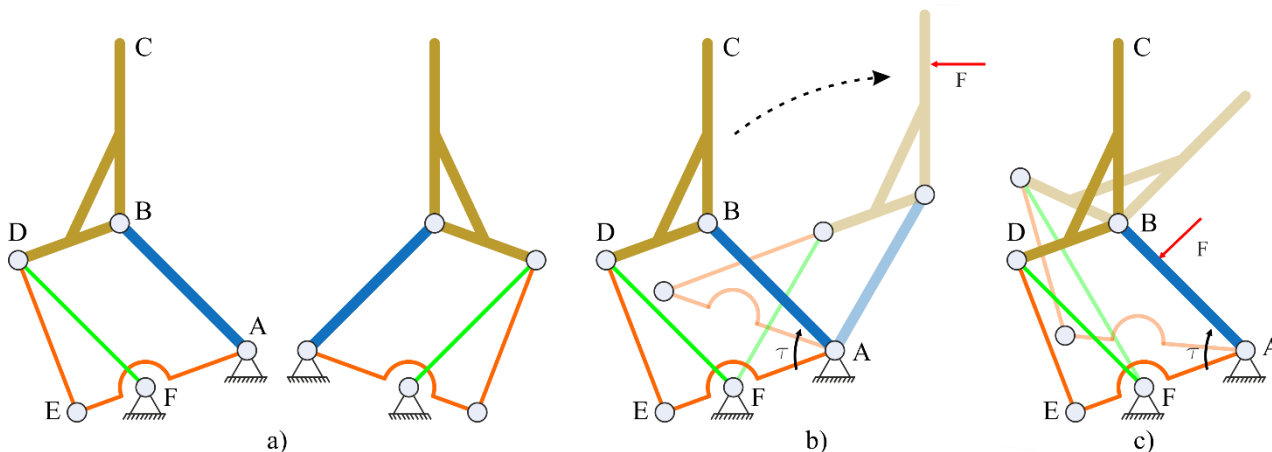
Podaktuirani hvatači sa aktuacionim mehanizmima baziranim na krutim polugama predstavljaju pogodno rešenje za razvoj jednostavnih fleksibilnih robotskih hvatača. Konstrukcija ovih hvatača omogućava kombinovanje preciznog hvatanja i envelopnog hvatanja, odnosno pasivnu adaptaciju prstiju konturi objekta.

U ovom radu prikazan je postupak projektovanja dvoprstog podaktuisanog robotskog hvatača sa aktuacionim mehanizmom zasnovanim na krutim polugama. Cilj rada je razvoj jednostavnog i cenovno prihvatljivog konstrukcionog rešenja koje omogućava jednostavno upravljanje, pouzdano kretanje prstiju i sposobnost prilagođavanja objektima različitog oblika. U radu predstavljena je analiza prenosnog mehanizma, usvojeno je konstrukciono rešenje i izvršena je analiza pogonskog sistema, sa ciljem definisanja ulaznih podataka potrebnih za projektovanje sistema upravljanja hvatačem.

2. KONSTRUKCIONO REŠENJE PODAKTUIRANOG ROBOTSКОG HVATAČA

2.1 Analiza prenosnog mehanizma

Analiza prenosnog mehanizma, koja je detaljno opisana u [6], sprovedena je sa ciljem da se opiše kretanje podaktuiranih prstiju tokom zatvaranja i otvaranja hvatača. Takođe, na osnovu izvršene analize, dimenzionisani su elementi prenosnog mehanizma kako bi se obezbedilo kretanje koje omogućava i precizno i envelopno hvatanje objekta. Na slici 1a) prikazan je koncept projektovanog hvatača sa prenosnim mehanizmom koji omogućava precizno hvatanje i sa mehanizmom koji omogućava envelopno hvatanje. Ovaj koncept poseduje dva podaktuirana prsta od kojih svaki ima po dve falange, proksimalnu AB i distalnu BC.



Slika 1: Koncept mehanizma podaktuiranog hvatača

Prenosni mehanizam u vidu paralelograma ABDF, koji je prikazan na slici 1b), ima zadatak da omogući kretanje distalne falange tako da se održava njena konstantna orijentacija i time se ostvaruje precizno hvatanje. Ovo kretanje se zaustavlja kada distalna falanga dođe u kontakt sa objektom i kada se pojavi kontaktna sila F . Prenosni mehanizam u vidu zglobnog četvorougla ABDE, koji je prikazan na slici 1c) ima zadatak da omogući rotaciju distalne falange oko tačke B i time ostvari envelopno hvatanje objekta. Ovo kretanje je pasivno i ostvaruje se kada proksimalna falanga dođe u kontakt sa objektom i kada se pojavi kontaktna sila na njoj. Tada se proksimalna falanga zaustavlja, a distalna počinje svoju rotaciju dok i ona ne dođe u kontakt sa objektom.

Dimenzionisanje prenosnog mehanizma vrši se na osnovu Frojdenštajnovе jednačine [7] korišćenjem poznatih vrednosti dužina falangi, kao i na osnovu željenih ugaonih pomeranja falangi kako se obezbedilo pouzdano hvatanje objekata. Dužine falangi usvojene su na osnovu analize dimenzija objekata kojima bi se manipuliralo i usvojeno je da njihova dužina bude $l_{AB} = l_{BC} = 50 \text{ mm}$. Željena rotacija proksimalne falange oko tačke A iznosi 75° , a rotacija distalne falange oko tačke B iznosi 90° . Na osnovu ovih podataka, a u skladu sa Frojdenštajnovom jednačinom:

$$R_3 + R_2 \cos \beta - R_1 \cos \alpha = \cos(\alpha - \beta) \quad (1)$$

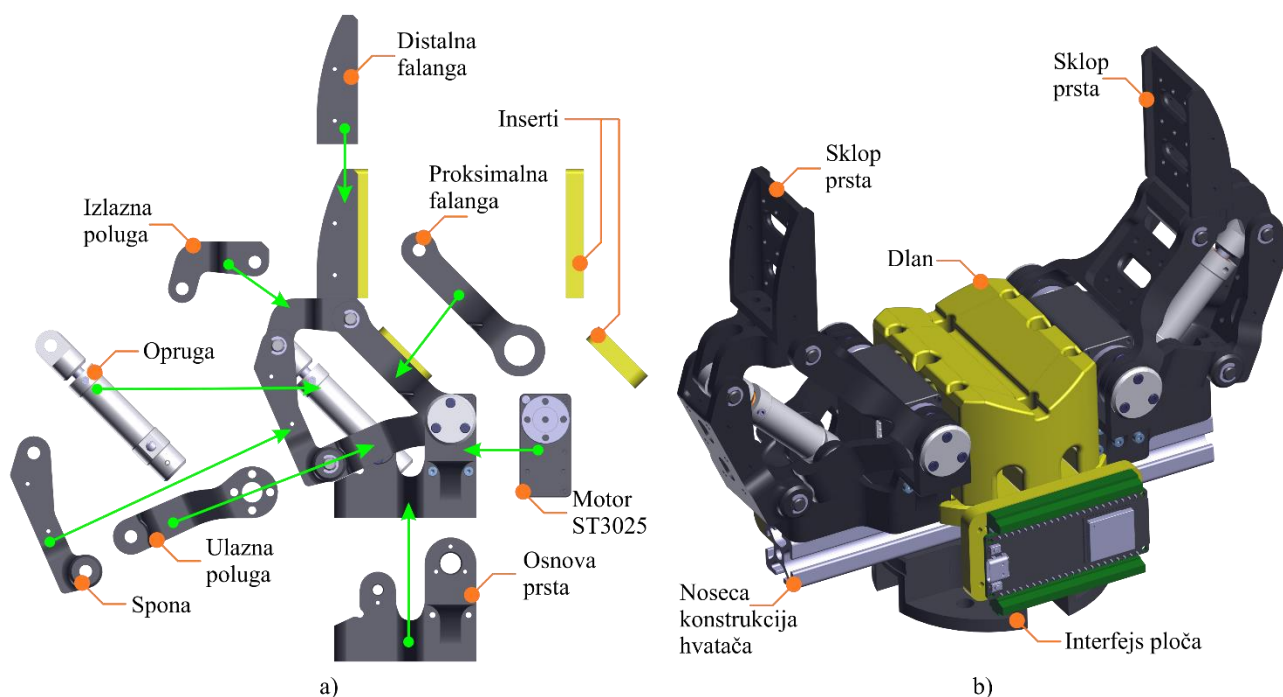
izračunavaju se dužine svih sastavnih poluga prenosnog mehanizma u obliku zglobnog četvorougla. Parametri prenosnog mehanizma prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri prenosnog mehanizma			
l_{AB}	l_{BD}	l_{DE}	l_{AE}
50 mm	30 mm	50 mm	50 mm

Prema podacima iz tabele 1 moguće je početi sa projektovanjem konkretnog podaktuiranog hvatača, a kao jedan od najvažnijih parametara za početak projektovanja, pored usvojenih dužina falangi, izdvaja se dužina ulazne poluge u zglobni šetvorougao $l_{AE} = 50 \text{ mm}$. Od ove dužine zavisi koliki moment je moguće preneti sa aktuatora na objekat.

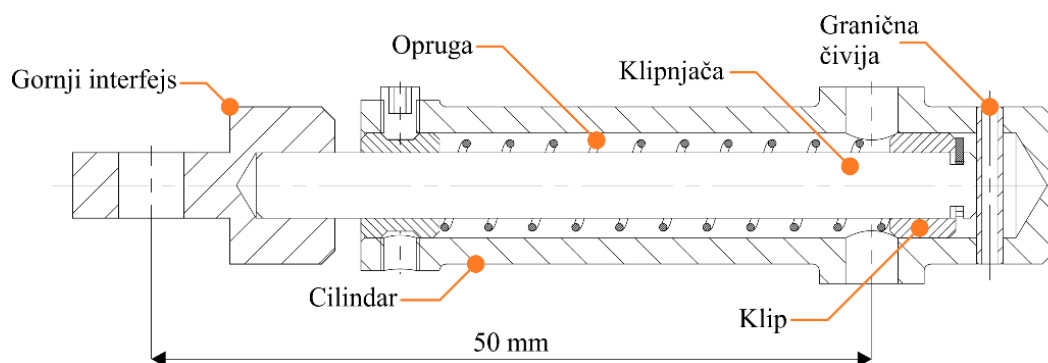
2.2 Usvojeno konstrukciono rešenje

Na osnovu definisanih funkcionalnih zahteva i analize prenosnog mehanizma, usvojeno je konstrukciono rešenje dvoprstog podaktuiranog robotskog hvatača. Ovo rešenje prikazano je na slici 2b). Ovaj hvatač predstavlja jednostavan i kompaktan sistem namenjen hvatanju objekata različitih dimenzija i oblika. Sastoji se od dva prsta, dlana, noseće konstrukcije i interfejs ploče.



Slika 2: Konstrukcija podaktuiranog hvatača

Osnovu konstrukcionog rešenja čine dva simetrično postavljena prsta čija je konstrukcija predstavljena slikom 2a). Prst se sastoji od, kako je već objašnjeno, proksimalne i distalne falange. Prenosni mehanizam prsta se sastoji od ulazne poluge, spona i izlazne poluge, koje zajedno sa proksimalnom falangom čine zglobni četvorougao i ovaj mehanizam omogućava pasivnu adaptaciju objektima manipulacije, odnosno envelopno hvatanje. Prenosni mehanizam u vidu paralelograma, pored proksimalne falange i izlazne poluge čini još i sklop opruge. Ovaj element ima zadatak da omogući precizno hvatanje, a kada hvatač pasivno pređe iz moda preciznog hvatanja u envelopno hvatanje, on mora da se izduži da bi omogućio rotaciju distalne falange oko tačke B sa slike 1c). Sklop opruge prikazan je na slici 3.



Slika 3: Sklop opruge

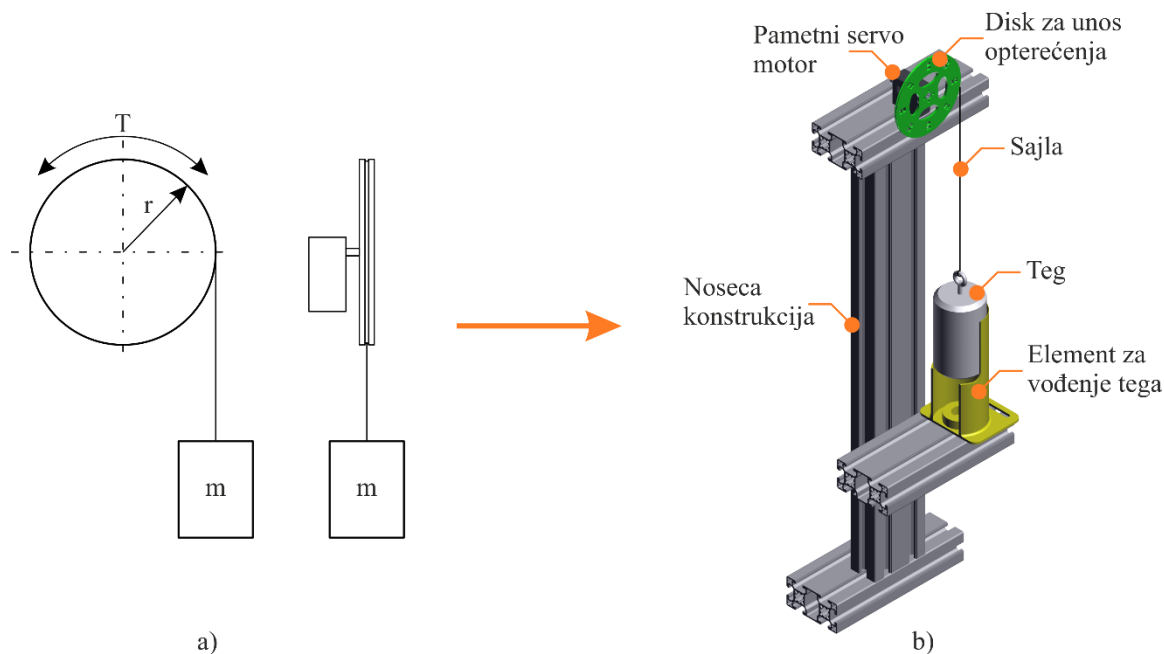
Unutar cilindra sa slike 3 nalazi se opruga opterećena na pritisak i ona drži cilindar u uvučenom položaju. Ovo je važno da bi se ostvarila distanca između tačaka oslanjanja cilindra od $l = 50 \text{ mm}$, čime bi se obezbedilo precizno hvatanje, odnosno da bi se formirao paralelogram ABDF sa slike 1a). Kao što je već objašnjeno, kada proksimalna falanga prva dođe u dodir sa objektom, hvatač prelazi u mod envelopnog hvatanja i u tom trenutku sklop opruge počinje da se izdužuje da bi se obezbedila rotacija distalne falange. Pri otvaranju hvatača dejstvo opruge pasivno vraća sklop opruge u početni položaj, odnosno na distancu $l = 50 \text{ mm}$.

Za pogon prsta odabran je pametni servo motor *Waweshare ST3025* koji ima dodatne funkcije akvizicije pozicije, jačine struje i temperature i upravo ovi parametri predstavljaju osnov za razvoj upravljačkog sistema podaktuiranog hvatača. Razvoju upravljačkog sistema mora prethoditi analiza pogona, odnosno potrebno je kalibrisati servo motor i odrediti koja ograničenja ima i o tome će biti reči u narednom poglavlju.

3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA POGONSKOG SISTEMA

Za pokretanje pojedinačnog prsta projektovanog podaktuiranog hvatača koristi se pametni servo motor *Waweshare ST3025*. Mikroprocesorski sistem u okviru motora omogućava očitavanje njegovog trenutnog položaja, opterećenja, jačine struje i drugih parametara. Pozicija i opterećenje motora u toku rada će biti iskorišćeni u svrhu detekcije kontakta i regulacije hvatanja projektovanog hvatača prilikom kreiranja upravljačkog sistema hvatača.

Prema podacima o tehničkim karakteristikama pametnog servo motora, opterećenje je izvedena veličina i funkcija je izmerene vrednosti jačine struje motora prilikom kretanja ili držanja i shodno ovoj informaciji, potrebno je napraviti eksperimentalnu analizu rada servo motora kako bi se motor kalibrisao i kako bi se odredilo koji parametar je bolje implementirati unutar upravljačkog sistema, opterećenje ili jačinu struje, kako bi se detektovao kontakt i izvršila regulacija hvatanja objekta manipulacije. Koncept kalibracije servo motora je prikazan na slici 4a).



Slika 4: Eksperimentalna instalacija: a) koncept kalibracije pametnog servo motora, b) realizovana eksperimentalna instalacija

Bazira se na jednostavnom principu unošenja poznatog opterećenja na poznatom rastojanju od ose motora i na osnovu tih informacija, izračunavanja tačno ostvarenog momenta T na motoru prema sledećim relacijama:

$$T = r \cdot F \quad (2)$$

$$F = m \cdot g \quad (3)$$

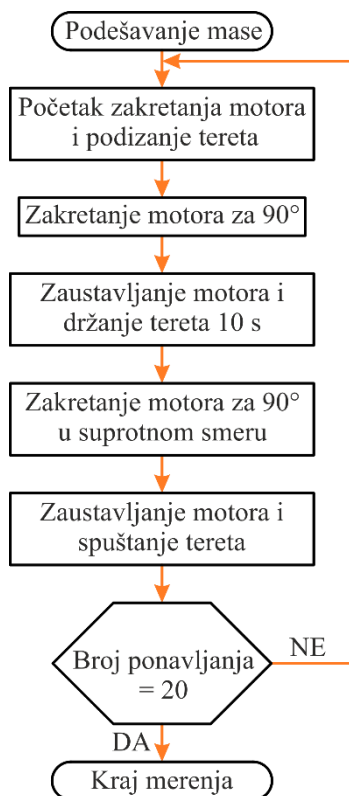
Da bi se kalibracija jednostavno izvršila, za veličinu diska odabrana je dimenzija $r = 50 \text{ mm}$ što je u skladu sa odabranom dimenzijom ulazne poluge u zglobovnom četvorouglu prikazanom u prethodnom poglavlju. Shodno tome, realizovana je eksperimentalna merna instalacija, koja je prikazana na slici 4b), a koja se sastoji od noseće konstrukcije izrađene od ekstrudiranih aluminijumskih profila, pametnog servo motora, diska za unos opterećenja na rastojanju $r = 50 \text{ mm}$, sajle, tega i elementa za vođenje tega. Element za vođenje tega je

projektovan i pozicioniran tako da postoji zazor između tega i samog elementa, toliki da ne utiče na izmerene vrednosti opterećenja, a da zaustavi lateralno pomeranje tega prilikom podizanja i spuštanja.

U toku eksperimenta varirana je veličina tegova i eksperimentalno merenje ponavljano je po 20 puta za svaku odabranu veličinu tega kako bi se odredilo kolika su odstupanja u ponovljenim merenjima i kako bi se dobila pouzdana procena rada motora i pri malim i pri velikim opterećenjima.

Prema tehničkim karakteristikama odabranog pametnog servo motora i prema relacijama (2) i (3), moguće je odrediti raspon masa tegova koji će se koristiti u toku eksperimenta. Motor ST3025 ima maksimalni moment $T \approx 3,92 \text{ Nm}$ i teorijski maksimalna masa tega koji ovaj motor može da podigne na kraku od $r = 50 \text{ mm}$, je $m = 7,9 \text{ kg}$. Međutim ovo opterećenje nije optimalno jer u graničnom režimu rada dolazi do naglog zagrevanja i do neregularnog rada što može izazvati otkazivanje motora. Da bi postigli sigurniji rad motora i manje zagrevanje u toku rada, odabrano je da maksimalna masa tega ne bude veća od $m = 4 \text{ kg}$. Plan eksperimenta sa odabranim masama tegova prikazan je u tabeli 2, a tok eksperimenta na slici 5.

Tabela 2. Plan eksperimenta					
Redni broj merenja	Masa tega m [kg]	Moment T [Nm]	Ugao zakretanja motora	Vreme držanja [s]	Broj ponavljanja
1.	0,532	0,2609	$\approx 90^\circ$	10	20
2.	0,812	0,3983	$\approx 90^\circ$	10	20
3.	1,090	0,5346	$\approx 90^\circ$	10	20
4.	1,371	0,6725	$\approx 90^\circ$	10	20
5.	1,651	0,8098	$\approx 90^\circ$	10	20
6.	1,932	0,9476	$\approx 90^\circ$	10	20
7.	2,213	1,0855	$\approx 90^\circ$	10	20
8.	2,488	1,2204	$\approx 90^\circ$	10	20
9.	2,782	1,3646	$\approx 90^\circ$	10	20
10.	3,067	1,5044	$\approx 90^\circ$	10	20
11.	3,353	1,6446	$\approx 90^\circ$	10	20



Slika 5: Tok eksperimenta

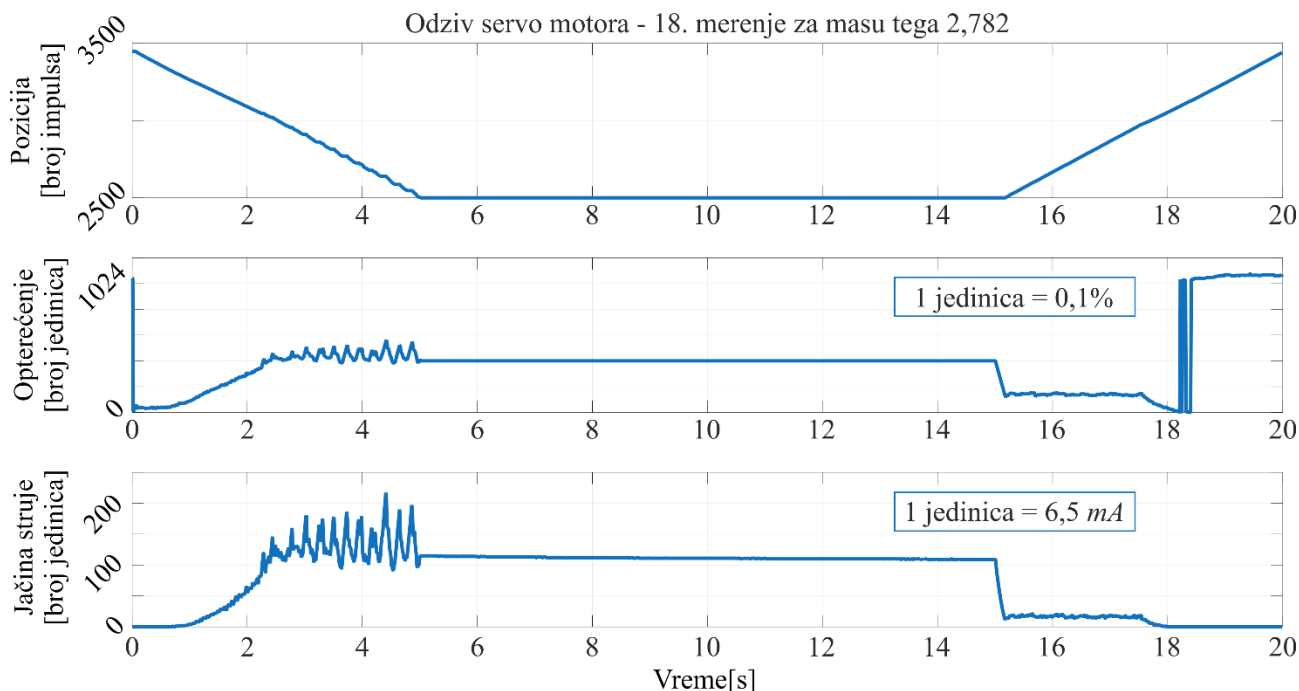
Merenja koja su izvršena prema toku eksperimenta sa slike 5 pokazala su karakterističan odziv pametnog servo motora tokom jednog kompletnog ciklusa podizanja, držanja i spuštanja tereta koji je prikazan na slici 6. Pozicija servo motora se tokom kretanja menja u rasponu od 3.500 do 2.500 impulsa prilikom podizanja tereta i obrnuto u slučaju spuštanja tereta, što odgovara relativnom zakretanju servo motora od približno 90° . Posmatrajući dijagrame opterećenja i jačine struje, prepoznaje se faza pokretanja motora pre podizanja tereta i faza podizanja tereta. U ovim fazama dolazi do porasta očitano opterećenja i jačine struje motora što je posledica savladavanja spoljašnjeg poznatog opterećenja. Takođe se primećuje prisutnost oscilacija ovih veličina koje su posledica unutrašnje regulacije pozicije i brzine servo motora.

Nakon uspešnog podizanja tereta, pametni servo motor zadržava teret u podignutom položaju. U ovoj fazi položaj motora je konstantan, a očitane vrednosti opterećenja i jačine struje motora se stabilizuju. Ovaj deo signala će biti iskorišćen za kalibraciju servo motora kao i za analizu rada samog motora, odnosno određivanje graničnih vrednosti parametara kao što su maksimalno opterećenje pre otkaza motora, zagrevanje motora i drugi.

Nakon držanja tereta sledi faza spuštanja tereta. U ovoj fazi očitane vrednosti opterećenja i jačine struje motora su znatno manje nego u fazi podizanja tereta jer pri spuštanju sila gravitacije pomaže kretanju tereta i smanjuje potrebni moment na motoru. Upoređujući grafik opterećenja i jačine struje motora u fazi spuštanja tereta, primećuju se nagli skokovi očitano opterećenja u trenutku kada je očitana jačina struje minimalna. Ova pojava je posledica internog pretvaranja parametra jačine struje u opterećenje. Naime, parametar opterećenja motora uslovljen je smerom u kome se opterećenje saopštava motoru, dok parametar jačine struje nije. Očitavanja opterećenja u

vrednosti od 0 do 1.024 pripadaju minimalnom i maksimalnom opterećenju u jednom smeru, a od 1.024 do 2.048 u drugom smeru. U graničnim slučajevima, kada je teret spušten, usled zazora u reduktoru motora dolazi do naglih promena očitano opterećenja motora između 0 i 1.025 što predstavlja minimalno opterećenje

motora, ali u različitim smerovima, što se jasno može videti na dijagramu jačine struje motora u istoj zoni, od 18 do 20 sekundi.



Slika 6: Karakterističan odziv pametnog servo motora

U toku eksperimenta izvršeno je 11 grupa merenja sa po 20 merenja za svaku odabranu masu. U tabelama 3 i 4 su prikazani rezultati analize sprovedenih merenja. Dobijeni podaci su filtrirani tako da se koriste samo podaci u zoni držanja tereta, odnosno u zoni u kojoj servo motor miruje jer upravo ta zona odgovara eksploatacionim uslovima u kojima će servo motor funkcionisati prilikom hvatanja i držanja objekata manipulacije.

Za potrebe analize eksperimentalnih merenja korišćene su dve statističke veličine, standardna devijacija (σ) i koeficijent varijacije (CV) [8] koji su izračunati prema izrazima (4) i (5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (5)$$

gde je $N = 20$ broj ponovljenih merenja za istu masu, x_i - srednja vrednost očitano opterećenja ili jačine struje motora u fazi držanja u i -tom merenju, a $\bar{x}$ - srednja vrednost N merenja. Primena obe statističke veličine neophodna je jer standardna devijacija i koeficijent varijacije ne daju istu informaciju o kvalitetu i ponovljivosti merenja.

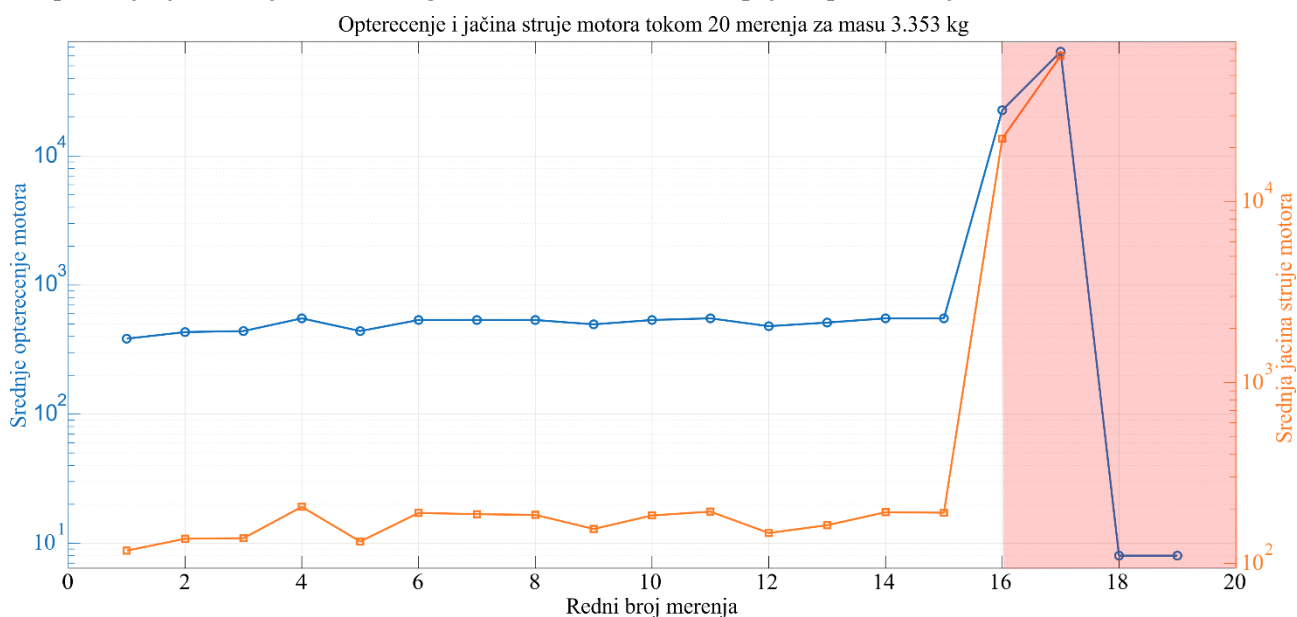
Standardna devijacija predstavlja meru apsolutnog rasipanja izmerenih vrednosti oko njihove srednje vrednosti i pogodna je za analizu promena izmerenih veličina unutar istog numeričkog nivoa izmerenih vrednosti, na primer za poređenje rasipanja očitano opterećenja pri različitim masama. Za poređenje različitih veličina, kao što su opterećenje i jačina struje motora, standardna devijacija nije dovoljna jer se ove veličine nalaze na različitim numeričkim nivoima. Zbog toga se uvodi koeficijent varijacije, koji normalizuje standardnu devijaciju u odnosu na srednju vrednost i izražava rasipanje u procentima.

Na ovaj način omogućeno je poređenje stabilnosti izmerenih vrednosti opterećenja i jačine struje motora, nezavisno od njihovih apsolutnih vrednosti. Analizirajući rezultate prikazane u tabelama 3 i 4 dolazi se do zaključka da se sa porastom mase, odnosno momenta kojim se opterećuje servo motor pojavljuje sve veće i veće rasipanje izmerenih vrednosti. Ova pojava je izraženija pri većim opterećenjima i to se može povezati sa nepovoljnijim režimom rada motora jer na ovim opterećenjima sve veći uticaj ima algoritam regulacije rada pametnog servo motora.

Tabela 3. Analiza eksperimenta - opterećenje					
Redni broj merenja	Masa tega m [kg]	Standardna devijacija $[\sigma]$	Koeficijent varijacije [CV]	Min [jedinice]	Max [jedinice]
1.	0,532	0	0	56	56
2.	0,812	3,9149	5,0711	72	80
3.	1,090	3,5249	3,1092	104	120
4.	1,371	4,6061	3,2594	136	148,36
5.	1,651	3,9149	2,2603	168	176
6.	1,932	12,71	5,7597	200	232
7.	2,213	8,5301	3,4795	232	256
8.	2,488	13,692	4,8246	248	296
9.	2,782	36,787	9,836	296	440
10.	3,067	30,336	6,9196	344	488
11.	3,353	14878	314,84	0	64305

Tabela 4. Analiza eksperimenta – jačina struje motora					
Redni broj merenja	Masa tega m [kg]	Standardna devijacija $[\sigma]$	Koeficijent varijacije [CV]	Min [jedinice]	Max [jedinice]
1.	0,532	0,0031985	0,16011	1,9922	2,0033
2.	0,812	0,49201	10,579	3,9922	5,0144
3.	1,090	0,75935	6,6671	9,9989	12,997
4.	1,371	1,0844	6,6137	15,003	18,09
5.	1,651	1,3769	5,1038	24,992	28,012
6.	1,932	2,2905	5,7459	35,619	42,175
7.	2,213	3,41	7,2066	42,642	52,417
8.	2,488	5,0224	7,7643	50,837	69,584
9.	2,782	15,46	15,255	74,661	135,16
10.	3,067	13,392	10,318	89,964	153,51
11.	3,353	14936	334,83	0	64299

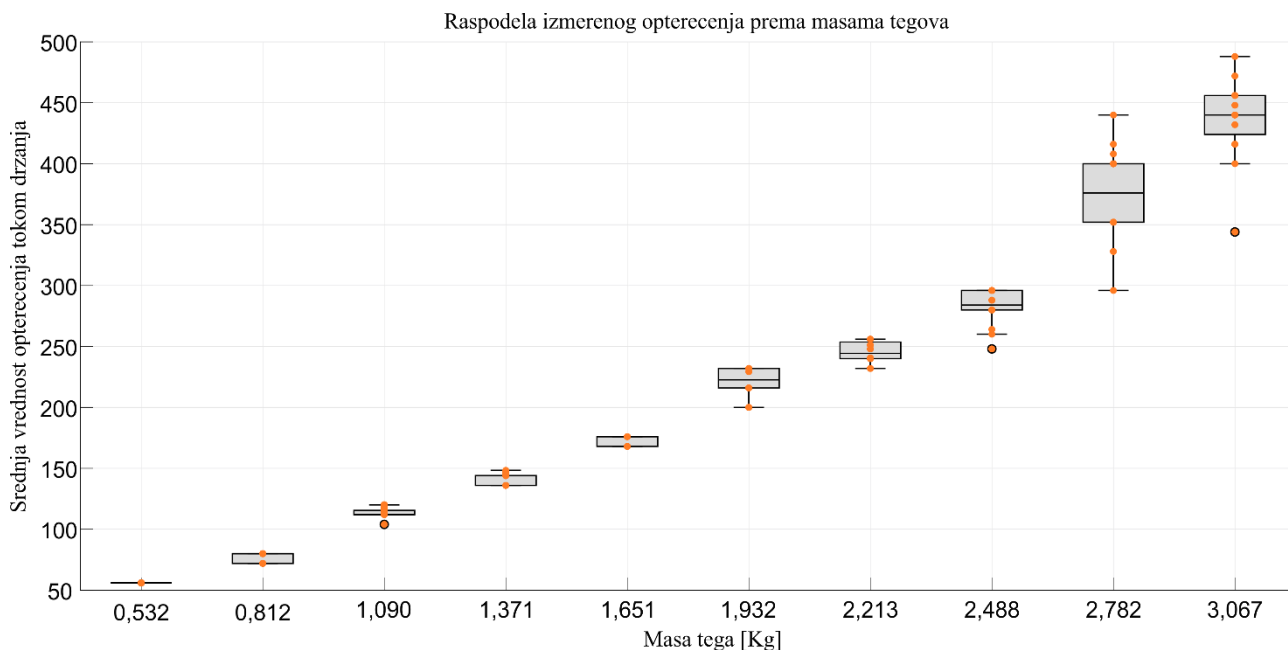
Tabele 3 i 4 pokazuju da postoji problem sa grupom merenja 11. Maksimalne očitane vrednosti opterećenja i jačine struje motora su daleko van opsega merenja i to je posledica otkaza motora usled pregrevanja u toku 16. ponavljanja merenja za masu tega od $m = 3,353 \text{ kg}$. Ova pojava prikazana je na slici 7.



Slika 7: Prikaz otkaza rada motora usled pregrevanja

Ovim je ustanovljeno da režim rada motora mora da se prilagodi da ne bi dolazilo do otkazivanja servo motora prilikom procesa hvatanja objekata. To znači da postoji zona u kojoj hvatač može da radi bez ograničenja i zona u kojoj se mora ograničiti vreme rada hvatača, a to je zona u kojoj momenti na motoru prelaze $T = 1,6 \text{ Nm}$ prema tabeli 2. Prema rezultatima analize koji su prikazani u tabelama 3 i 4, kao i prema grafičkom prikazu rezultata merenja na slici 8, za dalju analizu biće korišćeno prvih 10 grupa merenja, a za

parametar koji je validan za implementaciju u upravljački sistem izabran je parametar opterećenja jer ima manje rasipanje izmerenih vrednosti u odnosu na parametar jačine struje motora.



Slika 8: Raspodela izmerenog opterećenja za prvih 10 grupa merenja

Na slici 8 prikazana je raspodela izmerenog opterećenja za prvih deset grupa merenja, odnosno za različite mase tegova. Za svaku masu je urađeno po 20 merenja, a za potrebe analize korišćena je srednja vrednost izmerenog opterećenja u fazi držanja tereta. Sa dijagrama se vidi da porast vrednosti opterećenja prati porast realnog spoljašnjeg opterećenja motora i da se ovaj parametar može koristiti za detekciju kontakta i regulaciju hvatanja. Takođe, sa slike 8 uočljivo je da se pri većim spoljašnjim opterećenjima povećava i rasipanje izmerenih vrednosti i da je ovo rasipanje izraženije na velikim opterećenjima - većim od $T = 1,2 \text{ Nm}$ prema tabeli 2. Saznanja dobijena izvršenom analizom pogonskog sistema, a to su kalibracija servo motora i ograničenje rada servo motora, inkorporiraju se direktno unutar razvijenog upravljačkog sistema podaktuiranog hvatača.

4. ZAKLJUČAK I BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

U ovom radu prikazan je postupak projektovanja podaktuiranog dvoprstog hvatača čiji je prenosni mehanizam zasnovan na zglobnom četvorouglu. Polazna osnova za projektovanje hvatača je analiza prenosnog mehanizma na osnovu koje su usvojene dimenzije elemenata i definisana struktura hvatača koja omogućava precizno i envelopno hvatanje objekata. Na osnovu sprovedene analize razvijeno je konstrukciono rešenje podaktuiranog dvoprstog hvatača.

Posebna pažnja posvećena je eksperimentalnoj analizi pogonskog sistema zasnovanog na primeni pametnog servo motora ST3025. Eksperimentalnim merenjima analizirane su očitane vrednosti opterećenja i jačine struje motora pri različitim spoljašnjim opterećenjima. Rezultati su pokazali da vrednost očitano opterećenja prati porast realnog momenta na motoru i da se može koristiti kao ulazni parametar za detekciju kontakta i regulaciju procesa hvatanja. Takođe je pokazano da pri većim opterećenjima dolazi do povećanog rasipanja izmerenih vrednosti, kao i do nepovoljnog režima rada motora, zbog čega je potrebno definisati ograničenja rada pogonskog sistema.

Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za dalji razvoj upravljačkog sistema podaktuiranog hvatača. Buduća istraživanja biće usmerena ka razvoju algoritama upravljanja zasnovanih na principima upravljanja diskretnim događajima. Takav pristup treba da omogući definisanje različitih stanja rada hvatača, kao što su otvaranje, zatvaranje, detekcija kontakta, držanje objekta i otpuštanje objekta. Na taj način biće moguće prepoznati kontakt hvatača sa objektom, povezati mehanizam razvijenog hvatača sa informacijama dobijenim iz pogonskog sistema i ostvariti pouzdano upravljanje procesom hvatanja.

5. LITERATURA

- [1] B. Siciliano, O. Khatib, Springer Handbook of Robotics. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] L. Birglen, T. Schlicht, “*A statistical review of industrial robotic grippers*,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 49, pp. 88–97, Feb. 2018.
- [3] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, K. Biggers, “*Design of the Utah/MIT dexterous hand*,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 1520–1532, Apr. 1986.
- [4] D. Yoon, Y. Choi, “*Underactuated finger mechanism using contractible slider-crank and stackable four-bar linkages*,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 22, pp. 2046–2057, Oct. 2017.
- [5] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, “*DLR-hand II: Next generation of a dextrous robot hand*,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 1, pp. 109–114, May 2001.
- [6] Matijašević, L., Jakovljević, Ž., Nedeljković, D., Suvajac, Ž., 2025, “*The methodology for the design of underactuated adaptive robotic finger for precision grasping tasks*“, In 2025 12th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN) (pp. 1-6). IEEE.
- [7] A. Ghosal, “*The Freudenstein equation - Design of four-link mechanisms*,” Resonance, vol. 15, pp. 699-710, Aug. 2010
- [8] Montgomery, D.C., Runger, G.C., 2010. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & sons.

Matijašević, L., Suvajac Ž., Nedeljković, D., Jakovljević, Ž.

DESIGN OF AN UNDERACTUATED ADAPTIVE ROBOTIC GRIPPER BASED ON A LINKAGE MECHANISM

Abstract: Grasping robotic systems enable interaction between the robot and its environment, i.e., between the robot and objects of different shapes, dimensions, and masses. They represent a key element of every robotic system, and their improvement has a significant role in the development of modern robotics. This paper presents the design procedure of an underactuated robotic gripper based on a four-bar linkage mechanism. The starting point is the analysis of the gripper kinematic chain, based on which the dimensions of the links were determined, followed by the design and fabrication of the prototype. The paper presents an experimental analysis of the drive system based on the use of smart servo motors. The possibilities and limitations of using the measured motor position and load values for contact detection and grasp regulation in the developed discrete-event-based control system are considered.

Key words: underactuated gripper, smart servo motor, four-bar linkage, discrete events