



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Лазар Попадић

Оптимизација управљања паралелним манипулатором употребом еволутивних алгоритама

ДИПЛОМСКИ РАД
- Основне академске студије -

Нови Сад, 2024.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:	Монографска документација		
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	Завршни (Bachelor) рад		
Аутор, АУ:	Лазар Попадић		
Ментор, МН:	др Желько Кановић		
Наслов рада, НР:	Оптимизација управљања паралелним манипулатором употребом еволутивних алгоритама		
Језик публикације, ЈП:	Српски / Ћирилица		
Језик извода, ЈИ:	Српски		
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина		
Година, ГО:	2024		
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринг		
Место и адреса, МА:	Нови Сад, трг Доситеја Обрадовића 6		
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)			
Научна област, НО:	Мехатроника		
Научна дисциплина, НД:	Мехатроника, роботика и аутоматизација		
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	паралелни манипулатори, регулација положаја, еволутивни алгоритми		
УДК			
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад		
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:	У овом раду су детаљно описане теоријске основе кинематске и динамичке анализе паралелних манипулатора, основе машина једносмерне струје са константном побудом, основе PID регулатора и основе PSO еволутивног алгоритма. Динамички модел петочланог паралелног манипулатора и динамички модел машине једносмерне струје имплементирани су користећи MATLAB Simulink. Појачања PID регулатора су одређена применом PSO алгоритма. Упоређене су перформансе система са добијеним и почетним параметрима. На крају су дискутовани утицаји параметара PSO алгоритма на резултате оптимизације.		
Датум прихватања теме, ДП:			
Датум одbrane, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Срђан Савић	
	Члан:	др Милан Рацков	Потпис ментора
	Члан, ментор:	др Желько Кановић	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO:		
Identification number, INO:		
Document type, DT:	Monographic publication	
Type of record, TR:	Textual printed material	
Contents code, CC:	Bachelor Thesis	
Author, AU:	Lazar Popadić	
Mentor, MN:	dr Željko Kanović	
Title, TI:	Optimal control of parallel manipulator using evolutive algorithms	
Language of text, LT:	Serbian	
Language of abstract, LA:	Serbian	
Country of publication, CP:	Republic of Serbia	
Locality of publication, LP:	Vojvodina	
Publication year, PY:	2024	
Publisher, PB:	Author's reprint	
Publication place, PP:	Novi Sad, Dositeja Obradovića sq. 6	
Physical description, PD: (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)		
Scientific field, SF:	Mechatronics	
Scientific discipline, SD:	Mechatronics, robotics and automation	
Subject/Key words, S/KW:	parallel manipulators, position regulation, evolutive algorithms	
UC		
Holding data, HD:	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia	
Note, N:		
Abstract, AB:	In this paper, the theoretical foundations of kinematic and dynamic analysis of parallel manipulators, the fundamentals of direct current motors with constant field, the fundamentals of PID controllers and the fundamentals of the PSO evolutionary algorithm are described in detail. The dynamic models of a five-bar parallel manipulator and of a direct current motor were implemented using MATLAB Simulink. The gains of the PID controller were determined by applying the PSO algorithm. The system's performance with the obtained and initial parameters were compared. Finally, the effects of PSO algorithm parameters on the optimization were discussed.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB:		
Defended on, DE:		
Defended Board, DB:	President:	dr Srđan Savić
	Member:	dr Milan Rackov
	Member, Mentor:	dr Željko Kanović
		Menthor's sign



**ЗАДАТAK ЗА ИЗРАДУ ДИПЛОМСКОГ
(BACHELOR) РАДА**

(Податке уноси предметни наставник - ментор)

Врста студија:	<input type="checkbox"/> Основне академске студије	
Студијски програм:	Мехатроника	
Руководилац студијског програма:	Др Срђан Савић	

Студент:	Лазар Попадић	Број индекса:	МХ 4/2020
Област:	Интердисциплинарно		
Ментор:	Др Желько Кановић		

НА ОСНОВУ ПОДНЕТЕ ПРИЈАВЕ, ПРИЛОЖЕНЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ И ОДРЕДБИ СТАТУТА ФАКУЛТЕТА ИЗДАЈЕ СЕ ЗАДАТAK ЗА ДИПЛОМСКИ (Bachelor) РАД, СА СЛЕДЕЋИМ ЕЛЕМЕНТИМА:

- проблем – тема рада;
- начин решавања проблема и начин практичне провере резултата рада, ако је таква провера неопходна;
- литература

НАСЛОВ ДИПЛОМСКОГ (BACHELOR) РАДА:

**ОПТИМИЗАЦИЈА УПРАВЉАЊА ПАРАЛЕЛНИМ МАНИПУЛАТОРОМ УПОТРЕБОМ
ЕВОЛУТИВНИХ АЛГОРИТАМА**

ТЕКСТ ЗАДАТКА:

Упознati сe сa теоријским основама везаним за принципе функционисања паралелних манипулатора, основе еволутивних оптимизационих алгоритама и ПИД управљање.

Креirati математички модел паралелног манипулатора сa пет сегменata погоњеног мотором једносмерне струје.

Применити алгоритам оптимизације ројем честица (PSO) за оптимизацију параметара ПИД регулатора у складу сa постављеним захтевима.

Коментарисати добијене резултате.

Руководилац студијског програма:	Ментор рада:
Др Срђан Савић	Др Желько Кановић

Примерак за: - Студента; - Ментора

Садржај

1 Увод	3
2 Материјали и методе	4
2.1 Паралелни манипулатори	4
2.1.1 Сингуларне конфигурације	6
2.1.2 Кинематска анализа	6
2.1.3 Динамичка анализа	7
2.2 Машине једносмерне струје	8
2.2.1 Динамички модел MJC	8
2.2.2 MJC у стационарном стању	9
2.3 PID регулација	10
2.3.1 Пропорционално дејство	11
2.3.2 Интегрално дејство	12
2.3.3 Диференцијално дејство	12
2.3.4 PID	13
2.4 <i>Particle swarm optimization</i>	13
2.4.1 Кретање честица	14
2.4.2 Модификације PSO алгоритма	15
3 Имплементација	18
3.1 Петочлани паралелни манипулатор	18
3.1.1 Означавање и параметри	18
3.1.2 Кинематика	20
3.1.3 Динамика	23
3.2 Машина једносмерне струје са константном побудом	25
3.3 Регулација	27
3.4 Критеријум оптималности	27
4 Резултати и дискусија	29
4.1 Симулација са неоптимизованим параметрима	29

4.2	Оптимизација параметара са производом апсолутне грешке и времена као јединим критеријумом	30
4.3	Оптимизација параметара са становишта убрзања и апсолутне грешке	32
4.4	Провера добијених параметара	34
4.5	Дискусија о утицају броја итерација и броја честица	36
5	Закључак	39
6	Прилог	40
6.1	Прилог А	40
6.2	Прилог Б	40
6.3	Прилог В	41
7	Литература	42

1 Увод

У индустрији вођеној ефикасношћу и прецизношћу, све већа пажња се посвећује употреби паралелних манипулатора. У поређењу са серијским, паралелни манипулатори нуде значајне предности у погледу крутости, брзине, поновљивости као и ефикаснијег искоришћења енергије. Док серијски манипулатори пружају већу покретљивост, паралелни се истичу у задацима који захтевају велику носивост и прецизност, уз мање грешака услед деформација под оптерећењем. Ове карактеристике их чине посебно корисним у производним процесима, као што су *pick-and-place* задаци, монтажа, прецизно позиционирање и оријентисање.

Употреба глобалних оптимизационих алгоритама нам омогућава да пронађемо вредности управљачких параметара за које функција циља има оптималну вредност. Тек са таквим параметрима систем може да задовољи захтеване перформансе.

У овом раду се примењује *Particle swarm optimization* (PSO) алгоритам за пројектовање оптималног управљања петочланим паралелним манипулатором са 2 степена слободе. Показаћемо како минимизацијом функције циља, која зависи од грешке позиционирања улазних чланова и трзаја излазног члана, можемо добити параметре PID регулатора за које је кретање оптимално.

Овај рад је подељен на три дела. Први део представља теоријску основу рада. Истакнута је анализа кретања паралелних манипулатора, модел машине једносмерне струје (MJC), основе PID регулације и принцип рада PSO алгоритма.

У другом делу је детаљно приказана имплементација система, која подразумева динамички модел петочланог паралелног манипулатора укључујући и модел MJC, имплементација регулационе петље и критеријум оптималности који се користи за оптимизацију.

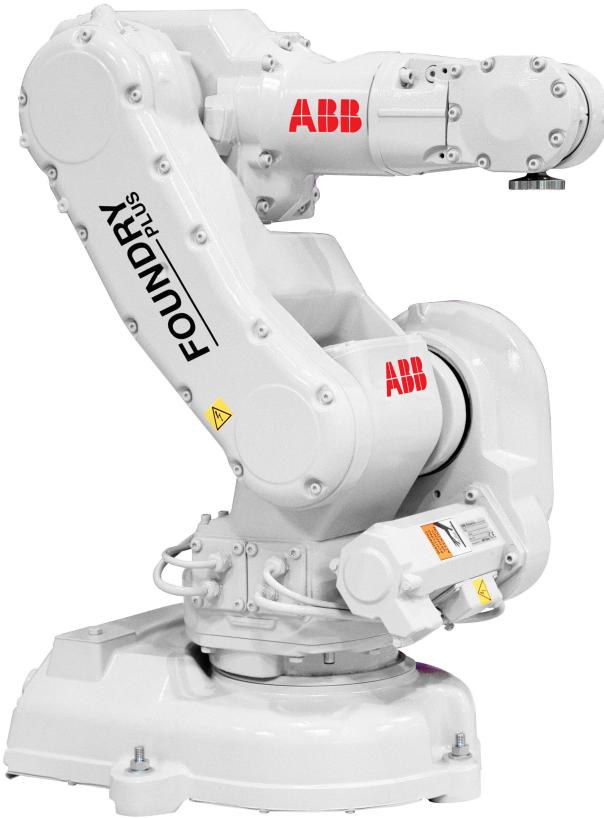
У трећем делу су приказани резултати оптимизације који су добијени симулацијом у *MATLAB*-у и *Simulink*-у. Приказан је и утицај параметара оптимизације, као и провера добијених параметара.

2 Материјали и методе

2.1 Паралелни манипулатори

Роботски манипулатори су уређаји који врше манипулацију објектима у простору. Главна функција манипулатора подразумева задатке који захтевају брзо и прецизно позиционирање предмета рада. Манипулатори су мехатроничарски уређаји који се сastoјe из механичког подсистема, управљачке и енергетске електронике. Према типу механичког подсистема, манипулатори се деле на: серијске, паралелне и мобилне.

Кинематски ланац представља низ крутих сегмената који су повезани преко зглобова. Прости кинематски ланци су они код којих ниједан сегмент није повезан са више од 2 сегмента. Механички подсистем серијских манипулатора представља прости кинематски ланац код којих су сегменти базе и крајњег ефектора повезани са 1, а сви остали са 2 сегмента [1]. Пример серијског манипулатора је приказан на слици 2.1.1.



Слика 2.1.1 Серијски манипулатор антропоморфне конфигурације *ABB IRB 140* [2]

Затворени кинематски ланац се добија када је један од сегмената, али не и база, повезан са 3 или више сегмента [1]. Механички подсистем паралелних манипулатора представља затворени кинематски ланац, код којег је крајњи ефектор повезан са базом преко више од једног кинематског ланца. Свака веза базе и крајњег ефектора садржи барем један актуuator. На слици 2.1.2 је приказан пример паралелног манипулатора.



Слика 2.1.2 Паралелни манипулатор делта конфигурације *ABB IRB 360* [2]

За разлику од серијских, сви актуатори паралелних манипулатора могу бити на непокретном сегменту, односно бази. То омогућава да, без негативних последица на крутост ланца, сегменти буду лакши него код серијских манипулатора. Додатна предност је то што се оптерећење које делује на крајњи ефектор разлаже на сваки ланац којим је повезан са базом. Из тога закључујемо да су главне предности паралелних манипулатора у односу на серијске:

- већа крутост кинематског ланца
- мања маса манипулатора
- већа носивост
- боља прецизност, као последица мањих деформација

С обзиром на то да је код паралелних манипулатора крајњи ефектор повезан са базом преко више од 1 кинематског ланца, кинематска анализа је знатно сложенија. Такође, сваки кинематски ланац уноси и одређена кинематска ограничења, због којих је радни простор мањи него код серијских манипулатора. Главне мане паралелних манипулатора су:

- мањи радни простор
- сложенија кинематска и динамичка анализа

2.1.1 Сингуларне конфигурације

Сингуларне конфигурације су одређени положаји крајњег ефектора, за које паралелни роботи губе своју инхерентну бесконачну крутост и у којима крајњи ефектор има неконтролисане степене слободе [1]. Типови кинематских сингуларитета су:

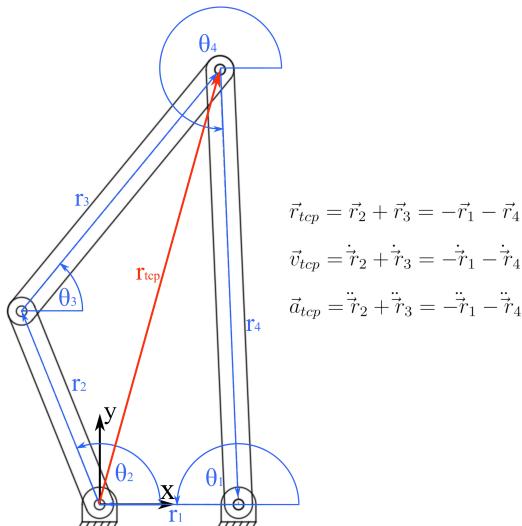
- Тип 1. За ненулти вектор улазних брзина, крајњи ефектор се не креће.
- Тип 2. Крајњи ефектор се креће при нултом вектору улазних брзина.
- Тип 3. Комбинација сингуларитета типа 1 и 2. Могуће је кретање крајњег ефектора без кретања улазних сегмената и обрнуто, могуће је кретање улазних сегмената без кретања крајњег ефектора.

2.1.2 Кинематска анализа

Кинематска анализа манипулатора обухвата проучавање кретања свих сегмената. Од кључног значаја су односи између координата, брзина и убрзања улазних чланова и крајњег ефектора. Кинематски проблем се дели на директни и индиректни.

Директни кинематски проблем обухвата проналажење кинематских параметара крајњег ефектора за задате улазне параметре кретања. Решење за паралелне манипулаторе зависи од конфигурације, односно, не мора бити јединствено. Аналитичка метода за решавање проблема директне кинематике представља решавање система векторских једначина. Почеквши од система за положај, формулишу се векторске једначине које изражавају вектор положаја врха крајњег ефектора преко карактеристичних вектора. Карактеристични вектори описују положај једног сегмента кинематског ланца. Карактеристични вектор је постављен у правцу сегмента, а његов интензитет представља дужину тог сегмента.

Након решавања система за положај, векторске једначине се диференцирају по времену како би се добио систем за брзину. Након тога се опет диференцирају како би се добио систем за убрзање. Слика 2.1.3 приказује директан кинематски проблем за зглобни четвороугао.



Слика 2.1.3 Пример директног кинематског проблема

Инверзни кинематски проблем обухвата проналажење параметара улазних сегмената за жељени положај крајњег ефектора. Као и код директног, решење не мора бити јединствено. Иста метода за решавање директне кинематике се може применити и за инверзну кинематику.

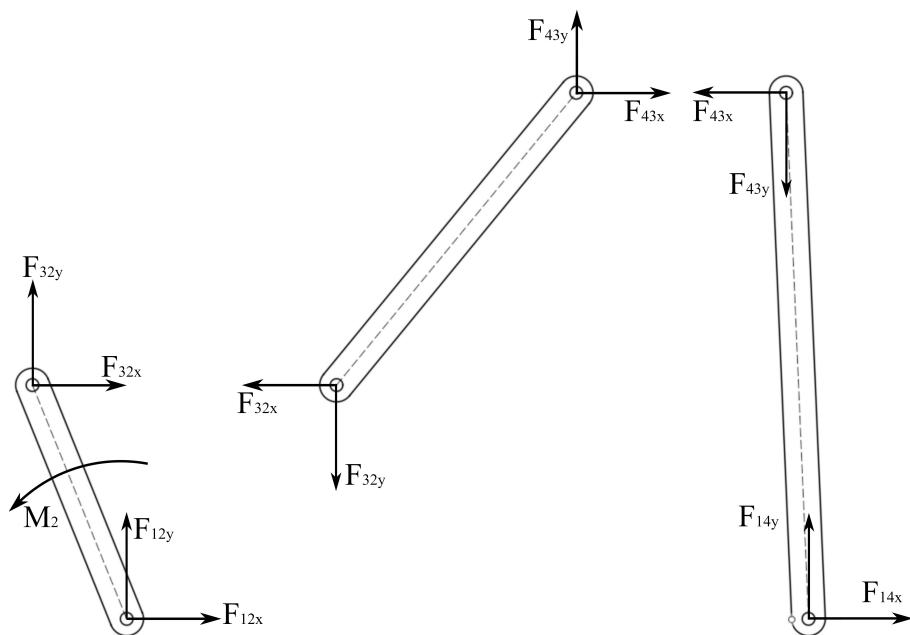
2.1.3 Динамичка анализа

Динамичка анализа представља одређивање односа између кинематских параметара и оптерећења која делују на манипулатор. Динамика обухвата постављање једначина кретања, које описују како се манипулатор креће под утицајем оптерећења. Оптерећења могу бити спољашња и унутрашња. Спољашња настају услед утицаја спољашњих сила и момената, на пример гравитациона сила предмета рада и силе улазних актуатора. Унутрашња оптерећења обухватају реакције веза у зглобовима кинематског ланца.

Једначине кретања могу бити исписане помоћу Њутн-Ојлерових једначина кретања. Оне су допуњене Даламберовим принципом који уводи инерцијалну силу: $\vec{F}_{in} - m\vec{a} = 0$, и инерцијални момент силе: $\vec{M}_{in} - I\vec{\alpha} = 0$. Даламберов принцип нам омогућава да динамичке проблеме посматрамо као статичке [3].

Динамичка анализа обухвата директан и инверзни динамички проблем. Директан проблем обухвата израчунавање трајекторије, брзине и убрзања крајњег ефектора на основу задатих улазних оптерећења. Инверзан проблем обухвата израчунавање потребних улазних оптерећења на основу задате трајекторије, брзине и убрзања крајњег ефектора.

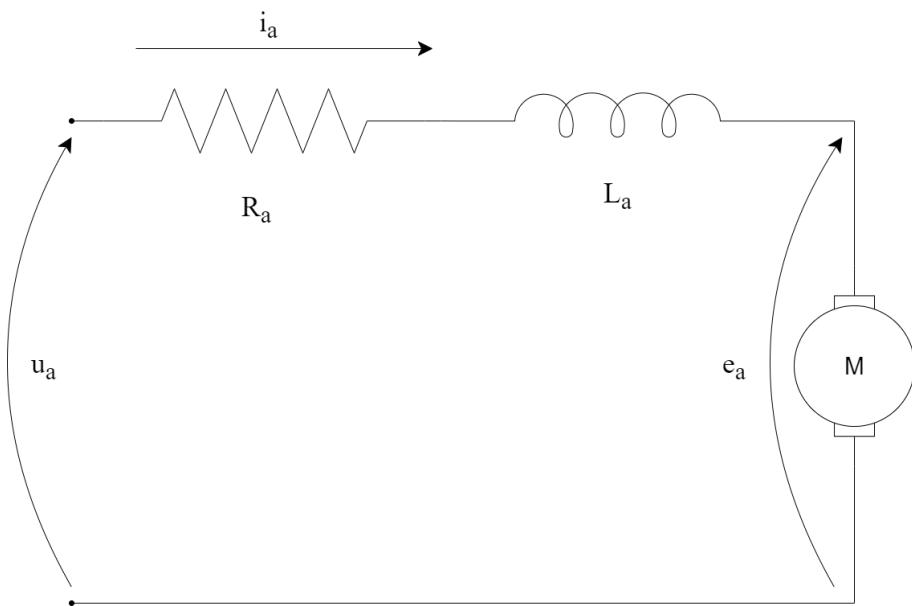
Решавање проблема динамике обухвата вршење декомпозиције кинематског ланца, односно формирање *Free-Body Diagram-a*. Затим се формирају једначине кретања за ротационо и транслаторно кретање сваког сегмента. Притом сила реакције везе којом један сегмент делује на други је истог интензитета и правца, а супротног смера у односу на силу којом тај други сегмент делује на први, на пример: $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$. Формирањем тих једначина добија се систем, чије решење представља решење динамичког проблема [4]. Пример *Free-Body Diagram-a* за зглобни четвороугао је приказан на слици 2.1.4.



Слика 2.1.4 Пример *Free-Body Diagram-a*

2.2 Машине једносмерне струје

Машине једносмерне струје, у наставку MJC, су електромеханички претварачи, који улазну електричну енергију претварају у механички рад. Састоје се из статора и ротора(арматуре). Статор успоставља побудно магнетно поље, због чега се назива и побуда. Кроз ротор се, преко четкица и комутатора, пропушта улазна арматурна струја. По принципу Лоренцовог закона $\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$, индукује се сила која делује на ротор. Комутатор врши промену смера арматурне струје у зависности од положаја ротора, и тиме омогућава да Лоренцова сила увек делује у истом смеру, односно обезбеђује константан обртни момент мотора. Због Фарадејевог закона и Ленцовог правила $e_a = -N \frac{\partial \phi}{\partial t}$, обртање ротора индукује електромоторну силу супротног смера. Слика 2.2.1 приказује еквивалентно коло арматурног намотаја.



Слика 2.2.1 Еквивалентно коло арматуре MJC

2.2.1 Динамички модел MJC

Модел MJC се састоји из 2 подсистема: механичког и електричног, који међусобно интерагују. Посматраћемо MJC која има сталну побуду јачине магнетног флукса ψ_f . Модел се састоји из 3 диференцијалне једначине: напонске равнотеже арматурног намотаја, механичке равнотеже и релације механичке брзине обртања и угла ротора, као и из 2 алгебарске једначине: дефиниције електромагнетног момента и дефиниције индуковане електромоторне сile [5].

$$u_a - e_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

$$m_e - m_m = J_m \dot{\omega} + B_m \omega \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3)$$

$$m_e = \psi_f i_a \quad (4)$$

$$e_a = \psi_f \omega \quad (5)$$

Значења величина математичког модела MJC су:

- u_a - улазни арматурни напон
- e_a - индукована електромоторна сила
- R_a - електрична отпорност арматурног намотаја
- i_a - арматурна струја
- L_a - индуктивност арматурног намотаја
- m_e - електромагнетни момент
- m_m - момент оптерећења
- J_m - момент инерције обртних маса
- ω - угаона брзина арматуре
- B_m - коефицијент пригушчења брзине услед трења
- θ - угао ротора
- ψ_f - јачина магнетног флукса побуде

2.2.2 MJC у стационарном стању

Стационарно стање MJC подразумева режим рада у којем су изводи променљивих стања по времену једнаки нули, односно, арматурни напон и струја, момент оптерећења и угаона брзина су константни. Овакво стање система је равнотежно и омогућава нам да лакше увидимо законитости утицаја улазних величина на излазне. Из једначина (2) и (4) следи:

$$i_a = \frac{B_m \omega + m_m}{\psi_f} \quad (6)$$

Уврштавањем (5) и (6) у (1) добијамо:

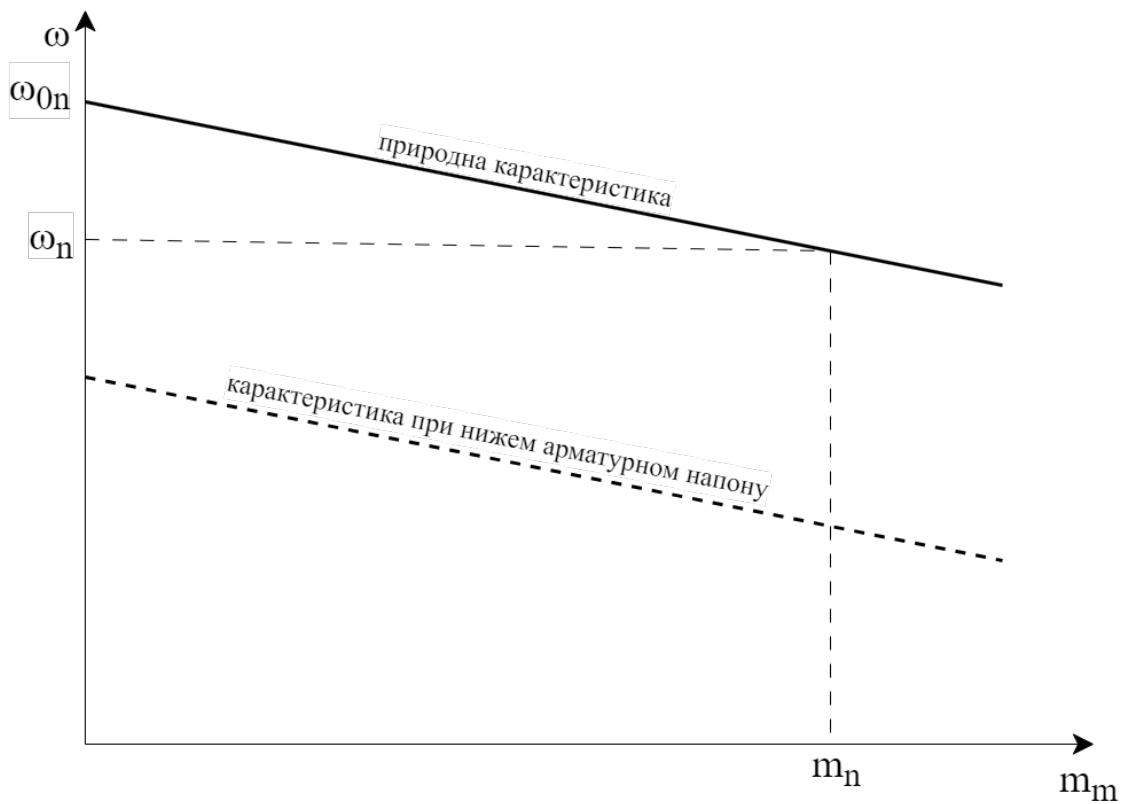
$$\omega \left(1 + \frac{R_a B_m}{\psi_f^2} \right) = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a m_m}{\psi_f^2} \quad (7)$$

Коефицијент пригушчења брзине B_m је типично занемарљив [6], због чега уводимо апроксимацију $B_m = 0$. Тиме (6) и (7) постaju:

$$i_a = \frac{m_m}{\psi_f} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a m_m}{\psi_f^2} \quad (9)$$

Из (9) се може закључити да повећањем арматурног напона, угаона брзина линеарно расте, а повећањем момента оптерећења угаона брзина линеарно опада. Из тог закључка следи и идеја о регулацији брзине MJC променом улазног арматурног напона [7]. Механичка карактеристика за номиналне вредности арматурног напона се назива природна карактеристика, и приказана је на слици 2.2.2. На истој слици је приказана карактеристика при нижем напону.



Слика 2.2.2 Механичка карактеристика MJC

2.3 PID регулација

Регулација процеса представља управљање променљивима од значаја на основу управљачког алгоритма. Управљачки алгоритам представља функцију на основу које се генерише управљачки сигнал. Основни захтеви регулације су: стабилност, тачност и брзина одзива. Два основна типа регулације су у затвореној и отвореној петљи, односно, управљање са повратном спрегом и без повратне спреге.

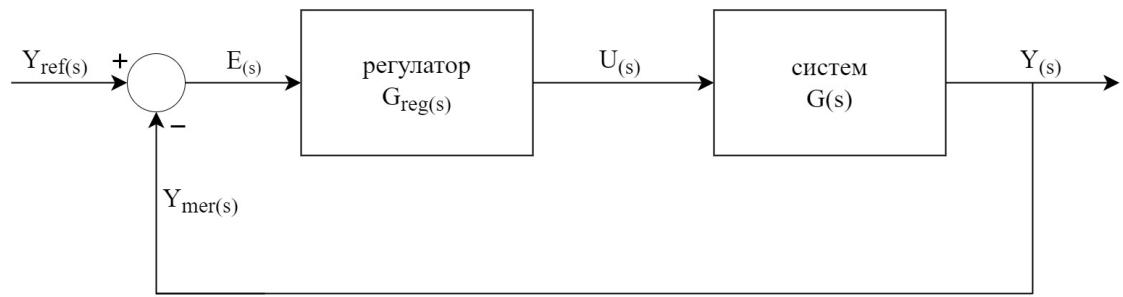
Регулација у отвореној петљи (*open-loop control, non-feedback control loop*) представља управљање у којем вредности излазних сигнала и сметњи немају утицај на управљачке сигнале. Овакви системи немају могућност отклањања грешака које су настале услед спољашњих поремећаја који делују на систем, или услед неидеалног познавања функционисања система. Системи који користе регулацију у отвореној петљи су спори системи који не захтевају велику прецизност и поновљивост. Слика 2.3.1 показује основну блок шему управљања у отвореној спрези.



Слика 2.3.1 Блок шема управљања у отвореној спрези

Регулација у затвореној петљи (*closed-loop control, feedback control loop*) представља управљање у којем вредност управљачких сигнала зависи од разлике референтне (жељене) вредности и

измерене вредности излазног сигнала. Овакви системи не захтевају идеално познавање управљаног система и имају могућност отклањања грешака услед спољашњих поремећаја. Слика 2.3.2 показује блок шему управљања у затвореној спрези.



Слика 2.3.2 Блок шема управљања у затвореној спрези

2.3.1 Пропорционално дејство

Регулација на основу пропорционалног дејства, односно P регулатори, представљају најједноставнији тип регулације са затвореном повратном спрегом. Управљачки сигнал је сигнал грешке помножен фактором појачања пропорционалног дејства [8]:

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)}, \quad (10)$$

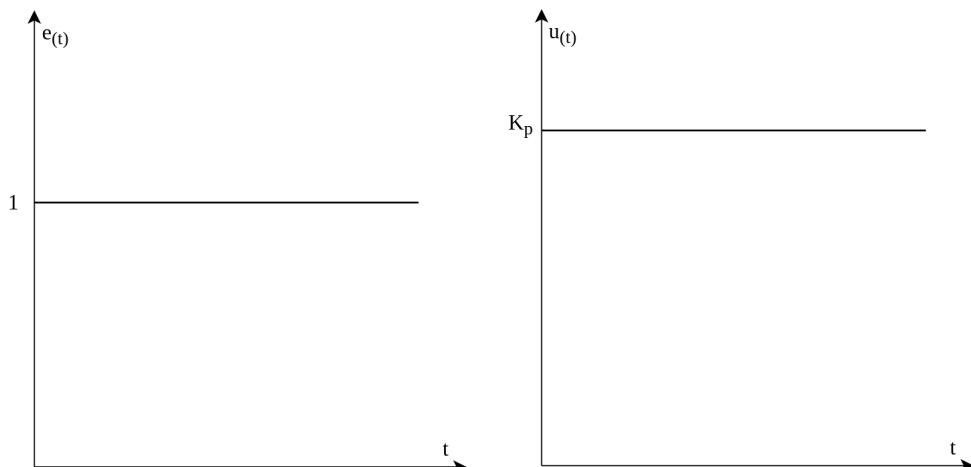
где K_p представља фактор појачања пропорционалног дејства, $u_{(t)}$ је управљачки сигнал, а $e_{(t)}$ је сигнал грешке. Сигнал грешке је једнак разлици референтне вредности и измерене вредности излаза, односно:

$$e_{(t)} = y_{ref(t)} - y_{mer(t)} \quad (11)$$

Функција преноса P регулатора у комплексном домену је:

$$G_{p(s)} = \frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = K_p \quad (12)$$

При одскочном сигналу грешке, одзив P регулатора изгледа као на слици 2.3.3.



Слика 2.3.3 Одзив P регулатора на одскочни сигнал грешке

2.3.2 Интегрално дејство

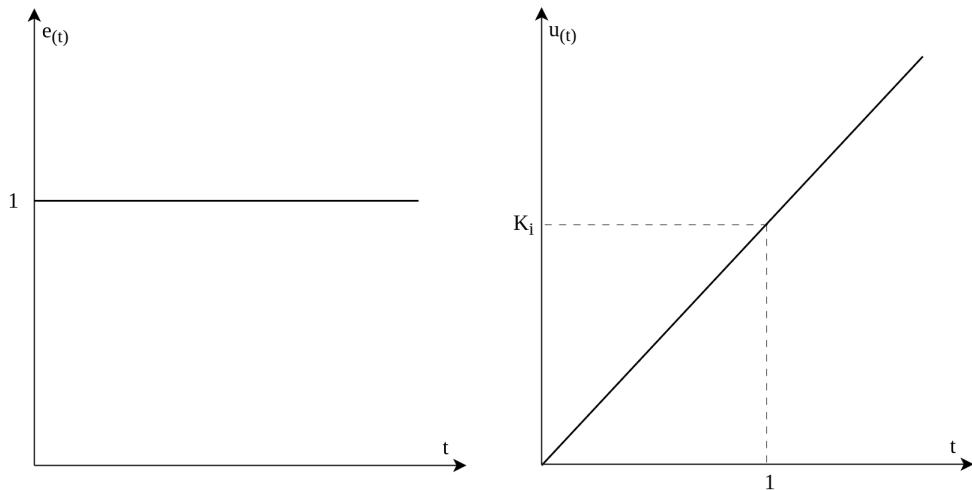
Регулација на основу интегралног дејства, односно I регулатори, су настали како би отклонили главну ману P регулатора. Та мана је немогућност потпуног отклањања грешке у стационарном стању. I дејство негативно утиче на брзину одзива и на стабилност система. Управљачки сигнал I регулатора представља одређен интеграл сигнала грешке по времену, помножен фактором појачања интегралног дејства K_i [8]:

$$u_{(t)} = K_i \int_0^t e_{(t)} dt \quad (13)$$

Функција преноса I регулатора у комплексном домену је:

$$G_{i(s)} = \frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = \frac{K_i}{s} \quad (14)$$

При одскочном сигналу грешке, одзив I регулатора изгледа као на слици 2.3.4.



Слика 2.3.4 Одзив I регулатора на одскочни сигнал грешке

2.3.3 Диференцијално дејство

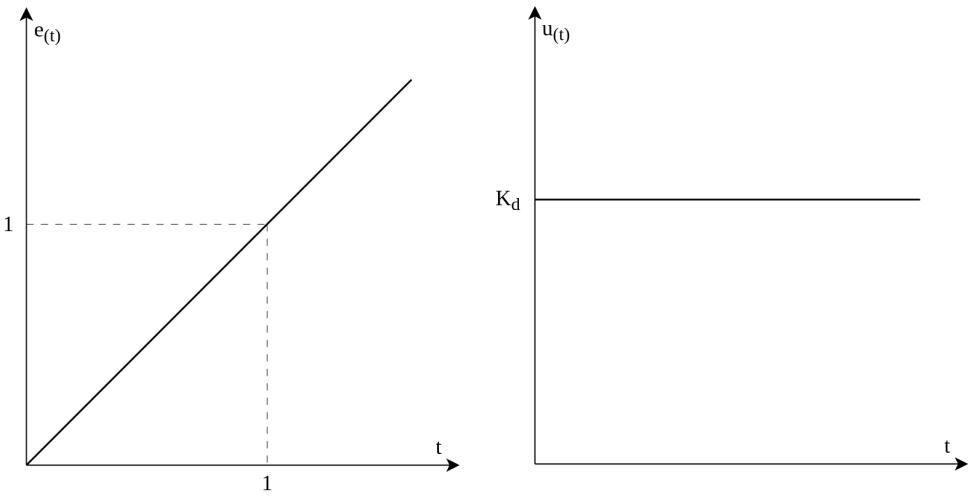
Регулација на основу диференцијалног дејства, односно D регулатори, су настали како би отклонили мане I регулатора, односно, како би убрзали одзив у прелазном режиму и смањили осцилације у устаљеном стању. Управљачки сигнал D регулатора представља извод сигнала грешке по времену, помножен фактором појачања диференцијалног дејства K_d [8]:

$$u_{(t)} = K_d \frac{de_{(t)}}{dt} \quad (15)$$

Функција преноса D регулатора у комплексном домену је:

$$G_{d(s)} = \frac{U_{(s)}}{E_{(s)}} = K_d s \quad (16)$$

При сигналу грешке типа рампа, одзив D регулатора изгледа као на слици 2.3.5.



Слика 2.3.5 Одзив D регулатора на сигнал грешке типа рампа

2.3.4 PID

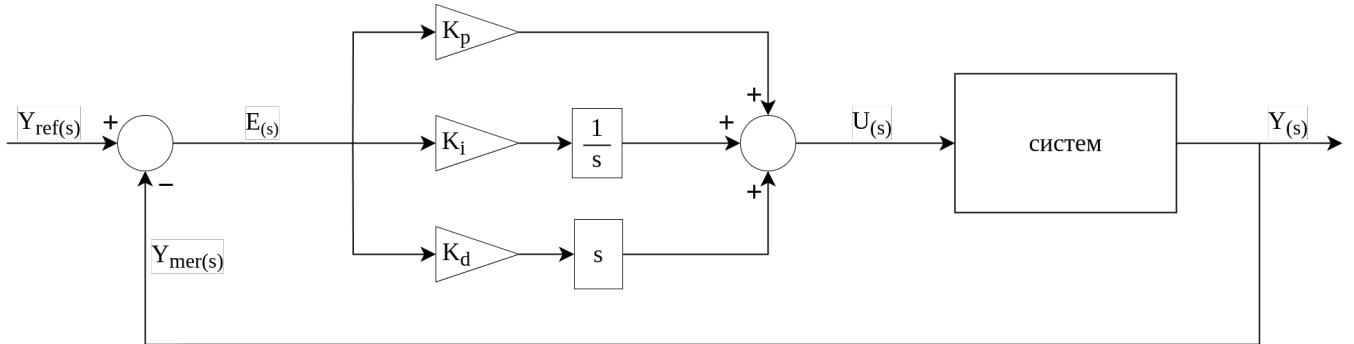
PID регулатор настаје комбиновањем сва три претходно наведена дејства. Подешавањем фактора појачања пропорционалног, диференцијалног и интегралног дејства могу се обезбедити жељене перформансе система. Управљачки сигнал PID регулатора је:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Функција преноса PID регулатора у комплексном домену је:

$$G_{pid(s)} = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (18)$$

Блок шема која обухвата све 3 дејства PID регулатора је приказана на слици 2.3.6.



Слика 2.3.6 Блок шема PID регулатора у затвореној спрези

2.4 Particle swarm optimization

Оптимизација представља процес одређивања најбољег решења (према једном или више критеријума) у скупу потенцијалних решења. То се постиже дефинисањем циља у облику параметризоване функције f , која се назива критеријум оптималности или функција циља, тако да се оптимизација сведе на проналажење вредности параметара који минимизују или максимизују вредност f [9].

PSO (*Particle swarm optimization*), односно оптимизација ројем честица, је метахеуристичка глобална оптимизациона метода, која припада групи алгоритама заснованих на концепту интелигенције ројева [9]. Инспирисана је социјалним понашањем примећеним у јатима риба и птица при потрази за храном. Скуп потенцијалних решења проблема оптимизације је дефинисан као рој честица које могу да се крећу кроз параметарски простор, дефинишући трајекторије које су вођене сопственим и глобалним најбољим учинком.

2.4.1 Кретање честица

У PSO алгоритму, свако потенцијално решење се назива честица, и представља тачку у N -димензијоналном простору, где N представља број променљивих у критеријуму оптималности. Позиција i -те честице се изражава преко вектора \vec{x}_i :

$$\vec{x}_i = [x_{i1} x_{i2} x_{i3} \dots x_{iN}]^T \quad (19)$$

Популација од M честица чини рој:

$$\mathbf{X} = [\vec{x}_1 \vec{x}_2 \dots \vec{x}_M] \quad (20)$$

При потрази за оптималним решењем, свака честица итеративно дефинише своју трајекторију на основу једначине кретања:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1), \quad (21)$$

где t и $t+1$ представљају тренутну и наредну итерацију извршавања алгоритма, а \vec{v}_i представља вектор брзине i -те честице. Брзина i -те честице у наредној итерацији се рачуна преко формуле:

$$\vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + c_p(\vec{p}_i - \vec{x}_i(t))R_1(t) + c_g(\vec{g} - \vec{x}_i(t))R_2(t), \quad (22)$$

где w представља коефицијент инерције, c_p и c_g су когнитивни и социјални коефицијенти, који се заједно називају коефицијенти убрзања, \vec{p}_i је вектор најбољег решења које је i -та честица до сад пронашла, \vec{g} је вектор најбољег решења које је рој до сад пронашао, R_1 и R_2 су насумични фактори вредности $[0,1]$.

Из једначине (22) се може уочити да се вектор брзине састоји из 3 компоненте:

- инерцијалне,
- когнитивне и
- социјалне

Инерцијална компонента спречава драстичне промене брзине честице. Коефицијент инерције је фактор који контролише инерцију честице регулишући допринос брзине из претходне итерације. Овај фактор утиче на однос експлорације и експлоатације. Веће вредности коефицијента инерције фаворизују глобалну експлорацију, док мање вредности фаворизују локалну експлорацију. У основној варијанти PSO алгоритма, која је дефинисана изразима (21) и (22), коефицијент инерције је био константан и јединичне вредности, због чега није истицан као посебан параметар [10].

Когнитивна компонента представља тенденцију честица да се врате на своју претходно пронађену најбољу позицију. Социјална компонента представља склоност честица да се крећу ка најбољој позицији целог роја. Потребна је одговарајућа равнотежа између вредности ових кофицијената, јер неприкладне вредности могу да резултују дивергентним или цикличним понашањем роја [11]. Како се коефицијенти повећавају, фреквенција осцилација честица око оптимума се повећава, док мање вредности доводе до синусоидалних путања [9][12]. Уколико су коефицијенти једнаки, честице се крећу ка тачки на средини између личног и глобалног најбољег решења [13]. При вредностима $c_p >> c_g$, лична најбоља позиција има виште утицаја на кретање честица, што може довести до претеране експлорације у простору претраге [11]. При вредностима $c_p << c_g$, глобална најбоља позиција има виште утицаја на кретање честица, што може довести до превремене конвергенције (локалног оптимума) [11]. Коефицијенти убрзања су усвајани по различитим препорукама. Неке од препорука за усвајање вредности су [10]:

- $c_p = c_g = 2$
- $c_p = c_g = 0.5$
- $c_p = 2.8, c_g = 1.3$

2.4.2 Модификације PSO алгоритма

Основна варијанта PSO алгоритма показује задовољавајуће перформансе за једноставније проблеме. Код сложенијих проблема, који обухватају присуство великог броја локалних оптимума и вишедимензионалних простора претраге, основна варијанта није довољно ефикасна [10]. Због тога су уведене бројне модификације.

Често коришћена модификација PSO алгоритма уводи концепт променљиве инерције. Уколико се у почетним итерацијама усвоји висока вредност коефицијента инерције, способност роја да претражи целокупан простор претраге је велика. Како претрага одмиче, вредност инерције се смањује како би се смањивао утицај експлорације, а повећавао утицај експлоатације. То дозвољава честицама да се више крећу на основу сопственог искуства и искуства целог роја, а мање услед сопствене инерције [10]. Најједноставнија имплементација овакве модификације линеарно смањује вредности коефицијента инерције, од почетне вредности $w_{max} = 0.9$ до крајње вредности $w_{min} = 0.4$. Друге стратегије променљиве инерције обухватају [9]:

- насумично мењање коефицијента, коришћењем насумичног параметра $r \in (0, 1)$: $w(t) = 0.5 + \frac{r}{2}$,
- смањивање инерције на основу односа глобалног и локалног оптимума: $w_i(t) = 1.1 - \frac{p_i}{g}$,
- хаотично смањивање инерције, комбиновањем линеарног смањивања и параметра $z = 4r(1 - r)$, где је $r \in (0, 1)$ насумичан параметар.

Друга модификација уводи концепт ограничавања максималне дозвољене вредности брзине честица. Ова модификација је уведена због дивергенције роја услед неконтролисаног повећања интензитета брзина. Та дивергенција се назива експлозија роја. Вредност максималне брзине, по координатном правцу i , се израчунава на основу следећег израза [10]:

$$v_{max(i)} = k \cdot \min(b_i - a_i), \quad (23)$$

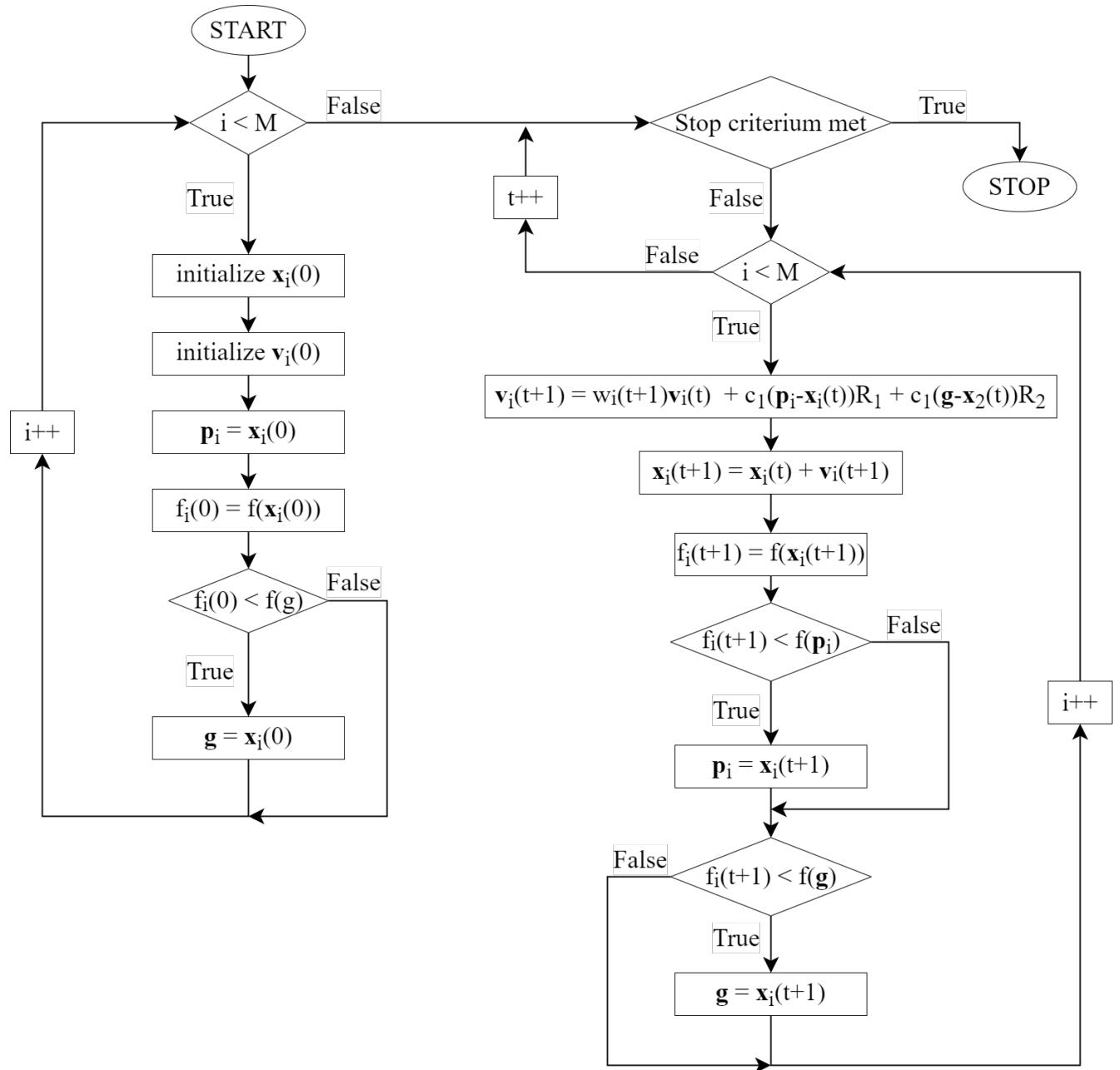
где k представља одговарајући коефицијент, а a_i и b_i представљају горњу и доњу границу вредности координата по том правцу. За параметар k се препоручују вредности у опсегу $(0.1, 1)$ [10].

Још једна модификација PSO алгоритма уводи концепт околине. Код неких сложенијих проблема, PSO алгоритам има проблем западања честица у локалне оптимуме. Овај проблем настаје због формирања униформног роја у крајњим фазама алгоритма, што је резултат усмеравања свих честица ка једној глобално откријеној најбољој позицији. Појам околине смањује утицај глобалног сазнања о најбољем решењу, тако што свака чештица дели своја сазнања само са честицама у својој околини, уместо са целим ројем. Једина разлика у једначини кретања честица из основног PSO алгоритма и ове модификације се огледа у томе што се глобална најбоља позиција усваја у околини [10]. Околина честица може да се одређује на основу различитих шема, које се називају топологије. Две основне топологије су:

- на основу удаљености и
- на основу индекса (прстенаста топологија).

Основна варијанта PSO алгоритма је глобална и има звездасту топологију.

Блок шема PSO алгоритма која је представљена на слици 2.4.1 приказује целокупан принцип рада алгоритма.



Слика 2.4.1 Блок шема PSO алгоритма

3 Имплементација

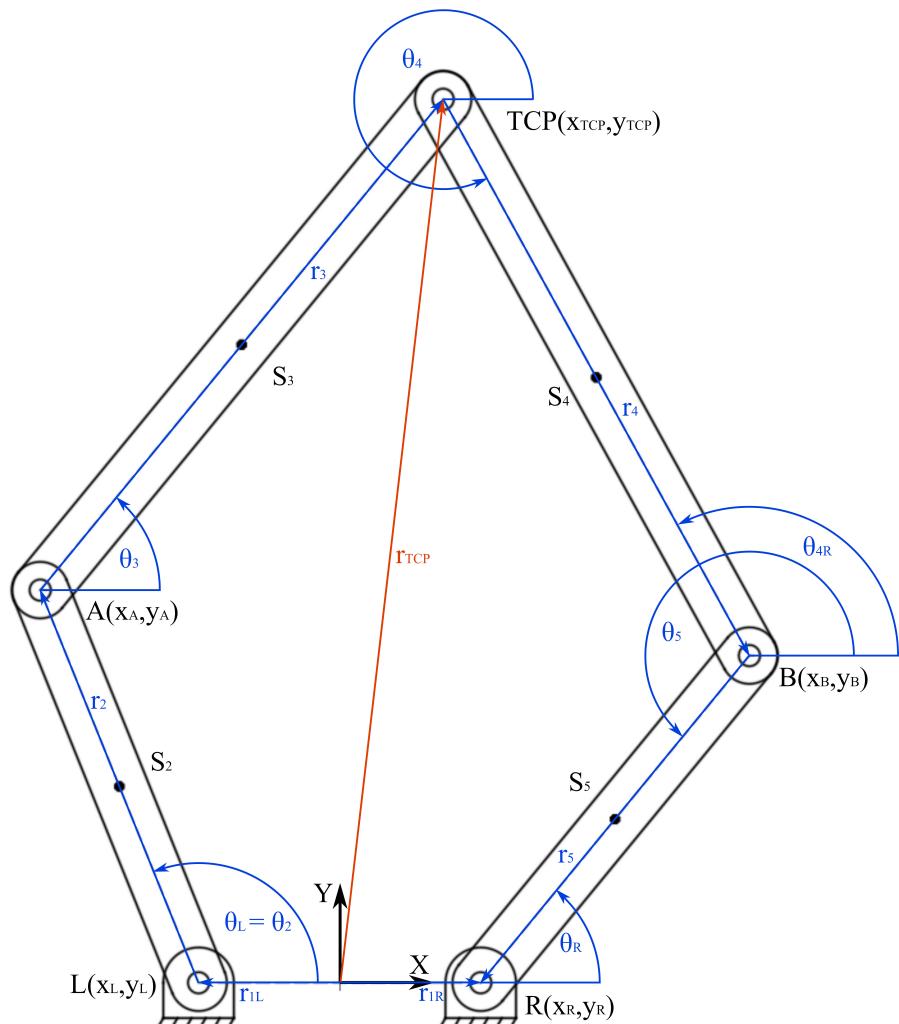
3.1 Петочлани паралелни манипулатор

Петочлани паралелни манипулатор је равански механизам, који се састоји из 5 сегмената и 5 ротационих зглобова, односно, то је механизам типа 5R. Оса ротације сваког зглоба је нормална на раван у којој се механизам креће. Сегмент 1 је непокретан, односно база. Сегменти 2 и 5 су актиуирани помоћу ротационог актуатора и називају се *proximal*. Сегменти 3 и 4 су пасивни и називају се *distal*. Зглоб између пасивних сегмената посматрамо као крајњи ефектор, у наставку TCP (*tool center point*).

Поседује 2 степена слободе (DOF, *degrees of freedom*), који одговарају положају TCP у равни. Ово значи да врх крајњег ефектора може да се креће дуж *x* и *y* оса координатног система, и да зависи искључиво од положаја актиуираних чланова и конфигурације манипулатора.

3.1.1 Означавање и параметри

Петочлани паралелни манипулатор са карактеристичним векторима је приказан на слици 3.1.1.



Слика 3.1.1 Петочлани паралелни манипулатор

Све ознаке и вредности константних параметара које се користе при моделовању манипулатора су:

- L, R, A, B, TCP - положаји зглобова
- x_{TCP}, y_{TCP} - координате TCP
- $\vec{r_1}_L, \vec{r_1}_R, \vec{r_2}, \vec{r_3}, \vec{r_4}, \vec{r_5}$ - карактеристични вектори
- S_2, S_3, S_4, S_5 - положаји центара маса сегмената
- $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ - оријентација карактеристичних вектора
- $\theta_L = \theta_2, \theta_R = \theta_5 - \pi$ - углови *proximal* сегмената
- $\theta_{4R} = \theta_4 - \pi$ - оријентација сегмента 4 уведена ради лакше кинематичке анализе
- $L = 40mm$ - дужина базе
- $P = 60mm$ - дужина *proximal* сегмената
- $D = 90mm$ - дужина *distal* сегмената
- $m_P = 100g$ - маса *proximal* сегмената
- $m_D = 120g$ - маса *distal* сегмената
- $J_{SP} = \frac{1}{12}m_P P^2, J_{SD} = \frac{1}{12}m_D D^2$ - моменти инерција *proximal* и *distal* сегмената за центре маса
- $\vec{v}_{TCP}, \vec{a}_{TCP}$ - брзина и убрзање TCP
- v_{xTCP}, v_{yTCP} - x и y компоненте брзине TCP
- a_{xTCP}, a_{yTCP} - x и y компоненте убрзања TCP
- $\omega_L, \omega_R, \omega_3, \omega_4$ - интензитети угаоних брзина сегмената
- $\alpha_L, \alpha_R, \alpha_3, \alpha_4$ - интензитети угаоних убрзања сегмената
- $\vec{a}_{S2}, \vec{a}_{S3}, \vec{a}_{S4}, \vec{a}_{S5}$ - убрзања центра маса сегмената
- a_{Sx}, a_{Sy} - x и y компоненте убрзања центара маса сегмената
- M_L, M_R - улазни обртни моменти
- F_{12x}, F_{12y} - x и y компоненте реакције везе којом сегмент 1 делује на сегмент 2

3.1.2 Кинематика

Директан кинематски модел манипулатора описује како се сви сегменти и TCP крећу у зависности од вредности угла, угаоне брзине и угаоног убрзања улазних сегмената.

Улази у директан кинематски модел су:

- θ_L, θ_R - углови,
- ω_L, ω_R - угаоне брзине и
- α_L, α_R - угаона убрзања *proximal* сегмената

Излази из директног кинематског модела су:

- θ_3, θ_{4R} - углови,
- ω_3, ω_4 - угаоне брзине,
- α_3, α_4 - угаона убрзања *distal* сегмената и
- $x_{TCP}, y_{TCP}, \vec{v}_{TCP}, \vec{a}_{TCP}$ - координате, брзина и убрзање TCP

Једначине положаја TCP су:

$$\vec{r}_{TCP} = \vec{r}_{1L} + \vec{r}_2 + \vec{r}_3 \quad (24)$$

$$\vec{r}_{TCP} = \vec{r}_{1R} - \vec{r}_5 - \vec{r}_4 \quad (25)$$

Пребацивањем у Ојлеров облик и убацивањем параметара постају:

$$\vec{r}_{TCP} = \frac{L}{2}e^{i\pi} + Pe^{i\theta_L} + De^{i\theta_3} \quad (26)$$

$$\vec{r}_{TCP} = \frac{L}{2}e^{i0} + Pe^{i\theta_R} + De^{i\theta_{4R}} \quad (27)$$

Разлагањем на x и y компоненте, једначине (26) и (27) постају:

$$x_{TCP} = -\frac{L}{2} + P\cos\theta_L + D\cos\theta_3 \quad (28)$$

$$x_{TCP} = \frac{L}{2} + P\cos\theta_R + D\cos\theta_{4R} \quad (29)$$

$$y_{TCP} = P\sin\theta_L + D\sin\theta_3 \quad (30)$$

$$y_{TCP} = P\sin\theta_R + D\sin\theta_{4R} \quad (31)$$

Једначине (28)-(31) чине систем са 4 непознате: $\theta_3, \theta_{4R}, x_{TCP}, y_{TCP}$. Решења за θ_3, θ_{4R} су:

$$\theta_3 = 2\arctg \left(\frac{-\frac{y_A - y_B}{D} + \sigma_1 \sqrt{\left(\frac{x_A - x_B}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_A - y_B}{D}\right)^2 - \left(\left(\frac{x_A - x_B}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_A - y_B}{D}\right)^2\right)^2 \frac{1}{4}}}{\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x_A - x_B}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_A - y_B}{D}\right)^2\right) - \frac{x_A - x_B}{D}} \right) \quad (32)$$

$$\theta_{4R} = 2 \arctg \left(\frac{-\frac{y_B - y_A}{D} + \sigma_2 \sqrt{\left(\frac{x_B - x_A}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_B - y_A}{D}\right)^2 - \left(\left(\frac{x_B - x_A}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_B - y_A}{D}\right)^2\right)^2 \frac{1}{4}}}{\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x_B - x_A}{D}\right)^2 + \left(\frac{y_B - y_A}{D}\right)^2\right) - \frac{x_B - x_A}{D}} \right), \quad (33)$$

где $\sigma_1 = +1$ и $\sigma_2 = -1$, представљају избор конфигурације манипулатора. Вредности за x_{TCP} , y_{TCP} се добијају враћањем (9) и (10) у првобитан систем једначина.

Диференцирањем (28)-(31) добијају се једначине брзине TCP-а:

$$v_{xTCP} = -P \sin \theta_L \omega_L - D \sin \theta_3 \omega_3 \quad (34)$$

$$v_{xTCP} = -P \sin \theta_R \omega_R - D \sin \theta_{4R} \omega_4 \quad (35)$$

$$v_{yTCP} = P \cos \theta_L \omega_L + D \cos \theta_3 \omega_3 \quad (36)$$

$$v_{yTCP} = P \cos \theta_R \omega_R + D \cos \theta_{4R} \omega_4 \quad (37)$$

Записане у матричној форми су:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & -D \sin \theta_3 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -D \sin \theta_{4R} \\ 0 & 1 & -D \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -D \cos \theta_{4R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{xTCP} \\ v_{yTCP} \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \sin \theta_L \omega_L \\ P \sin \theta_R \omega_R \\ P \cos \theta_L \omega_L \\ P \cos \theta_R \omega_R \end{bmatrix} \quad (38)$$

Диференцирањем (34)-(37) добијају се једначине убрзања TCP-а:

$$a_{xTCP} = -P \sin \theta_L \alpha_L - P \cos \theta_L \omega_L^2 - D \sin \theta_3 \alpha_3 - D \cos \theta_3 \omega_3^2 \quad (39)$$

$$a_{xTCP} = -P \sin \theta_R \alpha_R - P \cos \theta_R \omega_R^2 - D \sin \theta_{4R} \alpha_4 - D \cos \theta_{4R} \omega_4^2 \quad (40)$$

$$a_{yTCP} = P \cos \theta_L \alpha_L - P \sin \theta_L \omega_L^2 + D \cos \theta_3 \alpha_3 - D \sin \theta_3 \omega_3^2 \quad (41)$$

$$a_{yTCP} = P \cos \theta_R \alpha_R - P \sin \theta_R \omega_R^2 + D \cos \theta_{4R} \alpha_4 - D \sin \theta_{4R} \omega_4^2 \quad (42)$$

Записане у матричној форми су:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & D \sin \theta_3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & D \sin \theta_{4R} \\ 0 & 1 & -D \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -D \cos \theta_{4R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xTCP} \\ a_{yTCP} \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P \sin \theta_L \alpha_L - P \cos \theta_L \omega_L^2 - D \cos \theta_3 \omega_3^2 \\ -P \sin \theta_R \alpha_R - P \cos \theta_R \omega_R^2 - D \cos \theta_{4R} \omega_4^2 \\ P \cos \theta_L \alpha_L - P \sin \theta_L \omega_L^2 - D \sin \theta_3 \omega_3^2 \\ P \cos \theta_R \alpha_R - P \sin \theta_R \omega_R^2 - D \sin \theta_{4R} \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

У прилогу А је MATLAB функција која служи за израчунавање директне кинематике.

Убрзања центара маса свих сегмената се добијају из векторских једначина које изражавају њихов положај преко карактеристичних вектора:

$$\vec{r}_{S2} = \vec{r}_{1L} + \frac{1}{2} \vec{r}_2 \quad (44)$$

$$\vec{r}_{S3} = \vec{r}_{1L} + \vec{r}_2 + \frac{1}{2} \vec{r}_3 \quad (45)$$

$$\vec{r}_{S4} = \vec{r}_{1R} - \vec{r}_5 - \frac{1}{2} \vec{r}_4 \quad (46)$$

$$\vec{r}_{S5} = \vec{r}_{1R} - \frac{1}{2}\vec{r}_5 \quad (47)$$

Два пута диференцирамо ове једначине, и затим их разлажемо на x и y компоненте како бисмо добили изразе за убрзања центара маса:

$$a_{S2x} = -\frac{P}{2}\omega_L^2 \cos\theta_L - \frac{P}{2}\alpha_L \sin\theta_L \quad (48)$$

$$a_{S2y} = -\frac{P}{2}\omega_L^2 \sin\theta_L + \frac{P}{2}\alpha_L \cos\theta_L \quad (49)$$

$$a_{S3x} = -P\omega_L^2 \cos\theta_L - P\alpha_L \sin\theta_L - \frac{D}{2}\omega_3^2 \cos\theta_3 - \frac{D}{2}\alpha_3 \sin\theta_3 \quad (50)$$

$$a_{S3y} = -P\omega_L^2 \sin\theta_L + P\alpha_L \cos\theta_L - \frac{D}{2}\omega_3^2 \sin\theta_3 + \frac{D}{2}\alpha_3 \cos\theta_3 \quad (51)$$

$$a_{S4x} = -P\omega_R^2 \cos\theta_R - P\alpha_R \sin\theta_R - \frac{D}{2}\omega_4^2 \cos\theta_{4R} - \frac{D}{2}\alpha_4 \sin\theta_{4R} \quad (52)$$

$$a_{S4y} = -P\omega_R^2 \sin\theta_R + P\alpha_R \cos\theta_R - \frac{D}{2}\omega_4^2 \sin\theta_{4R} + \frac{D}{2}\alpha_4 \cos\theta_{4R} \quad (53)$$

$$a_{S5x} = -\frac{P}{2}\omega_R^2 \cos\theta_R - \frac{P}{2}\alpha_R \sin\theta_R \quad (54)$$

$$a_{S5y} = -\frac{P}{2}\omega_R^2 \sin\theta_R + \frac{P}{2}\alpha_R \cos\theta_R \quad (55)$$

За инверзан кинематски проблем решићемо само систем за положај, јер нам служи само за одређивање почетних и референтних углова манипулатора. За решавање инверзне кинематике такође користимо (28)-(31), само што сматрамо да су нам непознате: θ_L , θ_R , θ_3 , θ_{4R} . Решавањем само за θ_L и θ_R добијамо:

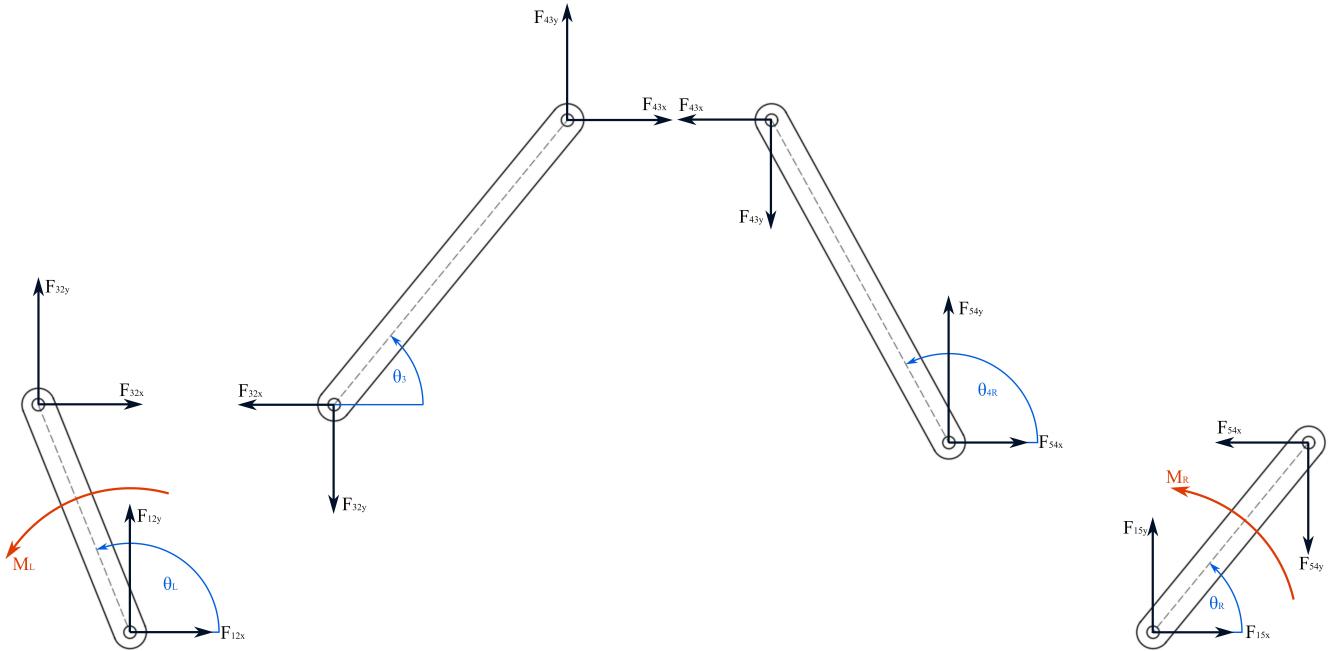
$$\theta_L = 2\arctg \left(\frac{1 + \sigma_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\left(x_{TCP} + \frac{L}{2} \right)^2 + y_{TCP}^2 + P^2 - D^2}{2y_{TCP}P} \right)^2 + \left(\frac{x_{TCP} + \frac{L}{2}}{y_{TCP}} \right)^2}}}{\frac{\left(x_{TCP} + \frac{L}{2} \right)^2 + y_{TCP}^2 + P^2 - D^2}{2y_{TCP}P} + \frac{x_{TCP} + \frac{L}{2}}{y_{TCP}}} \right) \quad (56)$$

$$\theta_R = 2\arctg \left(\frac{1 + \sigma_2 \sqrt{1 - \left(\frac{\left(x_{TCP} - \frac{L}{2} \right)^2 + y_{TCP}^2 + P^2 - D^2}{2y_{TCP}P} \right)^2 + \left(\frac{x_{TCP} - \frac{L}{2}}{y_{TCP}} \right)^2}}}{\frac{\left(x_{TCP} - \frac{L}{2} \right)^2 + y_{TCP}^2 + P^2 - D^2}{2y_{TCP}P} + \frac{x_{TCP} - \frac{L}{2}}{y_{TCP}}} \right), \quad (57)$$

где $\sigma_1 = +1$ и $\sigma_2 = -1$, представљају избор конфигурације манипулатора. У прилогу Б је MATLAB функција која служи за израчунавање инверзне кинематике.

3.1.3 Динамика

На слици 3.1.2 су приказана сва оптерећења која делују на чланове, у облику *Free-Body Diagram*-a.



Слика 3.1.2 *Free-Body Diagram* петочланог паралелног манипулатора

Инверзан динамички модел манипулатора описује потребна улазна оптерећења како би се остварило задато кретање.

Њутн-Ојлерове једначине кретања за сваки члан ћемо разставити на x и y компоненте. За члан 2 једначине су:

$$m_P a_{s2x} = F_{12x} + F_{32x} \quad (58)$$

$$m_P a_{s2y} = F_{12y} + F_{32y} \quad (59)$$

$$J_{SP}\alpha_L = M_L + \frac{P}{2}F_{32y}\cos\theta_L - \frac{P}{2}F_{32x}\sin\theta_L - \frac{P}{2}F_{12y}\cos\theta_L + \frac{P}{2}F_{12x}\sin\theta_L \quad (60)$$

За члан 3:

$$m_D a_{s3x} = -F_{32x} + F_{43x} \quad (61)$$

$$m_D a_{s3y} = -F_{32y} + F_{43y} \quad (62)$$

$$J_{SD}\alpha_3 = \frac{D}{2}F_{43y}\cos\theta_3 - \frac{D}{2}F_{43x}\sin\theta_3 + \frac{D}{2}F_{32y}\cos\theta_3 - \frac{D}{2}F_{32x}\sin\theta_3 \quad (63)$$

За члан 4:

$$m_D a_{s4x} = -F_{43x} + F_{54x} \quad (64)$$

$$m_D a_{s4y} = -F_{43y} + F_{54y} \quad (65)$$

$$J_{SD}\alpha_4 = -\frac{D}{2}F_{54y}\cos\theta_{4R} + \frac{D}{2}F_{54x}\sin\theta_{4R} - \frac{D}{2}F_{43y}\cos\theta_{4R} + \frac{D}{2}F_{43x}\sin\theta_{4R} \quad (66)$$

За члан 5:

$$m_P a_{s5x} = -F_{43x} + F_{54x} \quad (67)$$

$$m_P a_{s5y} = -F_{43y} + F_{54y} \quad (68)$$

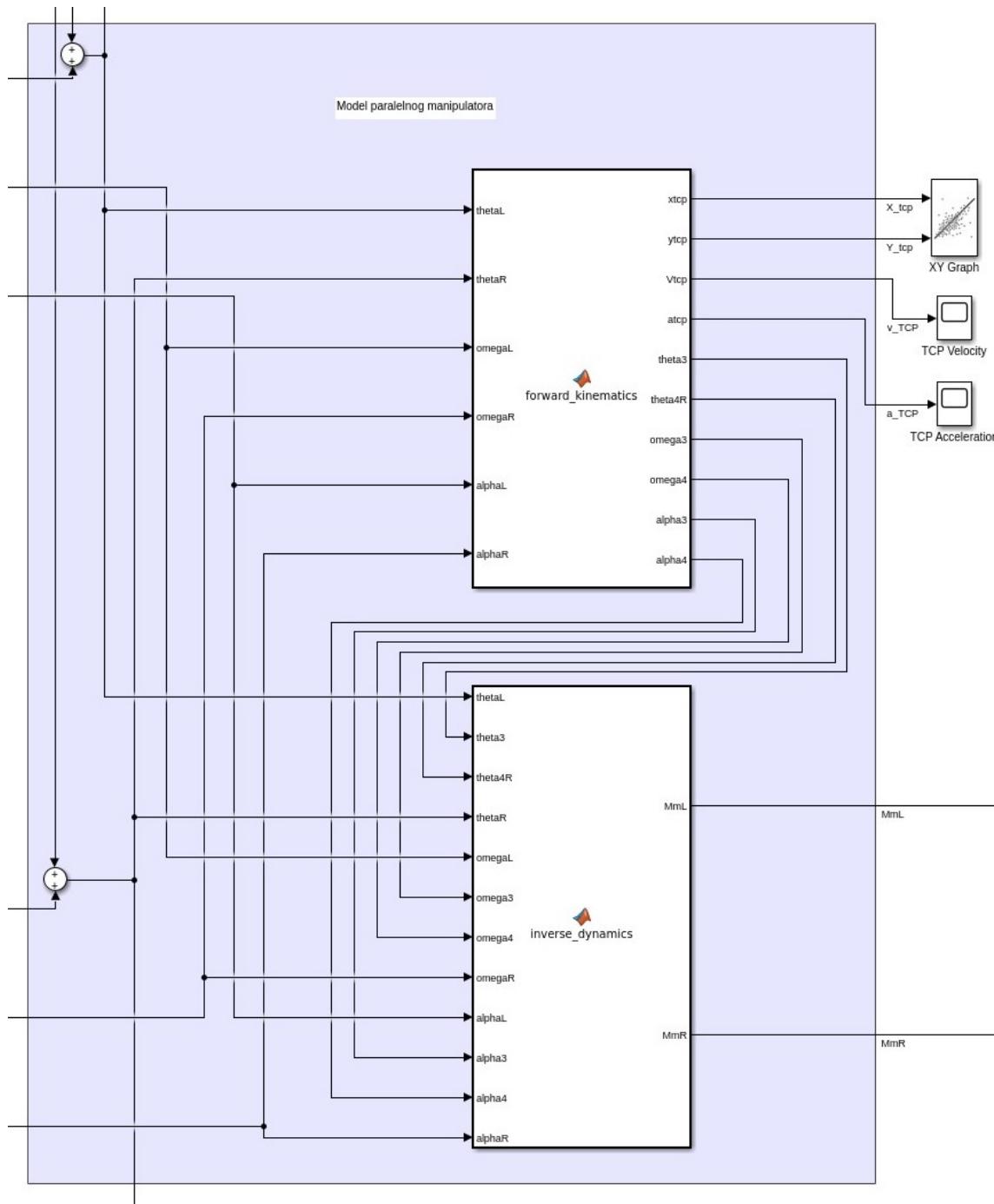
$$J_{SP}\alpha_R = M_R + \frac{P}{2}F_{54y}\cos\theta_R - \frac{P}{2}F_{54x}\sin\theta_R + \frac{P}{2}F_{15y}\cos\theta_R - \frac{P}{2}F_{15x}\sin\theta_R \quad (69)$$

Записане у матричној форми су:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{P}{2}\sin\theta_L & -\frac{P}{2}\cos\theta_L & 1 & -\frac{P}{2}\sin\theta_L & \frac{P}{2}\cos\theta_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D}{2}\sin\theta_3 & \frac{D}{2}\cos\theta_3 & 1 & -\frac{D}{2}\sin\theta_3 & \frac{D}{2}\cos\theta_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2}\sin\theta_{4R} & -\frac{D}{2}\cos\theta_{4R} & 1 & \frac{D}{2}\sin\theta_{4R} & -\frac{D}{2}\cos\theta_{4R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{P}{2}\sin\theta_R & \frac{P}{2}\cos\theta_R & 1 & -\frac{P}{2}\sin\theta_R & \frac{P}{2}\cos\theta_R \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} F_{12x} \\ F_{12y} \\ M_L \\ F_{32x} \\ F_{32y} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{54x} \\ F_{54y} \\ F_{15x} \\ F_{15y} \\ M_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_P a_{S2x} \\ m_P a_{S2y} \\ J_{SP}\alpha_L \\ m_D a_{S3x} \\ m_D a_{S3y} \\ J_{SD}\alpha_3 \\ m_D a_{S4x} \\ m_D a_{S4y} \\ J_{SD}\alpha_4 \\ m_P a_{S5x} \\ m_P a_{S5y} \\ J_{SD}\alpha_R \end{bmatrix} \quad (71)$$

У прилогу В је MATLAB функција која служи за израчунавање инверзне динамике. Слика 3.1.3 показује имплементацију целокупног модела петочланог манипулатора. Састоји се из 2 блок функције: директне кинематике и инверзне динамике, као и њиховог повезивања.

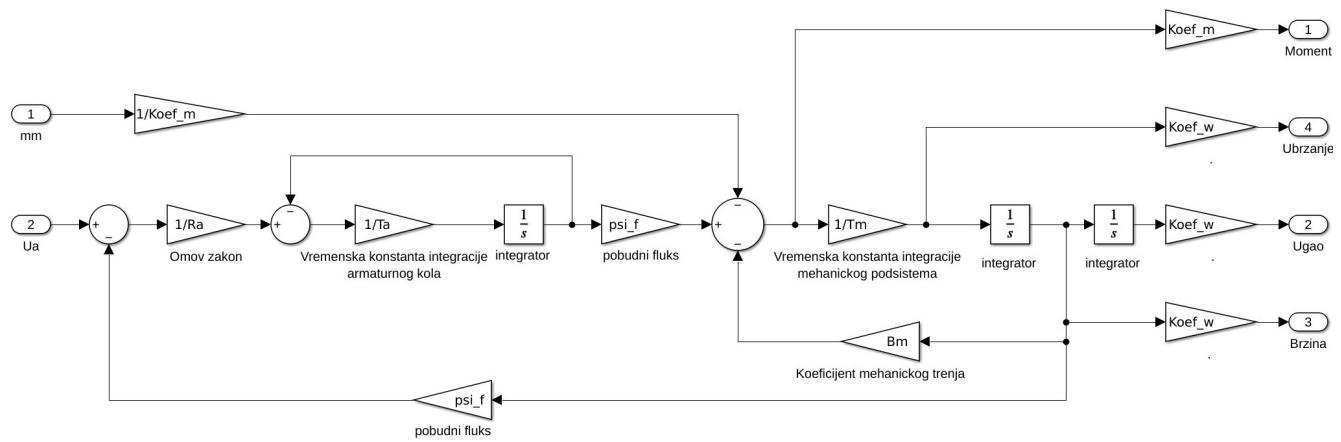


Слика 3.1.3 Модел манипулатора у *MATLAB Simulink*-у

3.2 Машина једносмерне струје са константном побудом

MJC је моделована у нормализованом домену. Како бисмо могли да користимо нормализован модел, потребно је извршити трансформацију у домен стварних вредности, односно, потребно је излазе помножити коефицијентима како би одговарали некој стварној MJC.

Улази у MJC су нормализована вредност арматурног напона [-1,1] и реална вредност момента оптерећења, која је помножена са реципрочном вредношћу коефицијента како би се добила одговарајућа нормализована вредност. На слици 3.2.1 је представљена имплементација модела MJC.

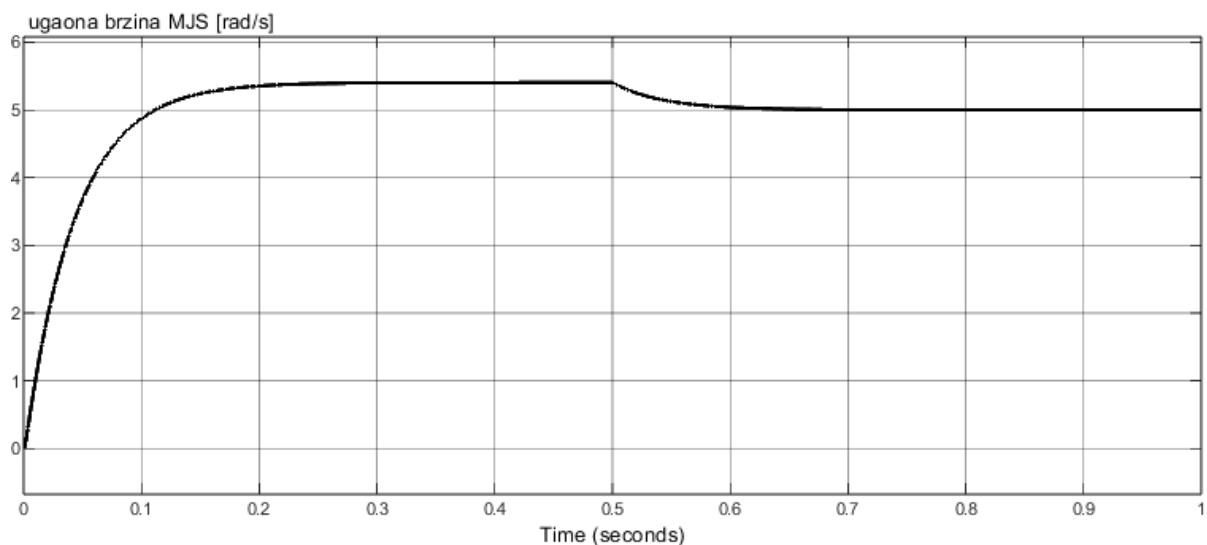


Слика 3.2.1 Модел MJC у MATLAB Simulink-у

Вредности свих параметара модела MJC су:

- $R_a = 0.075$ релативних јединица
- $T_a = 1 \text{ ms}$
- $\psi_f = 1 - R_a = 0.925$ релативних јединица
- $T_m = 0.5 \text{ s}$
- $B_m = 1 \cdot 10^{-6}$ релативних јединица
- $Koef_m = 10 \text{ Nm}$
- $Koef_w = 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

При одскочном сигналу номиналне вредности арматурног напона (1 релативна јединица) у почетном тренутку симулације угаона брзина MJC има одзив као на слици 3.2.2. У петој секунди симулације, уведен је и поремећај у виду одскочног сигнала момента оптерећења, номиналне вредности ($1 - R_a$ релативних јединица).



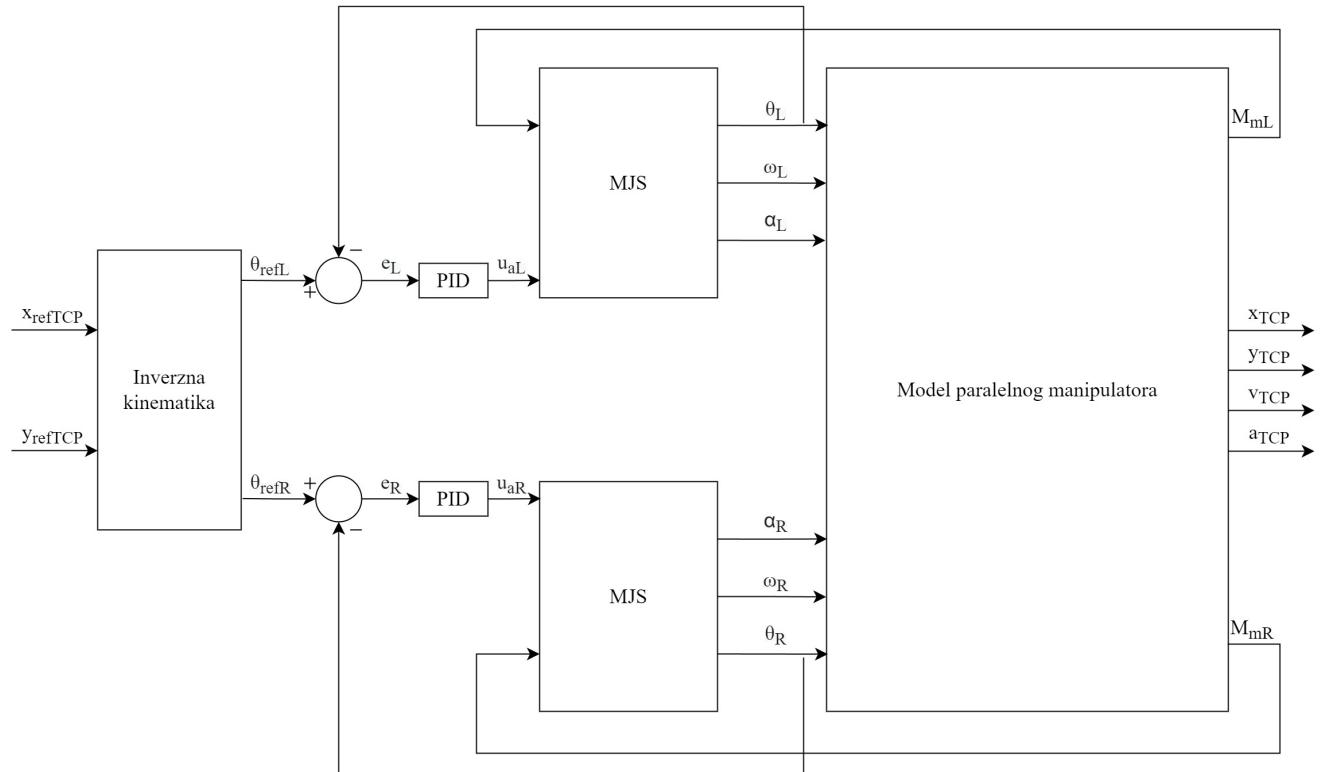
Слика 3.2.2 Одзив брзине MJC при одскочном сигналу арматурног напона и са одскочним поремећајем момента оптерећења

3.3 Регулација

Блок шема принципа регулације манипулатора се састоји из:

- Блока за инверзну кинематику који генерише референцу улазних углова,
- PID функцијског блока за оба улазнаугла који генерише управљачке сигнале,
- Леве и десне MJC, које на основу управљачког сигнала генеришу кретање и
- Модела манипулатора.

Та блок шема је приказана на слици 3.3.1



Слика 3.3.1 Блок шема регулације

PID регулатор је имплементиран као *MATLAB Simulink* блок са преносном функцијом:

$$G_{PID(s)} = K_{(1)} + K_{(2)} \frac{1}{s} + K_{(3)} \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}, \quad (72)$$

где $K_{(1)}$, $K_{(2)}$ и $K_{(3)}$ представљају K_P , K_I и K_D , а N је коефицијент филтрирања D дејства. Извршена је сатурација излазног сигнала, који ограничава вредност управљачког сигнала на $[-1,1]$, што представља једини вид *anti windup*-а.

3.4 Критеријум оптималности

Критеријум оптималности је имплементиран као интеграл тежинске суме 2 функције:

$$f = \int (w_{(1)} F_{(1)} + w_{(2)} F_{(2)}) dt, \quad (73)$$

где $w_{(i)}$ представља тежински фактор i -те подинтегралне функције $F_{(i)}$. Прва подинтегрална функција је:

$$F_{(1)} = t(|e_{\theta_L}| + |e_{\theta_R}|), \quad (74)$$

и представља производ времена и збира апсолутних вредности грешака улазних углова. Оптимизовање по овој функцији минимизује укупну грешку улазних углова у стационарном стању.

Друга подинтегрална функција је:

$$F_{(2)} = |\alpha_L| + |\alpha_R|, \quad (75)$$

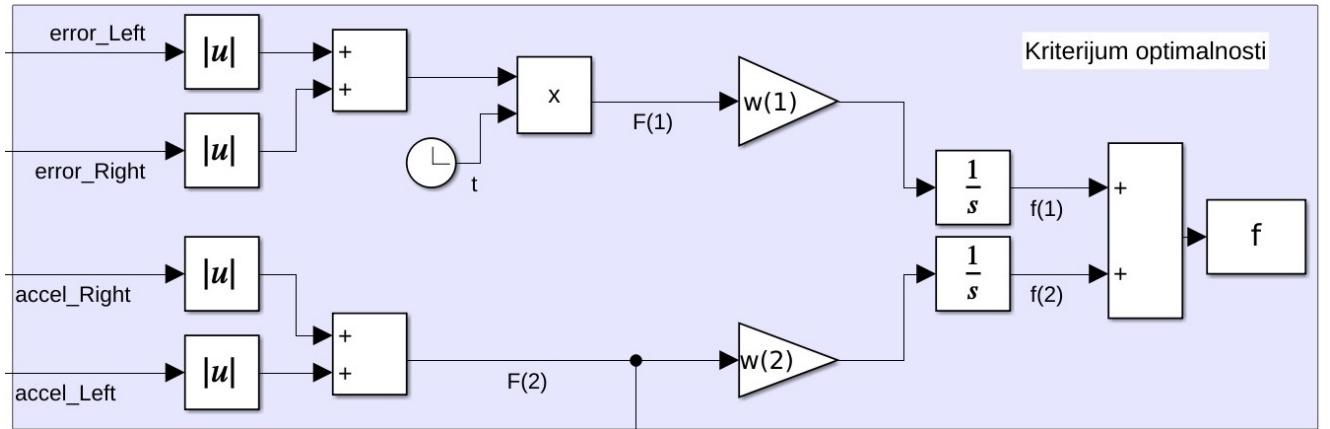
и представља збир апсолутних вредности убрзања улазних сегмената. Оптимизовање по овој функцији минимизује промене угаоне брзине улазних сегмената, а резултат тога је сигнал без осцилација и прескока .

Иницијална идеја за критеријум оптималности је била минимизација интеграла апсолутне грешке (*integral of absolute value of error*, IAE). Оптимизовани одзив је био брз и апериодичан, али није поседовао I дејство због чега није имао могућност откалања грешака услед спољашњих поремећаја. Како бисмо решили тај проблем, подинтегрална функција је помножена временом (*integral of time-multiplied absolute value of error*, ITAE), чиме повећавамо значај грешке у стационарном стању. Одзив добијен са таквим параметрима отклања грешку у стационарном стању, али има прескок и детаљно је приказан у поглављу 4.2. Како бисмо елиминисали прескок потребно је додати додатну подинтегралну функцију у критеријум оптималности. Првобитно је директно минимизован прескок, функцијом:

$$F(2) = \begin{cases} 0, & \theta \leq \theta_{ref} \\ e_\theta, & \theta > \theta_{ref} \end{cases}$$

што је довело до одзыва са осцилацијама. Затим је додата и трећа подинтегрална функција, која је минимизовала угаону брзину погонских сегмената. Комбинација ове 3 подинтегралне функције је резултовало оптималном кретњом. Тестиран је и утицај минимизације трзая TCP-a. Минимизација трзая би требало да у потпуности уклони осцилације и прескок [14], али резултат такве оптимизације је био сигнал са прескоком. Следећа идеја за минимизацију прескока и осцилације је била минимизација убрзања улазних сегмената. Одзив са параметрима добијеним при таквој оптимизацији је у потпуности задовољавао услове оптималног управљања.

Избором вредности тежинских фактора можемо добити задовољавајући резултат оптимизације. Имплементација критеријума оптималности у *MATLAB Simulink*-у је приказана на слици 3.4.1.



Слика 3.4.1 Имплементација критеријума оптималности у *MATLAB Simulink*-у

4 Резултати и дискусија

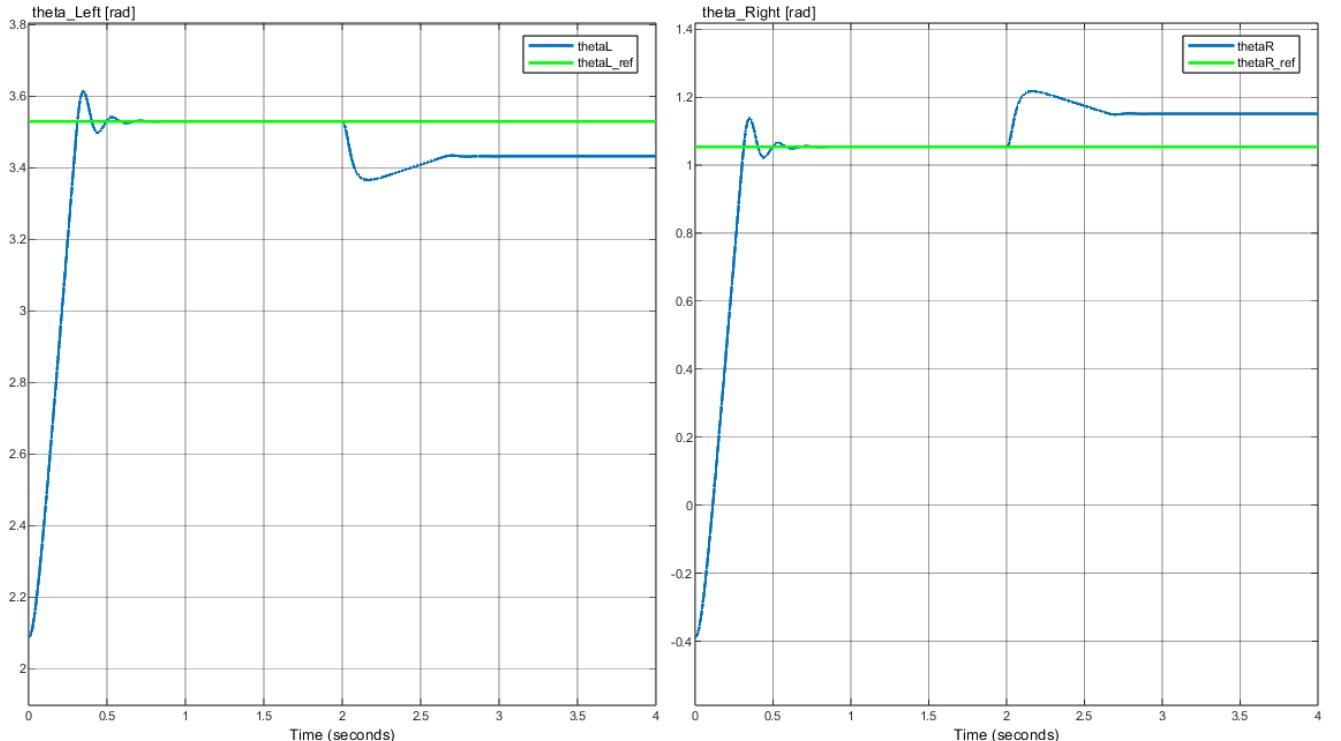
За оптимизацију је коришћен PSO алгоритам са линеарно смањујућим инерцијалним коефицијентом, са почетном вредношћу $w_{max} = 0.9$ и крајњом $w_{min} = 0.4$. Коришћена је локална варијанта алгоритма, са околином прстенасте топологије, при чему околину формира $\frac{1}{4}$ роја. Усвојене су вредности коефицијената убрзања $c_p = 2.8$, $c_g = 1.3$.

При оптимизацији параметара коришћена је путања средње дужине. Почетна тачка има координате (40mm, 60mm), а крајња (-40mm, 60mm). Укупно време симулације је 4s, а корак симулације је 2ms. Такође је уведен и поремећај у виду одскочног спољашњег оптерећења који делује на улазне сегменте, и који започиње у другој секунди симулације.

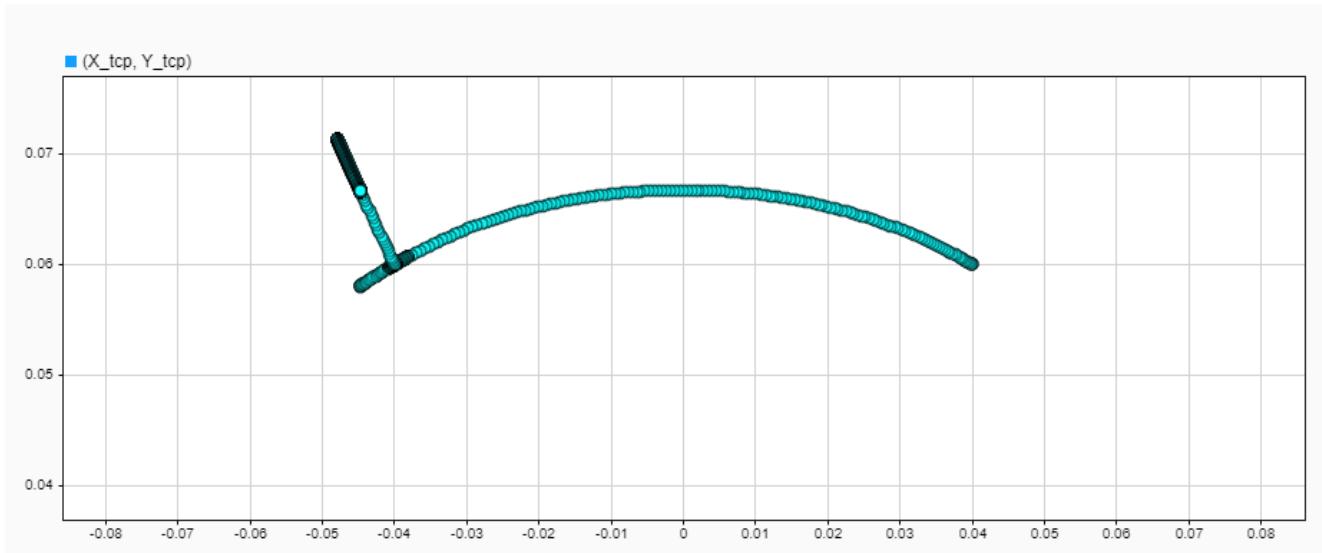
Извршена је оптимизација са 30 честица и 600 укупних итерација. Такође је тестирано и како мањи број честица и мањи број итерација утиче на резултат оптимизације.

4.1 Симулација са неоптимизованим параметрима

При почетним вредностима PID параметара: $K_P = 10$, $K_I = 0$, $K_D = 0$, одзив левог и десног улазног угла изгледа као на слици 4.1.1. Путања којом се TCP креће је дата на слици 4.1.2.



Слика 4.1.1 Одзив улазних углова при неоптимизованим параметрима



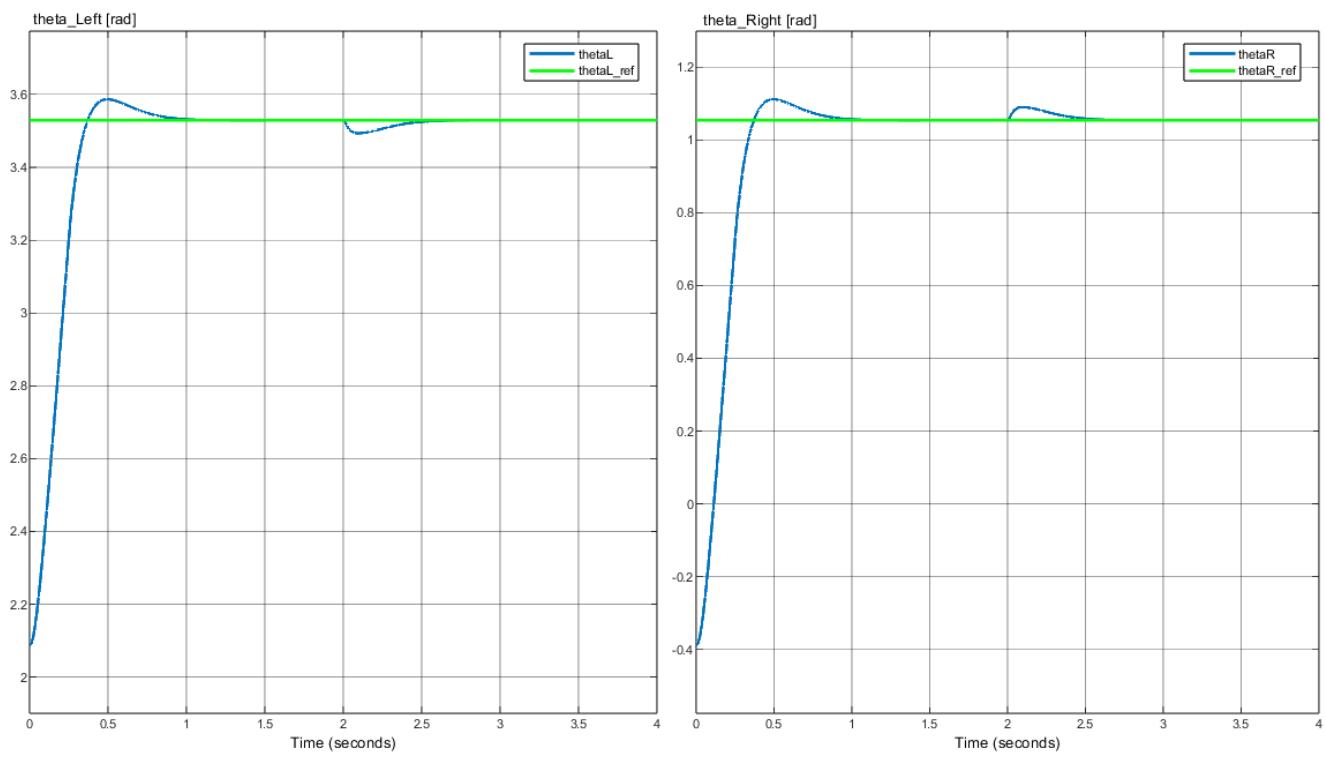
Слика 4.1.2 Путања TCP-а при неоптимизованим параметрима

Одзив оба улазна угла има прескок и пригашене осцилације. Због тога TCP показује осцилаторно понашање са прескоком пре стабилизације у жељеном положају. Због недостатка I дејства регулатора, овакав систем нема могућност компензовања поремећаја, што је разлог постојања грешке у стационарном стању.

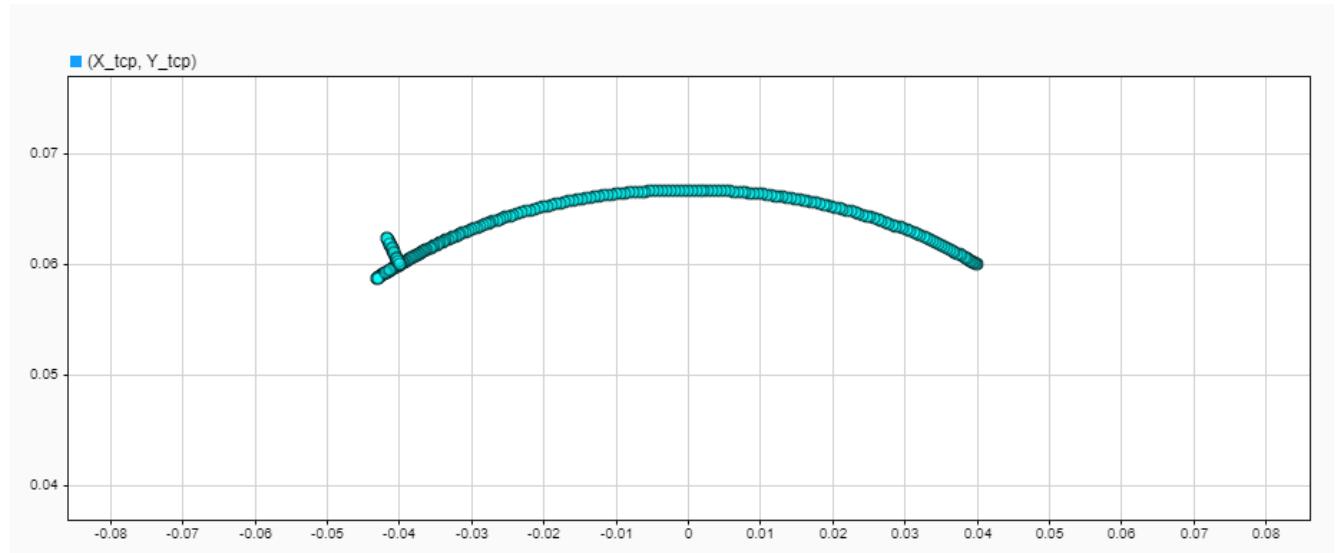
4.2 Оптимизација параметара са производом апсолутне грешке и времена као јединим критеријумом

Како бисмо посматрали производ апсолутне грешке и времена као једини критеријум оптималности, потребно је вредност другог тежинског фактора изједначити са нулом.

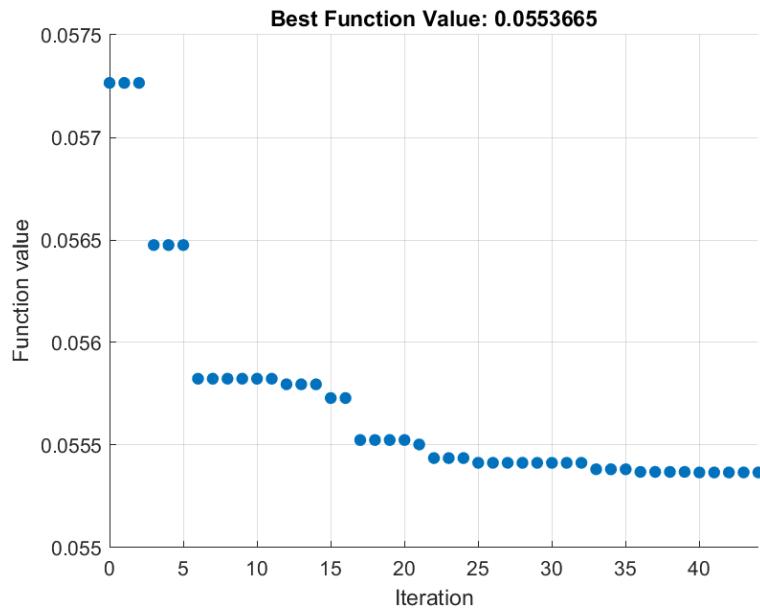
Одзив улазних углова је приказан на слици 4.2.1. TCP описује путању која је дата на слици 4.2.2. На слици 4.2.3 је графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности по итерацијама алгоритма.



Слика 4.2.1 Одзив улазних углова са параметрима оптимизованим по интегралу производа апсолутне грешке и времена као јединим критеријумом



Слика 4.2.2 Путања TCP-а са параметрима оптимизованим по интегралу производа апсолутне грешке и времена као јединим критеријумом

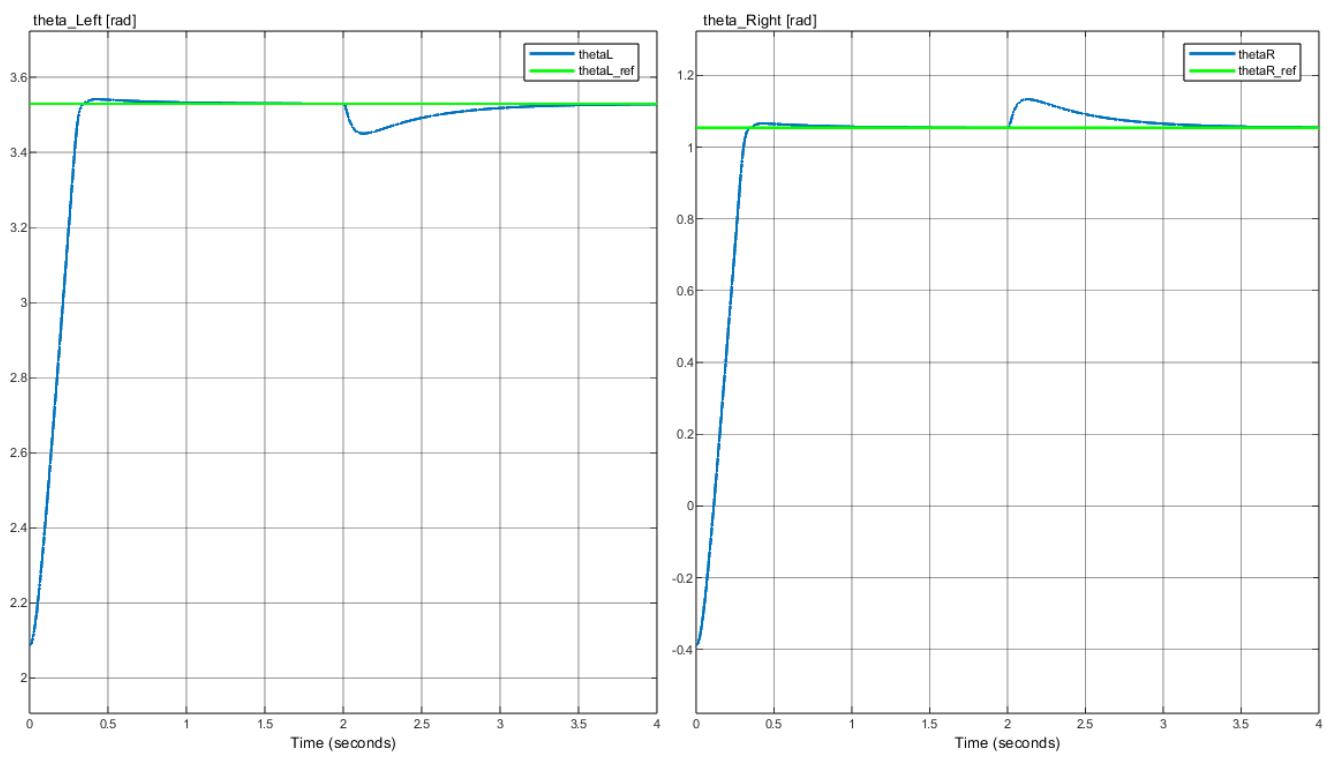


Слика 4.2.3 Графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности

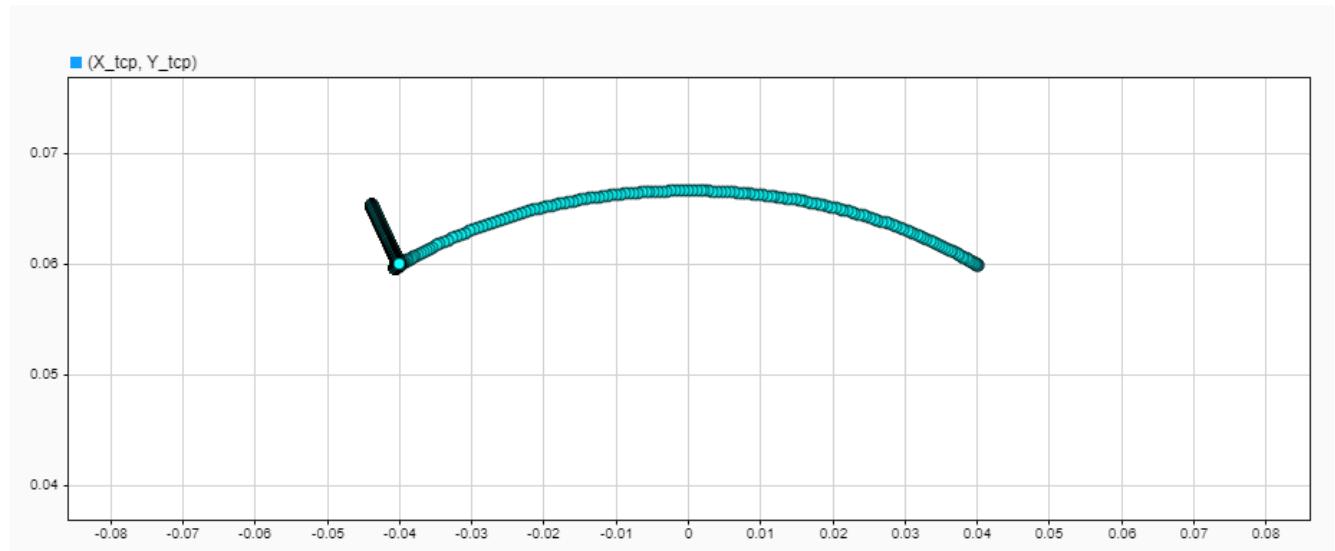
Добијене вредности PID параметара су: $K_P = 27.63$, $K_I = 128$, $K_D = 1.47$. Одзив улазних углова има прескок. Због велике вредности I дејства спољашњи поремећај има само краткотрајан утицај на одзив. Грешка услед њега је брзо отклонењена и TCP се враћа у жељени положај.

4.3 Оптимизација параметара са становишта убрзања и апсолутне грешке

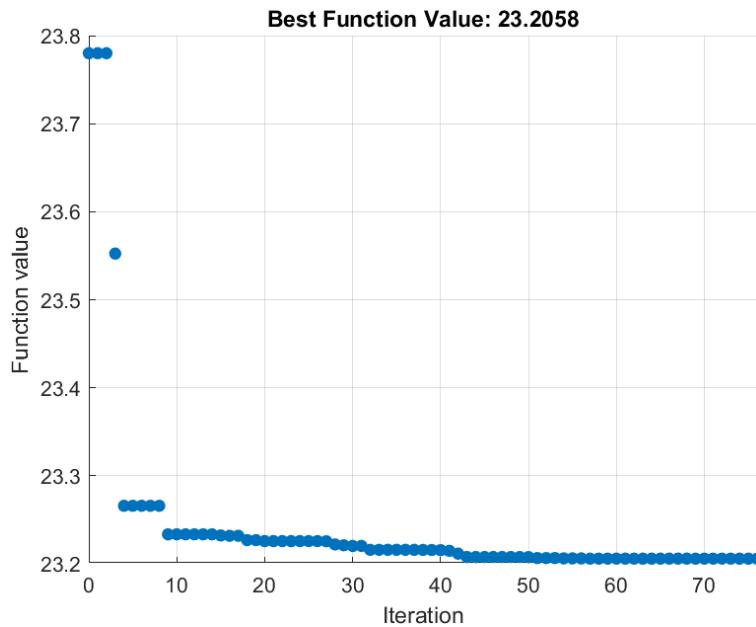
Оптимизација по првој подинтегралној функцији не даје задовољавајући одзив. Толики прескок позиције TCP-а није дозвољен, због чега је потребно променити критеријум оптимизације. Како бисмо за оптимизацију користили и преосталу подинтегралну функцију, потребно је да се вредности оба тежинска фактора разликују од нуле. Експериментално су одређене њихове вредности како бисмо оптимизацијом добили задовољавајући одзив и износе $w = [20, 1]$. На слици 4.3.1 су приказани одзиви улазних углова. На слици 4.3.2 је дата путања коју TCP опишује. На слици 4.3.3 је графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности по итерацијама алгоритма.



Слика 4.3.1 Одзив улазних углова са оптимизованим параметрима



Слика 4.3.2 Путања TCP-а са оптимизованим параметрима



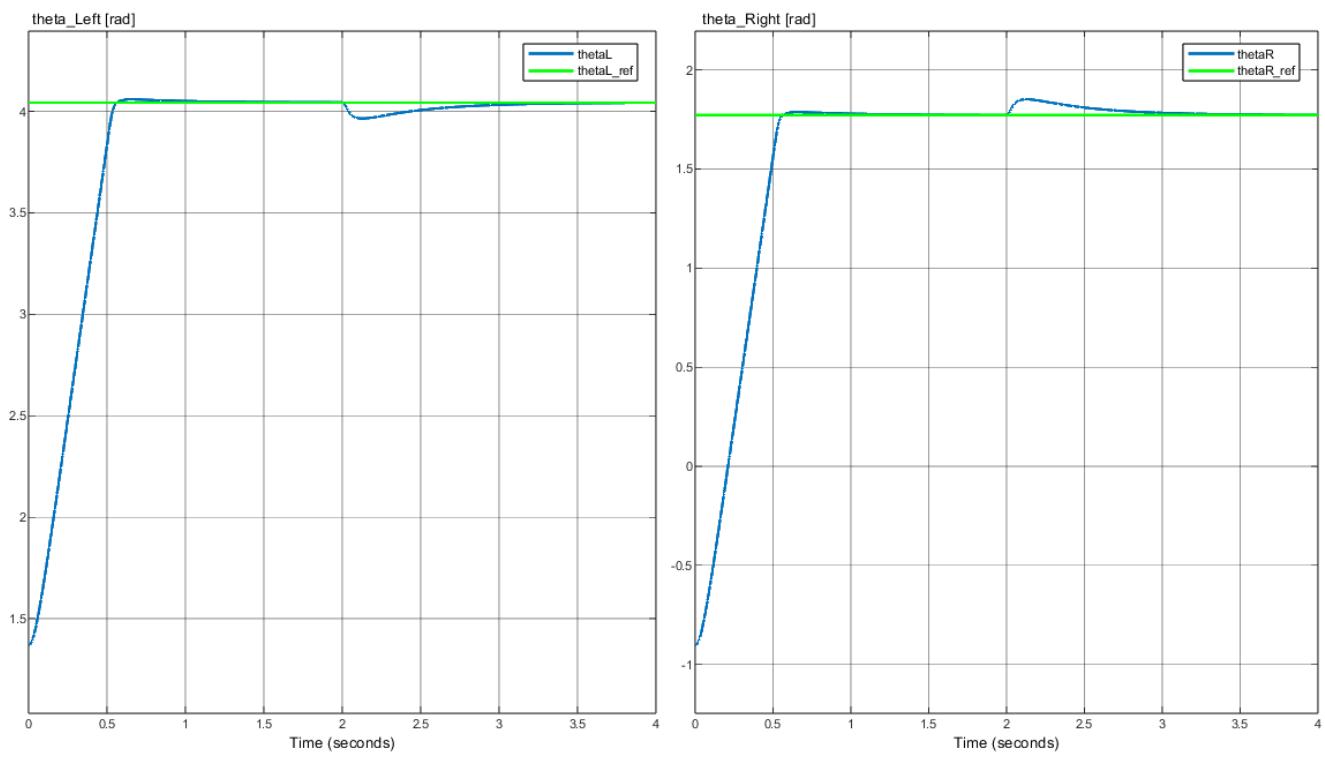
Слика 4.3.3 Графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности

Добијене вредности PID параметара су: $K_P = 15.9$, $K_I = 34.95$, $K_D = 0.31$. Оптимизацијом параметара са становишта апсолутне грешке и убрзања добија се бољи одзив. Улазни углови имају 5 пута мањи прескок. Спољашњи поремећај не уноси грешку у стационарном стању.

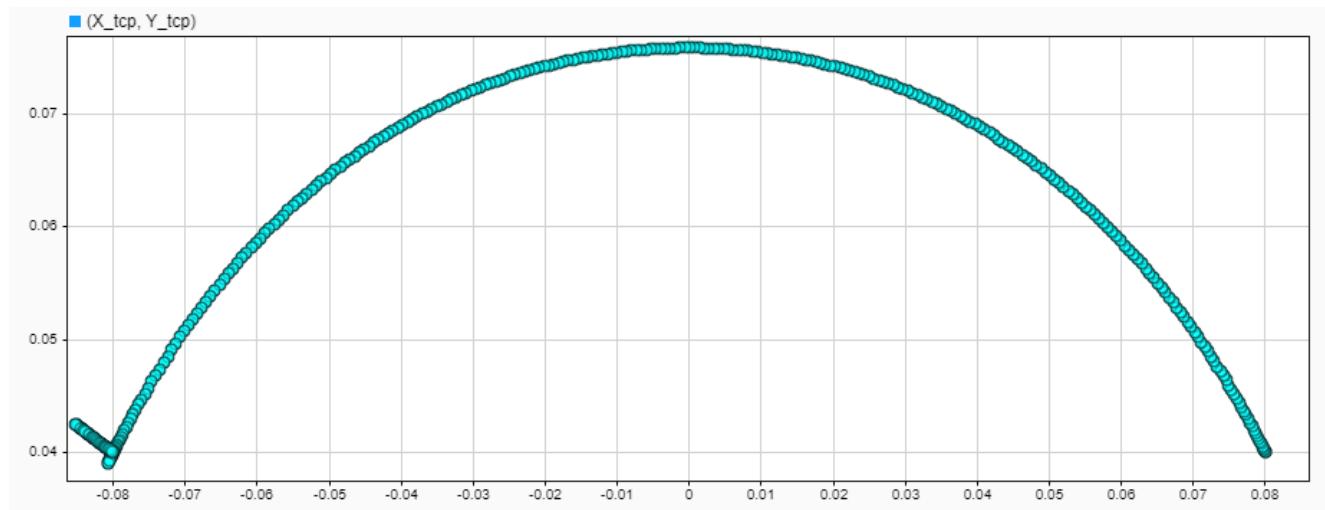
4.4 Провера добијених параметара

Одзив манипулатора са добијеним PID параметрима је оптималан за путању на којој је вршена оптимизација. Како бисмо проверили да ли добијене вредности параметара задовољавају и при другим путањама, изабране су још 2 путање за тестирање. Прва од тих је значајно дужа, са почетним координатама (80mm, 40mm) и крајњим (-80mm, 40mm). Друга је значајно краћа, са почетним координатама (10mm, 60mm) и крајњим (-10mm, 60mm).

Одзив улазних углова при дугачкој путањи за тестирање је приказан на слици 4.4.1, док је на слици 4.4.2 приказана путања коју TCP описује.

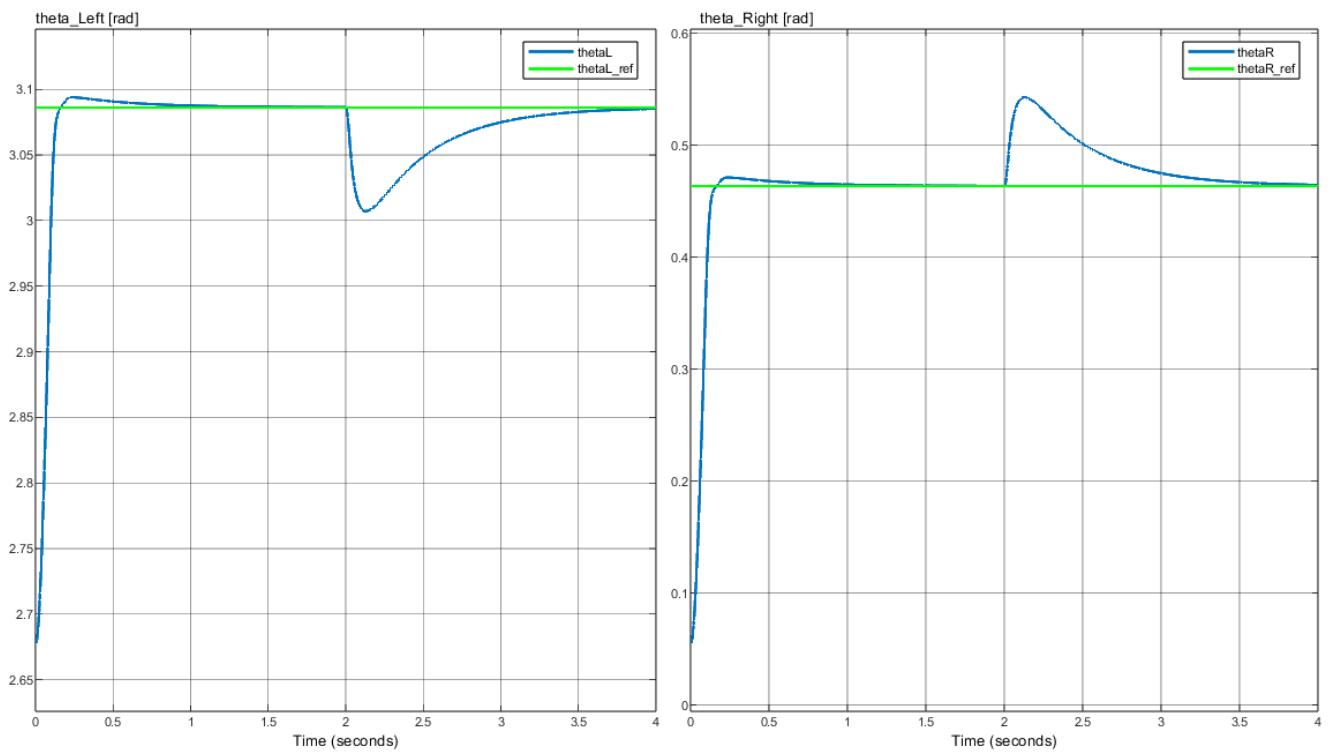


Слика 4.4.1 Одзив улазних углова са оптимизованим параметрима при дужој путањи

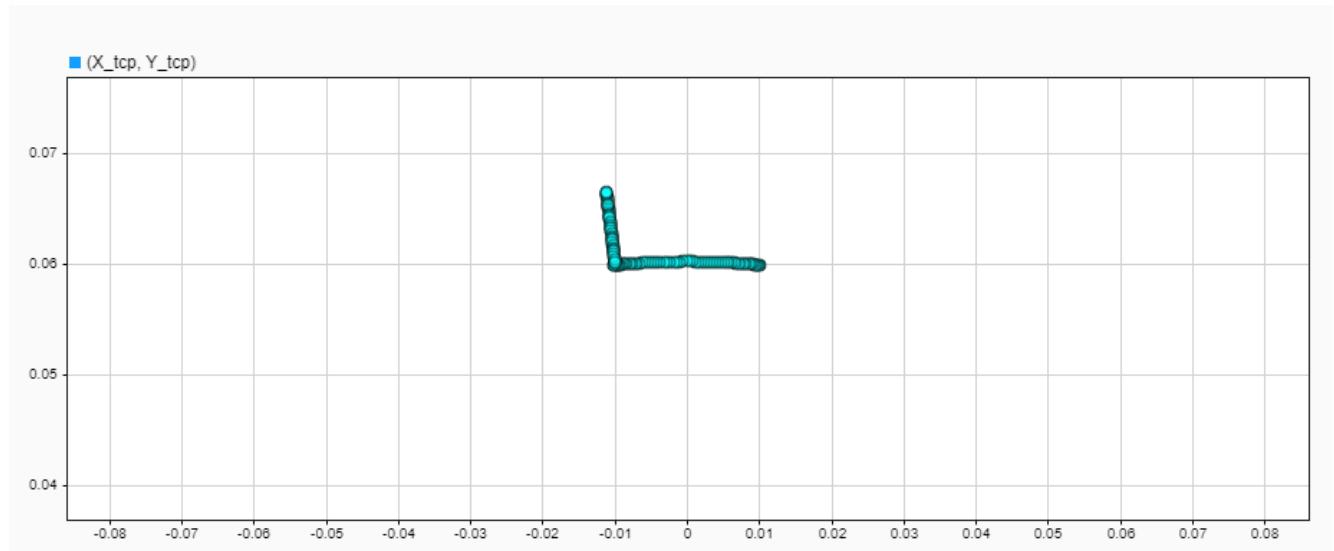


Слика 4.4.2 Путања TCP-а са оптимизованим параметрима

Одзив улазних углова при краткој путањи за тестирање је приказан на слици 4.4.3, док је на слици 4.4.4 приказана путања коју TCP описује.



Слика 4.4.3 Одзив улазних углова са оптимизованим параметрима при краћој путањи



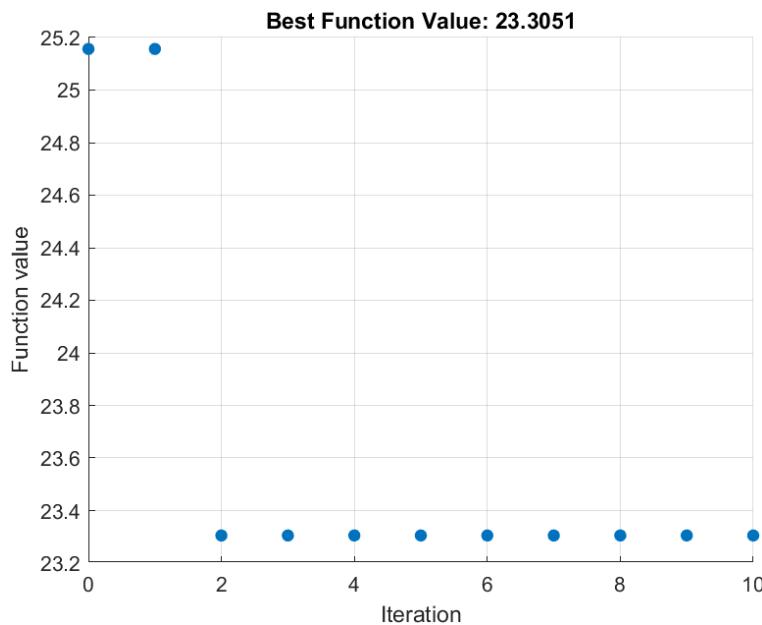
Слика 4.4.4 Путања TCP-а са оптимизованим параметрима

Одзив при обе путање за тестирање је задовољавајући. Нема грешке у стационарном стању, а прескок је мањи од $0.01 rad$ за обе путање.

4.5 Дискусија о утицају броја итерација и броја честица

При оптимизацији са 30 честица и 10 итерација, фазе експлорације и експлоатације су знатно краће него при оптимизацији са 600 итерација. Последица краће експлорације је већа шанса западања резултата у локални оптимум. Последица краће експлоатације је резултат који се налази близу оптимума, али није оптимум, односно превремено прекинута оптимизација.

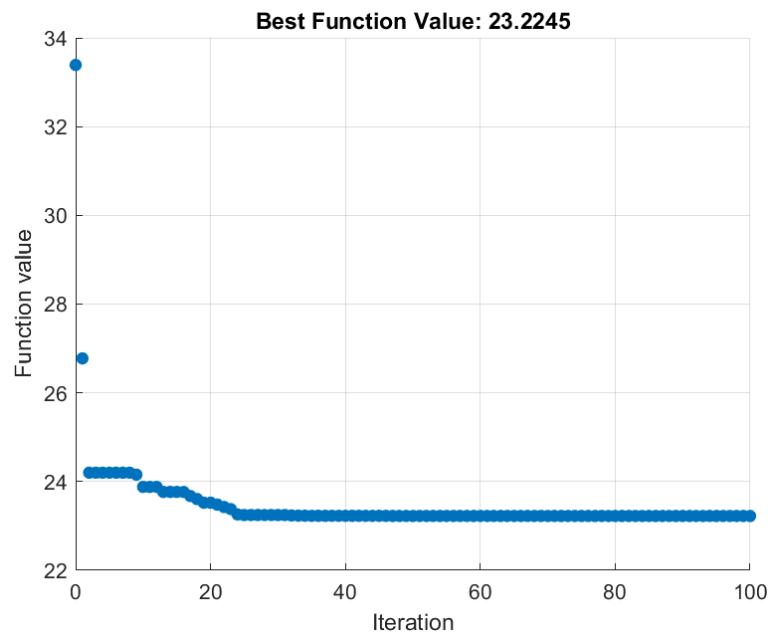
Тај закључак потврђује резултат оптимизације. Одзив који је добијен приликом оптимизације са 10 итерација изгледа веома слично одзиву са параметрима добијеним оптимизацијом са 600 итерација. Вредност критеријума оптималности је мало већа. Вредности добијених PID параметара су: $K_P = 23.85$, $K_I = 88.44$, $K_D = 0.53$. Добијени параметри су слични као при оптимизацији са 600 итерација, али је оптимизација превремено прекинута. Због тога не можемо са сигурношћу да закључимо да ли је оптимизацијом пронађен локални или глобални оптимум. На слици 4.5.1 је дат графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности, при оптимизацији са 10 итерација.



Слика 4.5.1 Графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности, при оптимизацији са 10 итерација

Када смањимо број честица у оптимизацији, смањујемо и могућност алгоритма да претражи цео параметарски простор. Последица тога су смањене шансе алгоритма да пронађе глобални оптимум.

Оптимизацијом са 5 честица и 600 итерација су добијене вредности PID параметара: $K_P = 19.63$, $K_I = 47.87$, $K_D = 0.41$. У овом случају оптимизација није превремено прекинута, већ је прекинута услед непромењене вредности критеријума оптималности. С обзиром да се параметри значајније разликују од параметара добијених оптимизацијом са 30 честица, закључујемо да је резултат запао у локални оптимум. На слици 4.5.2 је графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности.



Слика 4.5.2 Графички приказ промене најбоље вредности критеријума оптималности, при оптимизацији са 5 честица

5 Закључак

Циљ овог рада је да прикаже принцип коришћења PSO алгоритма за пројектовање оптималног управљања паралелним манипулатором. Основни захтеви за оптимално управљање подразумевају:

- способност регулатора да што пре доведе манипулатор у жељени положај и
- глатку кретњу TCP-а, односно кретњу без прескока и осцилација.

У овом раду је приказан динамички модел паралелног манипулатора са пет сегмената, чији се TCP креће у равни. Оба улазна сегмента манипулатора су актиурана помоћу MJC. Арматурни напон MJC се управља помоћу PID регулатора. Појачања K_P , K_I и K_D представљају управљачке параметре за које се оптимизује вредност критеријума оптималности. Оптимизација је извршена на путањи средње дужине, са 30 честица у роју и са максимално 600 итерација PSO алгоритма.

Како бисмо оптимизацијом добили одзив система који задовољава захтеве за оптималну кретњу, потребно је захтеве превести у критеријум оптималности. То је урађено интегралом збира две функције. Прва функција обухвата време и грешке улазних углова, чијом минимизацијом задовољавамо први захтев. Друга функција обухвата трзај и њеном минимизацијом добијамо глатку кретњу TCP-а, односно задовољавамо други захтев. Како бисмо могли да добијемо одзив који задовољава оба захтева, потребно је подесити тежинске коефицијенте којима се множе вредности функција.

Оптимизацијом са само првим захтевом оптималног управљања, односно са само првом функцијом критеријума оптималности, смо добили одзив TCP-а који има велики прескок и који брзо и у потпуности компензује спољашње поремећаје у виду обртног момента на улазне сегменте. Додавањем друге функције у критеријум оптималности и подешавањем тежинских фактора, добијамо одзив манипулатора који у потпуности задовољава захтеве оптималног управљања. Добијене вредности управљачких параметара су тестиране на још две путање, дужој и краћој од првобитне. При обе путање одзив је задовољавајући.

Тестиран је и утицај параметара PSO алгоритма, тачније извршена је оптимизација са мањим бројем честица и са мањим бројем итерација. У оба случаја алгоритам је запао у локални оптимум. При смањеном броју итерација, алгоритам је превремено прекинут. Из овог тестирања закључујемо да број честица и број итерација имају велики утицај на способност PSO алгоритма да пронађе глобални оптимум.

Упркос успешно оствареном задатку овог рада, и даље постоји простор за унапређења и даљу надоградњу рада. Оптимизација би могла да се врши и по додатним критеријумима, на пример по утрошеној енергији. Регулација би могла да буде реализована каскадном везом са струјном, брзинском и позиционом петљом. Структурна оптимизација би омогућила максималан радни простор или минимизацију вибрација. Генерисање путање би омогућило избегавање препрека и интерполацију праволинијских и криволинијских путања.

6 Прилог

6.1 Прилог А

```
function [xtcp, ytcp, theta3, theta4R, Vtcp, omega3, omega4, atcp, alpha3, alpha4] = forward_kinematics(thetaL, thetaR, omegaL, omegaR, alphaL, alphaR)
[L,P,D] = get_params();

xA = -L/2 + P * cos(thetaL);
yA = P * sin(thetaL);
xB = L/2 + P * cos(thetaR);
yB = P * sin(thetaR);

A = (xB - xA) / D;
B = (yB - yA) / D;
C = (A*A + B*B) / 2;
A1 = (xA - xB) / D;
B1 = (yA - yB) / D;

theta4R = 2*atan2(-B-sqrt(A*A+B*B-C*C), C-A);
theta3 = 2*atan2(-B1+sqrt(A1*A1+B1*B1-C*C), C-A1);
xtcp = xA + D*cos(theta3);
ytcp = yA + D*sin(theta3);

% Velocities
A_v = [ -1, 0, - D*sin(theta3), 0;
         -1, 0, 0, - D*sin(theta4R);
          0, 1, - D*cos(theta3), 0;
          0, 1, 0, - D*cos(theta4R)
        ];
B_v = [ omegaL*P*sin(thetaL);
         omegaR*P*sin(thetaR);
         omegaL*P*cos(thetaL);
         omegaR*P*cos(thetaR)
       ];
V = A_v \ B_v;
Vxtcp = V(1);
Vytcp = V(2);
omega3 = V(3);
omega4 = V(4);
Vtcp = sqrt(Vxtcp^2+Vytcp^2);

% Accelerations
A_a = [ 1, 0, D*sin(theta3), 0;
         1, 0, 0, D*sin(theta4R);
          0, 1, -D*cos(theta3), 0;
          0, 1, 0, -D*cos(theta4R)
        ];
B_a = [ -P*sin(thetaL)*alphaL - P*cos(thetaL)*omegaL^2 - D*cos(theta3)*omega3^2;
         -P*sin(thetaR)*alphaR - P*cos(thetaR)*omegaR^2 - D*cos(theta4R)*omega4^2;
         P*cos(thetaL)*alphaL - P*sin(thetaL)*omegaL^2 - D*sin(theta3)*omega3^2;
         P*cos(thetaR)*alphaR - P*sin(thetaR)*omegaR^2 - D*sin(theta4R)*omega4^2
       ];
A = A_a \ B_a;
axtcp = A(1);
aytcp = A(2);
alpha3 = A(3);
alpha4 = A(4);
atcp = sqrt(axtcp^2+aytcp^2);
end
```

Слика 6.1.1 Функција за директну кинематику у MATLAB-у

6.2 Прилог Б

```
function [thetaL_ref, thetaR_ref] = inverse_kinematics(xtcp, ytcp)
[L,P,D] = get_params();

C1 = ((xtcp + L/2)^2 + ytcp^2 + P^2 - D^2) / (2*ytcp*P);
C2 = (xtcp + L/2) / ytcp;
C3 = ((xtcp - L/2)^2 + ytcp^2 + P^2 - D^2) / (2*ytcp*P);
C4 = (xtcp - L/2) / ytcp;

thetaL_ref = 2*atan2(1+sqrt(1-C1*C1+C2*C2), C1+C2);
thetaR_ref = 2*atan2(1-sqrt(1-C3*C3+C4*C4), C3+C4);

thetaL_ref = wrapTo2Pi(thetaL_ref);
thetaR_ref = wrapToPi(thetaR_ref);
end
```

Слика 6.2.1 Функција за инверзну кинематику у MATLAB-у

6.3 Прилог В

```

function [MmL, MmR] = inverse_dynamics(thetaL, theta3, theta4R, thetaR, omegaL, omega3, omega4, omegaR, alphaL, alpha3, alpha4, alphaR)
[~, P, D, mP, mD, JsP, JsD] = get_params();

m2 = mP;
m5 = mP;
m3 = mD;
m4 = mD;
Js2 = JsP;
Js5 = JsP;
Js3 = JsD;
Js4 = JsD;

as2x = - P/2 * omegaL^2 * cos(thetaL) - P/2 * alphaL * sin(thetaL);
as2y = - P/2 * omegaL^2 * sin(thetaL) + P/2 * alphaL * cos(thetaL);
as3x = - P * omegaL^2 * cos(thetaL) - P * alphaL * sin(thetaL) - D/2 * omega3^2 * cos(theta3) - D/2 * alpha3 * sin(theta3);
as3y = - P * omegaL^2 * sin(thetaL) + P * alphaL * cos(thetaL) - D/2 * omega3^2 * sin(theta3) + D/2 * alpha3 * cos(theta3);
as4x = - P * omegaR^2 * cos(thetaR) - P * alphaR * sin(thetaR) - D/2 * omega4^2 * cos(theta4R) - D/2 * alpha4 * sin(theta4R);
as4y = - P * omegaR^2 * sin(thetaR) + P * alphaR * cos(thetaR) - D/2 * omega4^2 * sin(theta4R) + D/2 * alpha4 * cos(theta4R);
as5x = - P/2 * omegaR^2 * cos(thetaR) - P/2 * alphaR * sin(thetaR);
as5y = - P/2 * omegaR^2 * sin(thetaR) + P/2 * alphaR * cos(thetaR);

A_d = [ 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        P/2*sin(thetaL), -P/2*cos(thetaL), 1, -P/2*sin(thetaL), P/2*cos(thetaL), 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, -D/2*sin(theta3), D/2*cos(theta3), -D/2*sin(theta3), D/2*cos(theta3), 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, D/2*sin(theta4R), -D/2*cos(theta4R), D/2*sin(theta4R), -D/2*cos(theta4R), 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0;
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -P/2*sin(thetaR), P/2*cos(thetaR), -P/2*sin(thetaR), P/2*cos(thetaR), 1
    ];
B_d = [ m2 * as2x;
        m2 * as2y;
        Js2 * alphaL;
        m3 * as3x;
        m3 * as3y;
        Js3 * alpha3;
        m4 * as4x;
        m4 * as4y;
        Js4 * alpha4;
        m5 * as5x;
        m5 * as5y;
        Js5 * alphaR
    ];
D = A_d \ B_d;
MmL = D(3);
MmR = D(12);
end

```

Слика 6.3.1 Функција за инверзну динамику са убрзањима центара маса у *MATLAB*-у

7 Литература

- [1] J. P. Merlet, Parallel Robots, 2nd ed. Springer 2006
- [2] <https://new.abb.com/en>
- [3] <http://mehanizacija.ftn.uns.ac.rs/wp-content/uploads/2021/02/7.-DINAMICKA-ANA-LIZA-mehatronika-2019.pdf>, Механика машина, др М. Чавић, редовни професор, МСц Д. Чавић, асистент
- [4] D. K. Sen, A. Yildiz, O. Korpaz, "Optimal Design of a Five-Bar Planar Manipulator and Its Controller by Using Different Algorithms for Minimum Shaking Forces and Moments for the Largest Trajectory in a Usable Workspace", MDPI, Machines 2022, 10, 971.
- [5] <https://www.keep.ftn.uns.ac.rs/regulisani-elektromotorni-pogoni/specifikacija-specifikacija-predmeta/>, Регулисани електромоторни погони, др Д. Марчетић, редовни професор, МСц В. Поповић, доцент
- [6] <https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360013761160-Motor-data-and-simulation>
- [7] др Д. Јеркан, Б. Вујков, Збирка задатака из електричних машина за студијски програм мехатроника, Нови Сад, ФТН 2020
- [8] http://www.automatika.ftn.uns.ac.rs/images/predmeti/Sistemi%20automatskog%20upravljanja%20-%20mehatronika/Predavanja/10_Regulacija.pdf, Системи аутоматског управљања, др А. Ристић, редовни професор, др В. Бугарски, доцент
- [9] F. Marini, B. Walczak, "Particle swarm optimization (PSO). A tutorial", Elsevier 2015
- [10] Ж. Кановић, З. Јеличић, М. Рапаић, Еволутивни оптимизациони алгоритми у инжењерској пракси, Нови Сад, ФТН 2017
- [11] M. Jain, V. Saihjpal, N. Singh, S.B. Singh, "An Overview of Variants and Advancements of PSO Algorithm", MDPI, Applied Sciences 2022, 12, 8392.
- [12] M.R. Bonyadi, Z. Michalewicz, "Impacts of coefficients on movement patterns in the particle swarm optimization algorithm", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, 21, 3
- [13] S. Rehman, S.A. Khan, L.M. Alhems, "The Effect of Acceleration Coefficients in Particle Swarm Optimization Algorithm with Application to Wind Farm Layout Design", FME Transactions, 2020, 48, 4
- [14] P. Huang, Y. Xu, B. Liang, "Global minimum-jerk trajectory planning of space manipulator", Int. J. Control. Autom. Syst. 2006, 4, 405–413