



Јовановић, Р., Бугарић У., Весовић, М., Перишић Н. ¹⁾

ФАЗИ И НЕЛИНЕАРНО УПРАВЉАЊЕ ЗАХВАТНОГ МЕХАНИЗМА И МОТОРА ЈЕДНОСМЕРНЕ СТРУЈЕ - ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ ПРОЈЕКТА MISSION4.0 ²⁾

Резиме

Рад на пројекту Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION4.0 је у оквиру једног од радних пакета подразумевао истраживање у области нелинеарних проблема оптимизације и управљања кретања захватног механизма у присуству ограничења. У циљу постизања задате путање врха захватног механизма, пројектовани су управљачки системи засновани на фази логици у управљању, чији параметри су оптимизовани применом различитих метахеуристичких метода оптимизације. Примена предложених техника управљања приказана је на примеру захватног механизма аутономног мобилног робота. Други део истраживања односио се на управљање брзине и позиције мотора једносмерне струје, као главног покретача захватног механизма, где су примењене различите технике управљања: фази управљање, техника feedback линеаризације, као и њихове оптимизоване верзије различитим метахеуристичким алгоритмима. У овом раду даје се преглед једног дела резултата пројекта MISSION4.0, објављених у различитим међународним и националним часописима и конференцијама, као и преглед резултата приказаних у техничком решењу.

Кључне речи: захватни механизам, мотор једносмерне струје, трапезоидни и полиномијални профил брзине, фази управљање и feedback линеаризација, метахеуристички алгоритми оптимизације

1. УВОД

Роботи имају важну улогу у тренутној производној индустрији. Наиме, суштинска карактеристика Индустрије 4.0 су аутономне производне методе које извршавају роботи и који те задатке могу да извршавају интелигентно, са фокусом на сигурност, флексибилност, разноликост и међусобну сарадњу [1]. После много деценија истраживања, пројектовање и синтеза управљања за роботске системе је још увек савремена и актуелна област истраживања. Потешкоће у управљању робота последица су њихове нелинеарне и комплексне природе, постојања немоделоване динамике, поремећаја и неодређености параметара [2]. Стога, много различитих линеарних и нелинеарних техника се користи за управљање кретања, односно праћење задате путање у роботским системима: традиционалне методе управљања (пропорционално-интегрално-диференцијално (ПИД) управљање и његове варијанте), адаптивно управљање, робусно управљање, управљање у клизном режиму, оптимално управљање, фази управљање, комбинација претходних и многих других техника. ПИД алгоритми управљања су засигурно најраспрострањенија стратегија управљања у индустрији, уопштено, (па и у роботским системима) због своје једноставне структуре и робусних перформанси у широком спектру радних

¹⁾ Проф. др Радиша Јовановић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (rjovanovic@mas.bg.ac.rs), проф. др Угљеша Бугарић, Универзитет у Београду, Машински факултет, (ubugaric@mas.bg.ac.rs), Митра Весовић, MSc, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет, (mvesovic@mas.bg.ac.rs), Наталија Перишић, MSc, истраживач приправник, Универзитет у Београду, Машински факултет, (nperisic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ У овом раду, саопштава се преглед дела резултата истраживања остварених у оквиру научног пројекта MISSION4.0, ев. број: 6523109, који је финансијски подржан од Фонда за науку Републике Србије, као и потпројекта Машинског факултета у Београду, ев. број: 451-03-68/2022-14/200105, финансијски подржаног од Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије.

услова.

Иако ПИД управљање представља најједноставније и ефикасно решење многих проблема, оптимално подешавање параметара је прилично тешко. Као алтернатива, може се користити фази управљање, чија је једна од важних карактеристика да није неопходно познавати модел објекта за синтезу управљања, као и робусност. Једна од нелинеарних техника управљања се добија увођењем нелинеарног закона управљања методом тзв. feedback линеаризације, којом се нелинеарни систем алгебарски трансформише у делимично или потпуно линеарни, тако да се могу применити познате линеарне технике управљања.

Побољшање перформанси ПИД управљања у погледу тачности управљања и брзине конвергенције може се постићи различитим поступцима оптимизације, а у односу на изабрану функцију циља. У ту сврху све више се користе метахеуристички алгоритми оптимизације, и то не само за оптимизацију ПИД управљања, већ и за оптимизацију фази контролера, а многи од њих се могу користити за неконвексне, нелинеарне и мултимодалне проблеме оптимизације у присуству линеарних или нелинеарних ограничења, у виду глобалних алгоритама за оптимизацију.

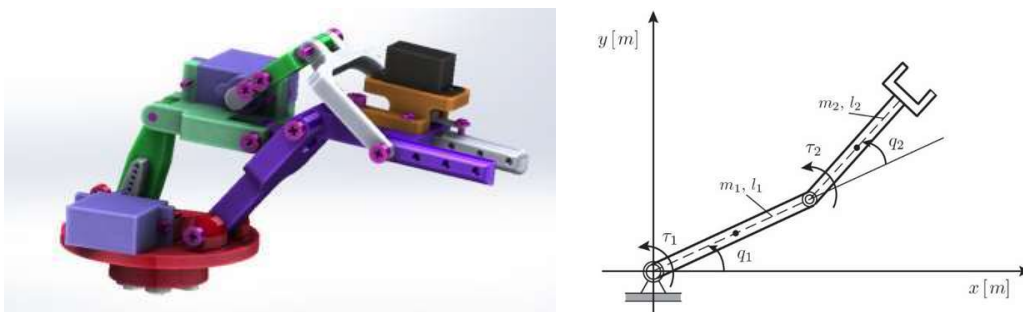
Оптимално кретање захватног механизма мобилног робота, као и управљање брзине и позиције мотора једносмерне струје (краће: DC мотор), били су тема истраживања у оквиру једног од радних пакета пројекта *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION4.0*, и овај рад представља преглед резултата поменутих истраживања. Неке од претходно наведених техника управљања су управо искоришћене за остваривање постављених задатака, кроз директну примену, модификацију и развој нових алгоритама и метода.

2. ОПТИМАЛНО КРЕТАЊЕ ЗАХВАТНОГ МЕХАНИЗМА

Проблем оптималног кретања захватног механизма (његовог врха) спада у категорију нелинеарних проблема оптимизације у присуству ограничења. У циљу његовог решавања, неопходно је било урадити следеће: математички моделовати динамичко понашање захватног механизма мобилног робота; одредити оптималну трајекторију, односно профил брзине кретања захватног механизма; пројектовати управљачки систем који омогућава праћење задате, оптималне трајекторије, и оптимизовати параметре управљачког система у циљу остваривања што је могуће мање грешке праћења.

2.1 Опис и математички модел захватног механизма

На слици 1а приказан је стварни објект – захватни механизам мобилног робота *RAICO*, који је у потпуности развијен у Лабораторији за индустријску роботiku и вештачку интелигенцију Машинског факултета Универзитета у Београду.



Слика 1. а) Захватни механизам, б) шематски приказ захватног механизма

Његов шематски приказ дат је на слици 1б, где q_i , l_i и m_i представљају угао, дужину и масу i - тог сегмента, следствено, за $i=1,2$. Математички модел кретања посматраног захватног механизма, не узимајући трење и поремећаје, је облика:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

где су q , \dot{q} и $\ddot{q} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ вектори позиције, брзине и убрзања. Улазни вектор момента означен је са $\tau \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$

, а $M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ и $G(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ су позитивно одређена матрица инерције, матрица центрипеталних и Кориолисових сила, као и гравитациони вектор, следствено. У случају посматраног захватног механизма, \mathbf{q} је вектор угаоних помераја q_1 и q_2 , $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2]^T$. Елементи матрица $M_{ij}(\mathbf{q})$, $C_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $i=1,2$ и вектора гравитационог момента $G(\mathbf{q})$ дати су једначинама (2), (3) и (4), следствено, уз претпоставку да се центри маса сегмената налазе на њиховим срединама.

$$M_{11} = \frac{1}{3}m_1l_1^2 + \frac{1}{3}m_2l_2^2 + m_2l_1^2 + m_2l_1l_2 \cos q_2, \quad M_{12} = M_{21} = \frac{1}{3}m_2l_2^2 + \frac{1}{2}m_2l_1l_2 \cos q_2, \quad M_{22} = \frac{1}{3}m_2l_2^2. \quad (2)$$

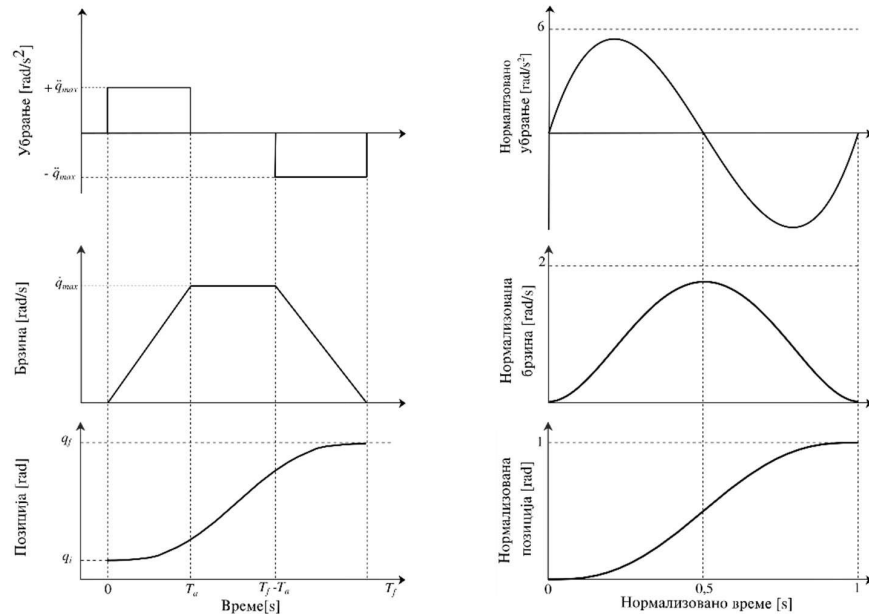
$$C_{11} = -\frac{1}{2}m_2l_1l_2\dot{q}_2 \sin q_2, \quad C_{12} = -\frac{1}{2}m_2l_1l_2 \sin q_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2), \quad C_{21} = -\frac{1}{2}m_2l_1l_2\dot{q}_1 \sin q_2, \quad C_{22} = 0. \quad (3)$$

$$G_1 = \left(\frac{1}{2}m_1l_1 + m_2l_1 \right) g \cos q_1 + \frac{1}{2}m_2l_2g \cos (q_1 + q_2), \quad G_2 = \frac{1}{2}m_2l_2g \cos (q_1 + q_2). \quad (4)$$

2.2 Планирање путање

Након добијања аналитичког математичког модела објекта, за увођење управљања неопходно је било изабрати жељену трајекторију, тј. путању кретања захватног механизма. Приликом одређивања оптималног кретања захватног механизма транспортне машине (у овом случају мобилног робота), разматрана је само кинематика кретања, и то у Oy правцу, а што због независности погона кретања важи и за кретање у Ox правцу. Задатак одређивања оптималног кретања решен је применом принципа максимума. Коначно, заменом на оптималан начин добијених закона кретања у једначину (1), могуће је одредити промену момената које би то кретање остварило.

Постоје бројни приступи планирању путање врха захватног механизма (и робота уопште) од почетне q_i до коначне q_f позиције. Циљ је да кретање механизма буде глатко јер нагле или скоковите промене, било у убрзању, брзини или положају, захтевају много више енергије од постепених. Линеарна интерполација, на пример, даје континуирану промену брзине, али такође може довести до наглог покретања или заустављања, а то може довести до теоријски бесконачних убрзања. Штавише, нагле промене у брзини у великој мери повећавају ризик од великих убрзања, што може бити тешко изводљиво са становишта актуатора.



Слика 2. а) Трапезоидни профил брзине, б) полиномијални профил брзине

У погледу практичне примене, трапезоидни профил брзине је један од најједноставнијих профила кретања. Његова предност се огледа у томе што се време потребно за достизање константне брзине користи и распоређује тако да је кретање глатко, без наглих почетних покрета и без изненадног заустављања при кочењу. Подешавање овог профила се заправо врши подешавањем убрзања тако да

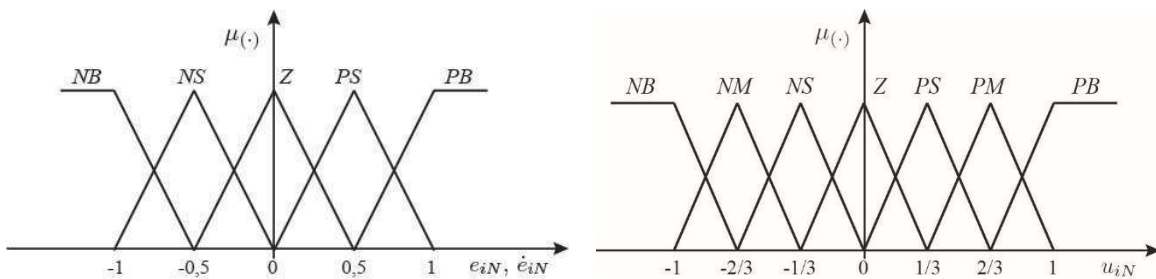
брзина благо расте (опада) док не достигне максималну вредност (нулу). Имплементација трапезоидног профила брзине, приказаног на слици 2а, је реално изводљива, али је у овом приступу убрзање дисконтинуална функција времена у укупном трајању кретања T_f , те треба бити обазрив – услед ове нагле промене убрзања могу се јавити и нежељене осцилације. Параметри неопходни за дефинисање трапезоидног профила су почетни q_i и крајњи q_f положај, коначно трајање кретања T_f и време потребно за убрзање T_a , при чему важи да је $2T_a \leq T_f$.

Када је то могуће, препоручљиво је изабрати функцију која ће омогућити континуиране промене, не само положаја и брзине, већ и убрзања. Као погодни кандидати, полиноми су се природно наметнули, јер је опште познато да су непрекидни полиноми бесконачно диференцијабилне глатке функције са свим својим изводима. Ако се са $p = (q - q_i)/(q_f - q_i)$ и $\tau = t/T_f$ означе нормализована позиција и нормализован временски интервал код полиномијалног профила, трапезни и полиномијални профил се могу описати једначином (5), са одговарајућим индексима tr и pol у ознакама величина. Трапезни профил брзине коришћен је у радовима [1], [2] и [4]. У раду [3] коришћен је полиномијални профил брзине петог реда, приказан на слици 2б, са шест граничних услова: $p(0) = 0, p'(0) = 0, p''(0) = 0, p(1) = 1, p'(1) = 0$ и $p''(1) = 0$. Диференцирање израза за полином петог реда у односу на нормализовано време даје израз за нормализовану брзину и нормализовано убрзање. Систем једначина се добија заменом граничних услова у овим полиномима, што представља решење које одређује непознате коефицијенте. Коначно решење гласи: $p(\tau) = 6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3, p'(\tau) = 30\tau^4 - 60\tau^3 + 30\tau^2, p''(\tau) = 120\tau^3 - 180\tau^2 + 60\tau$.

$$\begin{aligned}
 q_{pol}(t) = q_i + (q_f - q_i)p(\tau) \quad \text{и} \quad q_{tr}(t) &= \begin{cases} q_i + 0,5 \cdot \ddot{q}_{max} \cdot t^2, & 0 < t \leq T_a \\ q_i + \ddot{q}_{max} \cdot T_a \left(t - \frac{T_a}{2} \right), & T_a < t \leq T_f - T_a \\ q_f - 0,5 \ddot{q}_{max} \cdot (T_f - t)^2, & T_f - T_a < t \leq T_f \end{cases} \\
 \dot{q}_{pol}(t) = \frac{q_f - q_i}{T_f} p'(\tau) \quad \text{и} \quad \dot{q}_{tr}(t) &= \begin{cases} \ddot{q}_{max} \cdot t, & 0 < t \leq T_a \\ \ddot{q}_{max} \cdot T_a, & T_a < t \leq T_f - T_a \\ \ddot{q}_{max} \cdot (T_f - t), & T_f - T_a < t \leq T_f \end{cases} \quad (5) \\
 \ddot{q}_{pol}(t) = \frac{q_f - q_i}{T_f^2} p''(\tau) \quad \text{и} \quad \ddot{q}_{tr}(t) &= \begin{cases} +\ddot{q}_{max} & 0 < t \leq T_a \\ 0 & T_a < t \leq T_f - T_a \\ -\ddot{q}_{max} & T_f - T_a < t \leq T_f \end{cases}
 \end{aligned}$$

2.3 Фази управљање

У радовима [1][2]-3] коришћена је техника фази управљања за пројектовање управљачког система (УС) који је у стању да помера врх хватача захватног механизма у циљу праћења жељене путање. Конкретно, коришћена су два фази УС пропорционално-диференцијалног (ПД) типа за управљање кретања захватног механизма дуж одабране трајекторије, по један за сваки сегмент механизма. Улазне величине контролера су сигнали грешке и извод грешке угаоног положаја, а излазна, односно управљачка величина, је обртни момент. Функције припадности свих улазних и излазних величина дефинисане су на нормализованом домену [-1,1], слика 3.

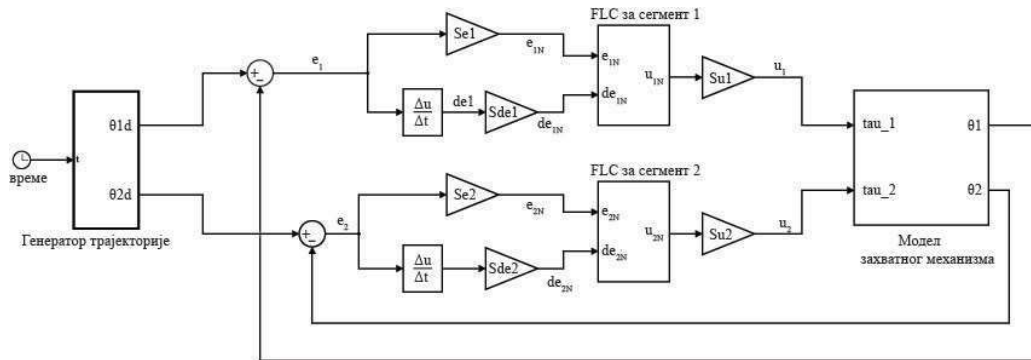


Слика 3. а) Улазне функције припадности, б) излазне функције припадности

Ознаке NL, NM, NS, Z, PS, PM и PL представљају лингвистичке вредности фази променљивих, односно њихове негативно велике, негативно средње, негативно мале, нула, позитивно мале, позитивно

средње и позитивно велике вредности. Примена нормализованих домена је захтевала нормализацију улазних и денормализацију излазних величина, што је учињено увођењем фактора скалирања S_{ei} , S_{dei} , S_{ui} , на следећи начин: $e_{iN} = S_{ei} e_i$, $\dot{e}_{iN} = S_{dei} \dot{e}_i$, $u_i = S_{ui} u_{iN}$, за $i = 1, 2$, где e_{iN} , \dot{e}_{iN} и u_{iN} представљају нормализоване вредности грешке, извода грешке и управљања, следствено. У имплементацији предложених фази контролера коришћена је Ларсенова метода закључивања и метода осредњавања центара као метода дефазификације. Табела 1 представља базу правила описаних контролера, а слика 4 приказује Симулинк модел разматраног захватног механизма са предложеним фази управљањем, који је коришћен за симулацију и верификацију рада система.

Табела 1. Фази правила						
$e_N \backslash e_N$	NB	NS	Z	PS	PB	
NB	NB	NB	NM	NS	Z	
NS	NB	NM	NS	Z	PS	
Z	NM	NS	Z	PS	PM	
PS	NS	Z	PS	PM	PB	
PB	Z	PS	PM	PB	PB	



Слика 4. Симулинк модел система управљања

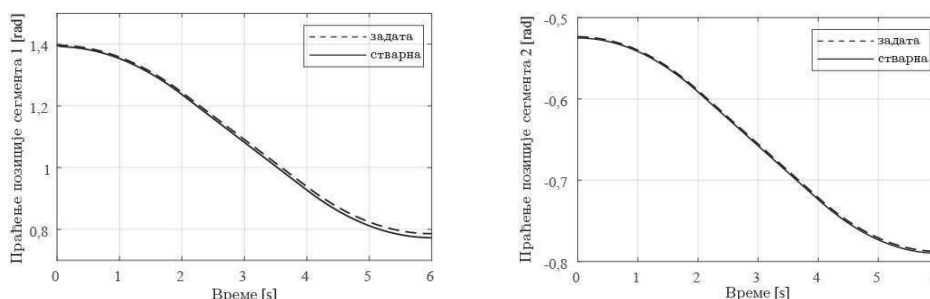
2.4 Оптимизација фази контролера метахеуристичким алгоритмима

Уопштено, фази контролери имају велики број параметара који се могу подешавати у покушају да се достигне оптимално динамичко понашање. Неки од њих су облик и параметри функција припадности, број лингвистичких вредности за улазне и излазне величине, фази правила, улазни и излазни фактори скалирања, итд. У овим истраживањима, избором унапред дефинисаних функција припадности и базе правила, оптимизација фази контролера се свела на подешавање фактора скалирања улазних и излазних величина, као параметара од којих директно зависе перформансе целог система управљања. За овакву оптимизацију најпре је коришћен метахеуристички алгоритам грбавих китова у комбинацији са трапезоидним профилем брзине [1] и [2]. Даље, увођењем полиномијалног профила брзине у раду [3] оптимизација је извршена са четири различита метахеуристичка алгоритма: грбавих китова (енг. Whale Optimization Algorithm WOA), синусно-косинусног алгоритма (енг. Sine-Cosine Algorithm SCA), мрављих лавова (енг. Ant Lion Optimizer ALO) и афричких супова (енг. African Vultures Optimization Algorithm AVOA), од којих је последњи један од најновијих и издвојио се као супериорнији од осталих. Сви поменути параметри (тј. фактори скалирања) су додељени једном агенту коришћењем једног вектора са шест параметара. За функцију циља коришћен је ИТАЕ (интеграл апсолутне грешке помножене временом) критеријум, који је, узимајући у обзир оба сегмента механизма, дефинисан са: $J = \int_0^{\infty} t [|e_1(t)| + |e_2(t)|] dt$.

2.5 Експериментални резултати

Резултати добијени на основу симулационог модела захватног механизма са два степена слободe су приказани на слици 5. Почетни положај захватног механизма је дефинисан са $q_0 = [1, 3963 \ -0, 5236]^T$ rad, крајњи са $q_f = [0, 7854 \ -0, 7854]^T$ rad, а жељено време да систем достигне овај положај је изабрано да буде

$T_f = 6$ s. Након оптимизације WOA алгоритмом (величина популације 10 и укупан број итерација 30), добијени су фактори скалирања: $S_{e1} = 1,8505$, $S_{del} = 0,0784$, $S_{u1} = 0,9218$, $S_{e2} = 1,5$, $S_{de2} = 0,0025$ и $S_{u2} = 1,4385$. Симулација рада система и поређење стварне и задате путање за оба сегмента захватног механизма, показали су да се стварна и задата путања скоро поклапају, са готово занемарљивим одступањем. Грешке у праћењу положаја првог сегмента мања је од $0,005$ rad, док је за други сегмент она мања од $0,001$ rad. Робусност синтетизованих фази управљачких система је тестирана тако што су масе оба сегмента повећане три пута, а сви остали параметри су остали непромењени. Чак и тада, фази УС раде веома задовољавајуће, остварујући грешке од $0,015$ rad и $0,001$ rad за први и други сегмент, следствено, што је и приказано на слици 5.

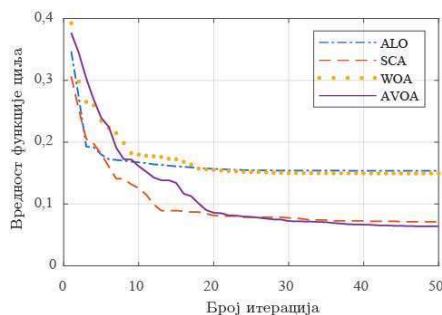


Слика 5. Поређење стварне и задате путање при три пута повећаној маси

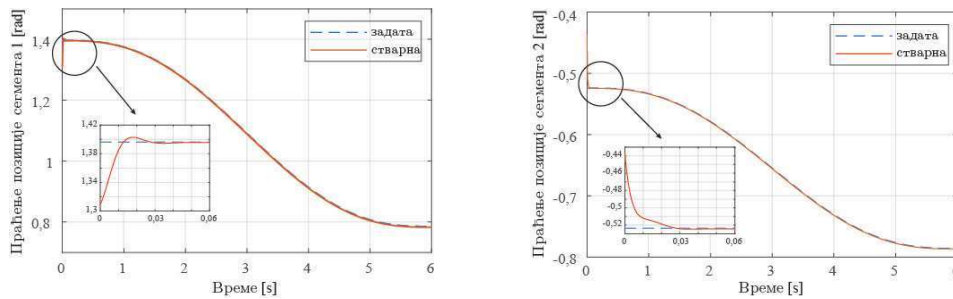
У случају полиномијалног профила брзине [3] ефикасност фази контролера се тестирала за три различите жељене трајекторије механизма. У првом случају, захватни механизам се налази у дефинисаној почетној тачки. Други случај за тестирање претпоставља да се захватни механизам не налази у почетној тачки, већ да постоји извесно одступање, од по 5° за сваки сегмент. У пракси је то случај да мобилни робот приликом свог кретања и позиционирања испред производне машине није заузео потпуно тачну позицију. Последњи случај је тестирање робусности предложеног алгоритма управљања у случају када се масе сегмената повећају три пута. У Табели 2 се налазе осредњени резултати добијени након 10 извршавања, као и најбоље добијене вредности постигнуте применом различитих оптимизационих алгоритама. За све претходно поменуто метахеуристичке алгоритме подешено је да број јединки буде 30, а број итерација 50. Криве конвергенције за осредњене вредности функције циља различитих алгоритама су приказане на слици 6.

На основу Табеле 1 и слике 6 може се закључити да најбољи резултат по питању минималне вредности функције циља даје AVOA метода. Ипак, примећује се и да су брзине конвергенције SCA и AVOA у великој мери сличне. Након оптимизације AVOA методом, добијене вредности фактора скалирања су: $S_{e1} = 1,999$, $S_{del} = 0,0106$, $S_{u1} = 1,5$, $S_{e2} = 1,998$, $S_{de2} = 0,0104$ и $S_{u2} = 0,6834$. Слика 7 приказује поређење стварне и жељене трајекторије првог и другог сегмента, за случај примене AVOA алгоритма оптимизације. Примећује се да се обе трајекторије, за оба сегмента готово поклапају. Резултати тестирања када се механизам налази у одговарајућем почетном положају, за све оптимизационе алгоритме такође дају задовољавајуће резултате. Примећује се да је потребно око $0,03$ s да би дошло до скоро поклапања трајекторија. Предложени оптимизовани фази алгоритам управљања се показао ефикасним и када се маса сегмената троструко повећала. Грешка праћења позиције првог сегмента тада износи око $0,008$ rad, док грешка другог сегмента износи око $0,004$ rad.

Табела 2. Средња и најбоља вредност функције циља		
Оптимизациони алгоритам	Средња вредност функције циља	Најбоља вредност функције циља
ALO	0,1539	0,0769
SCA	0,0712	0,0597
WOA	0,1494	0,0623
AVOA	0,0636	0,0558



Слика 6. Криве конвергенције вредности функције циља



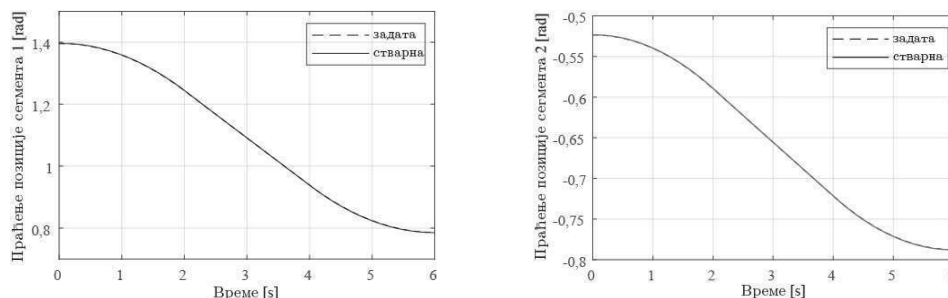
Слика 7. Стварна и задата трајекторија при нултим почетним условима сегмента

2.6 Нелинеарно управљање применом технике feedback линеаризације

Један од озбиљних инжењерских проблема је проналажење математичког модела који је довољно добар да опише систем, а у исто време довољно лак за математички и аналитички третман. Моделовање нелинеарности често је компликовано и увек представља изазов. Претходна истраживања показала су креирање управљачког сигнала без детаљне анализе математичког модела, а главни циљ истраживања [4][2] је развој и имплементација нелинеарног управљачког система, методом feedback линеаризације (енг. feedback linearization, FBL), за захватни механизам чији је модел описан у претходним одељцима. Оно што битно разликује FBL од Јакобијан линеаризације јесте чињеница да она важи на целом домену интереса и не представља апроксимацију система. Како је у овом приступу од посебне важности алгоритам повратне спреге који ће довести до поништавања нелинеарности у једначинама које описују систем, и омогућити коришћење познатих линеарних техника, јасно је да генерализација ове идеје није могућа у сваком нелинеарном систему. Постоје четири услова која морају бити испуњена да би се омогућило овакво управљање: једначина система по стањима мора имати структуру: $\dot{x} = Ax + B\gamma(x)[u - \alpha(x)]$; пар (A, B) мора бити управљив; $\gamma(x)$ мора бити несингуларна и приликом коришћења трансформације модела пресликавања морају бити непрекидна и диференцијабилна. Коначно, када су услови задовољени, може се креирати закон управљања у облику: $u = \alpha(x) + 1/\gamma(x)z$, где z представља нови управљачки сигнал.

2.6.1 Експериментални резултати

Након што су проверени сви услови за примену FBL (једначина система је у одговарајућој форми, матрица управљивости има ранг једнак реду система, $\gamma(x)$ има скаларну вредност различиту од нуле и све функције су синусног и косинусног типа, па су самим тим и диференцијабилне) и након што је утврђено да је релативни ред система једнак реду система (па се линеаризацијом од улаза до излаза врши потпуна линеаризација свих стања, што гарантује непостојање унутрашње динамике), изабран је управљачки сигнал у облику: $\tau = C\dot{q} + G + Mz$, где је нови управљачки сигнал z пропорционално-диференцијабилног типа: $z = \begin{bmatrix} K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} \\ K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} \end{bmatrix}$. Коefицијенти у закону управљања, који су исти за оба сегмента захватног механизма, $K_P = 87,8555$ и $K_D = 18,4000$, одређени су преко задатог прескока и времена смирења. За задату путању, идентичну као у случају фази управљања, применом предложеног закона управљања симулација рада система је показала да је кретање механизма глатко, и без наглог кочења, са грешком праћења путање мањом од $0,001$ rad, што говори о ефикасности пројектованог УС. У оригиналном раду се могу пронаћи позиције, профили брзине и убрзања за оба сегмента, а овде је, на слици 8, приказано поређење у праћењу задате позиције.



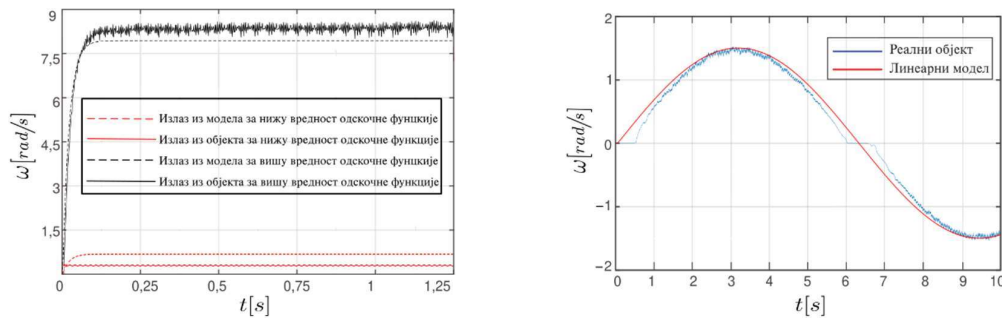
Слика 8. Поређење стварне и задате путање

3. УПРАВЉАЊЕ DC МОТОРА

3.1 Управљање DC мотора применом feedback линеаризације

Иако пројектовање захватних механизма првенствено зависи од природе саме имплементације, за главне покретаче најчешће се бирају серво мотори једносмерне струје. Они долазе у много облика и величина, па је њихова примена прилично лака и флексибилна, док истовремено пружају високу поузданост и ниску цену, имају једноставну структуру и добру стабилност. Истраживања у оквиру пројекта подразумевала су развијање и имплементацију алгоритама управљања брзине и позиције DC мотора. Након што је одређен линеарни математички модел мотора (занемаривањем свих нелинеарних ефеката), поређењем симулације његовог рада у Матлаб/Симулинк окружењу и стварног одзива објекта (експериментално снимљеног), показано је да линеарни модел није довољно добар модел посматраног система, слика 9.

Нелинеарни математички модел DC мотора креиран је коришћењем нелинеарне компоненте момента трења која потиче од Стрибековог ефекта. Најпре је одређен Тустинов модел трења, а затим је извршена његова апроксимација функцијом стрмог хиперболичког тангенса у циљу превазилажења дисконтинуитета, а да би се задовољио услов непрекидности и диференцијабилности за примену FBL технике. На овај начин је заправо моделовано само Кулоново и вискозно, а занемарено је статичко трење. Нелинеарни модел DC мотора је дат једначином (6), где J_{eq} , $B_{eq,v}$, A_m и $f(x)$ представљају еквивалентни момент инерције, коефицијент пригушења, константу актуатора и нелинеарну компоненту трења, следствено. Овај модел је експериментално верификован поређењем са стварним одзивом система на различите улазне побуде.



Слика 9. Поређење одзива објекта и линеарног модела на различите побуде

$$\dot{x} = -\frac{B_{eq,v}}{J_{eq}}x - f(x) + \frac{A_m}{J_{eq}}u, \quad y = x, \quad f(x) = \lambda_1 \left(\frac{2}{1 + e^{-\lambda_2 x}} - 1 \right). \quad (6)$$

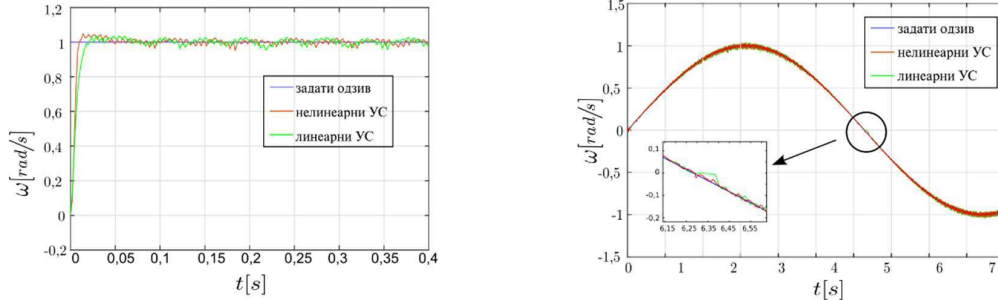
3.1.1 Управљање брзине

Након што су проверени услови за испуњеност FBL усвојен је закон управљања у облику

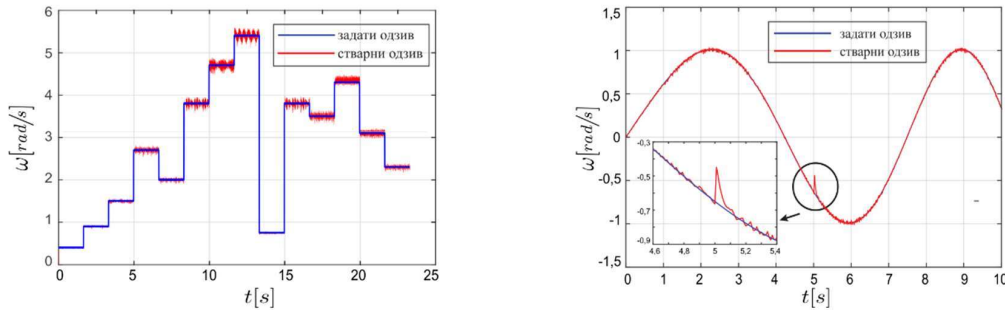
$u = \frac{J_{eq}}{A_m} [f(x) + v]$, где нови управљачки сигнал узима пропорционално-интегралну форму [5]:

$v = K_p \varepsilon + K_i \int_0^t \varepsilon d\tau$. Дефинисањем жељеног динамичког понашања тј. постављањем границе прескока на максималну вредност од 5% и времена прескока на максимално 0,05s, пронађени су пропорционално и интегрално појачање: $K_p = 1,34$ и $K_i = 124,9$. Линеарни управљачки алгоритам се добија на исти начин, али без дела којим се поништава нелинеарност. Слика 10 приказује разлику линеарног и нелинеарног управљања за два различита задата одзива: одскочну функцију (лево) и синусну функцију (десно), одакле се лако уочава да нелинеарни закон управљања даје боље динамичко понашање система. У циљу даљег побољшања рада система, у раду [6] извршена је оптимизација управљачког система (тј. подешавање параметара претходно синтелизованог PI закона управља FBL техником) коришћењем GWO алгоритма. Конкретно, оптималне вредности пропорционалног K_p и интегралног K_i појачања су добијене према усвојеном критеријуму интеграла апсолутне грешке (енг. Integral of absolute errors IAE). Оптимизовани нелинеарни управљачки сигнал је примењен на стварни објект са симулираним белим шумом и поремећајем у облику одскочне функције који, засебно, континуирано делују на објект. Коначно, за неколико задатих сигнала, снимљени су и упоређени одзиви система. Резултати потврђују

робусност оптимизованог нелинеарног УС. На слици 11 (лево) показано је да се, чак и када је задати сигнал функција са скоковитим променама вредности и када на објект делује поремећај у виду белог шума, предложеним алгоритмом остварује жељена брзина. На слици 11 (десно) задата вредност је *chirp* сигнал, где као и код синусоидног сигнала долази до промене смера обртања и тренутка у којем је угаона брзина једнака нули. Управљачки систем је тестиран поремећајем који је уведен у пету секунду и облику одскочне функције. На увеличаном детаљу се примећује како УС успева да се веома брзо избори са овим поремећајем.



Слика 10. Експериментални резултати: линеарно и нелинеарно управљање брзине мотора



Слика 11. Поређење одзива у случају деловања поремећаја белог шума (лево) и одскочне функције(десно)

3.1.2 Управљање позиције

Нелинеарни математички модел DC мотора по позицији тј. његова једначина стања гласи:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-B_{eq,n}}{J_{eq}} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} f(\mathbf{x}) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{A_m}{J_{eq}} \end{bmatrix} u \text{ и } y = [1 \ 0] \mathbf{x}. \quad (7)$$

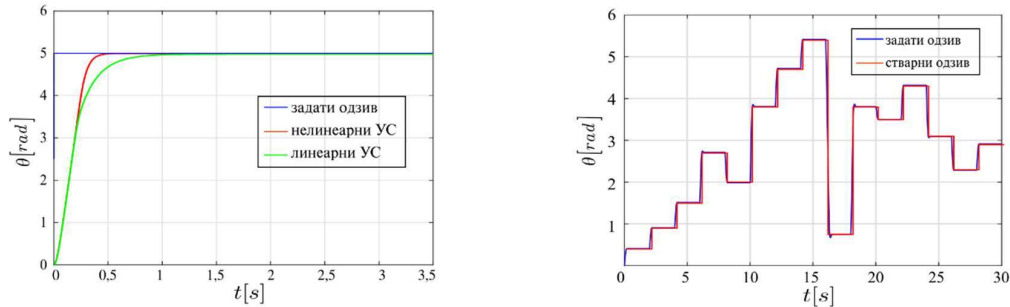
Након што су, и у овом случају, проверени услови за испуњеност FBL, усвојен је закон управљања у облику

$$u = \frac{J_{eq}}{A_m} \left[\frac{B_{eq,n}}{J_{eq}} + f(x) + v \right], \quad v = -K_0 x_1 - K_1 x_2 + K_0 x_{ref}. \quad (8)$$

Постављањем услова да нема прескока и да време смирења не прелази 2,3s пронађени су коефицијенти K_0 и K_1 . Као и у случају управљања брзине, линеарни управљачки алгоритам има идентичне коефицијенте. На слици 12 (лево) се уочава разлика линеарног и нелинеарног управљања за одскочну функцију, а супериорност нелинеарног управљања показана је у [7], за различите задате одзиве. Оптимизација предложеног нелинеарног управљања извршена је метахеуристичким алгоритмима GWO и WOA, са IAE критеријумом као функцијом циља [8]. Поређење добијених резултата за случај оптимизације GWO алгоритмом приказани се на слици 12 (десно), када је за задату жељену вредност узета произвољна функција са брзим одскочним променама. У раду [8] може се пронаћи табеларни приказ поређења ова два метахеуристичка алгоритма, за различите побуде.

3.2 Фази управљање DC мотора применом условне оптимизације

Још једна тема истраживања у оквиру пројекта која се односила на управљање DC мотора била је примена фази управљања и условне оптимизације. Претходно развијена, оригинална метода условне оптимизације линеарних дискретних система применом потпуне преносне функције овде је проширена на класу нелинеарних дискретних система у облику Такаги-Сугено (ТС) фази система. Употреба потпуне преносне функције омогућила је увођење новог облика индекса перформансе – у облику суме квадрата грешака у општем, реалном случају, при истовременом дејству свих утицаја на

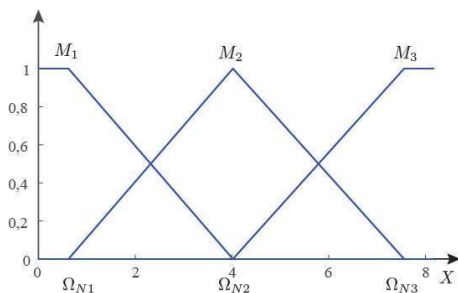


Слика 12. Поређење стварне и задате угаоне позиције

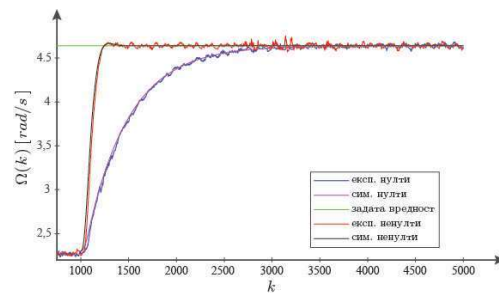
систем: ненултих почетних услова и спољашњег улаза. Због дужине рада, математичке и теоријске основе развијених метода, које се могу наћи у [9], овде се неће излагати, већ ће се само укратко приказати основни резултати.

Нелинеарни ТС фази модел, који веродостојно описује динамичко понашање система на целом простору излаза, се добија интерполацијом неколико линеарних математичких модела. У ту сврху, извршена је идентификација три линеарна временски дискретна математичка модела DC мотора, за три различите номинална тачке Ω_{Ni} , $i=1,2$, где $\Omega(k)$ представља угаону брину у тоталним координатама. ТС фази модел је пројектован применом тих модела, који представљају понашање објекта у околини изабраних номиналних тачака. Функције припадности су равномерно дистрибуиране, са центрима у номиналним тачкама, слика 13. ТС фази модел мотора се математички може изразити са (9), где је $X(k) = \Omega(k)$, а $X_i(k) = X(k)$ представља излазну величину, а параметри a_i , b_i и α_i представљају идентификоване параметре линеарних модела.

$$\text{АКО } X(k) \text{ је } M_i \text{ ОНДА } \begin{cases} X(k+1) = a_i X(k) + b_i U(k) + \alpha_i, & i = 1, 2, 3, \\ X_i(k) = X(k) \end{cases} \quad (9)$$



Слика 13. Функције припадности Такаги-Сугено фази модела DC мотора



Слика 14. Симулациони и експериментални резултати пројектованог PDC управљања

За управљање је искоришћена техника паралелног расподељеног управљања (енг. Parallel Distributed Compensation, PDC), где се свако управљачко правило добија из еквивалентног правила ТС фази модела:

$$\text{АКО } X(k) \text{ је } M_i \text{ ОНДА контролер је } C_i \quad (10)$$

За разлику од оригиналне PDC технике, која користи статички закон управљања у простору стања, овде је искоришћен пропорционално-сумарни тип управљања првог реда, чији је облик:

$$u(k+2) + (T-2)u(k+1) + (1-T)u(k) = KT\varepsilon(k+1) + (K_s T^2 - KT)\varepsilon(k) \quad (11)$$

Излаз из контролера је тада:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i(X(k))C_i}{\sum_{i=1}^3 w_i(X(k))} = \sum_{i=1}^3 h_i(X(k))C_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

где C_i представља пропорционално-сумарни контролер првог реда дефинисан у комплексном домену након примене Z -трансформације на једначину (11):

$$C_i(z) = \frac{K_i T z + K_{si} T^2 - K_i T}{z^2 + (T-2)z + 1 - T}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

За условну оптимизацију у параметарском простору са два подешљива параметра (K и K_s) коришћен је карактеристични полином потпуне преносне функције сваког од линеарних подсистема, што је уз примену новог индекса перформансе омогућило да се одреде њихови оптимални параметри, уважавајући захтев да сви појединачни затворени системи управљања имају захтевани степен пригушења $\zeta=0,7$. Ови оптимални параметри су одређени за оба случаја – и нултих (класичан приступ) и ненултих почетних услова, а у циљу будућег поређења. Предложена метода је експериментално верификована на DC мотору, а на слици 14 приказани су добијени симулациони и експериментални резултати. Када се систем пројектује на класичан начин (нулти почетни услови) и крене из ненултих почетних услова, динамичко понашање (одзив) система је значајно лошије у односу на случај када је он пројектован на нови начин, који узима у обзир те ненулте почетне услове. Иако класична метода даје параметре који би требало да буду оптимални за све почетне услове, ово истраживање је показало да то није случај, и да је развијена метода потпунија од класичне управо зато што узима у обзир ненулте почетне услове из којих објект започиње свој рад.

4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду, дат је преглед дела резултата истраживања остварених у оквиру научног пројекта MISSION4.0, а који се односе на оптимално кретање захватног механизма мобилног робота, као и на управљање брзине и позиције DC мотора. Реализовани су фази управљачки систем у сврху праћења задате путање захватног механизма са два сегмента, као дела радног циклуса мобилног робота. Задата путања је добијена поступком оптимизације кретања захватног механизма применом принципа максимума, а у циљу минимизације времена трајања, при чему су коришћена два профила брзине – трапезни и полиномијални. Различити метахеуристички алгоритми искоришћени су за оптимизацију фактора скалирања предложеног фази контролера ПД дејства, са ITAE критеријумом као функцијом циља. Нумеричким симулацијама приказане су и анализирани перформансе праћења задате путање. Штавише, робусност контролера је тестирана у случају претпоставља да се захватни механизам не налази у почетној тачки и у случају промене масе сегмената захватног механизма. Такође, за постављени задатак праћења задате путање пројектован је управљачки систем са законом управљања заснованим на feedback линеаризацији, као нелинеарној техници управљања. Резултати симулације показали су да су предложени закони управљања у стању да се носе са нелинеарностима захватног механизма и и променом његових параметара, те да се стога ради о веома корисним и ефикасним техникама за управљање кретања захватног механизма.

Други циљ истраживања био је управљања брзине и позиције DC мотора, као главног покретача захватног механизма, и роботске руке уопште. DC мотор је разматран као објект аутоматског управљања и добијен је његов линеарни математички модел. Како се овај модел показао недовољно тачан, за потребе истраживања извршена су мерења и идентификација трећа, чиме је добијен и нелинеарни модел објекта. Након симулације рада неуправљаног објекта урађена је и експериментална провера валидности добијених модела. Затим је извршена апроксимација функције трећа у

диференцијабилну функцију хиперболичког тангенса, у сврху управљања објекта техником feedback линеаризације. Комплетни поступци су експериментално верификовани, на модуларном едукационом систему QUANSER за управљање у реалном времену. Разматрани су одзиви објекта управљаног различитим техникама: линеарном, постављањем одређених захтева одзиву система у виду прескока, времена прескока и смирења, нелинеарном, као и нелинеарном техником оптимизованом метахеуристичким алгоритмима. Коначно, предложено је и експериментално верификовано и фази управљање DC мотора применом Такаги-Сугено фази модела мотора и претходно развијене нове методе условне оптимизације његових линеаризованих подсистема на бази потпуне преносне функције. Као техника управљања коришћено је паралелно расподељено управљање, са законом управљања пропорционално-сумарног дејства. Значај нове методе условне оптимизације је да узима у обзир истовремено и дејство нултих почетних услова (за разлику од класичних метода, које узимају нулте почетне услове) и спољашњег улаза. Показано је да оптимални параметри управљачког система за дати систем при свим нултим почетним условима нису адекватни за његов рад у почетним условима који нису нулти и да је предложена метода знатно супериорнија.

Остварени резултати који су презентовани у часописима са SCI листе и међународним конференцијама дају нам за право да сматрамо истраживања веома успешним, и да она представљају основу за даља истраживања у овој веома актуелној и значајној области.

5. ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

Представљени резултати истраживања, као и овај рад, подржани су од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије по Уговору бр. 451-03-68/2022-14/200105, као и од Фонда за науку Републике Србије, по Уговору бр. 6523109,

6. ЛИТЕРАТУРА

Ово је списак литературе која представља остварене резултате истраживања на пројекту *Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 – MISSION 4.0* који су презентовани у часописима са SCI листе, међународним конференцијама и део су техничког решења, и која је коришћена за састављање овог прегледног рада.

- [1] Jovanović, R., Bugarić, U., Laban, L., Vesović M.: *Trajectory Tracking of a Two – Link Gripping Mechanism*, Proceedings of the X Triennial International Conference Heavy Machinery, Session C 1-8, Vrnjačka Banja, June 23-25, 2021.
- [2] Јовановић, Р., Бугарић У., Весовић М., Лабан, Л.: *Оптимално управљање кретања захватног уређаја*, Техничко решење, Универзитет у Београду, Машински факултет, 2021.
- [3] Jovanović R., Bugarić U., Vesović M., Perišić N.: *Fuzzy Controller Optimized by the African Vultures Algorithm for Trajectory Tracking of a Two–Link Gripping Mechanism*, FME Transactions, Vol. 50, No. 3, pp. 491-501, 2022.
- [4] Vesović M., Jovanović, R., Laban, L., Bugarić, U., *Feedback Linearization Control of a Two – Link Gripping Mechanism*, Proceedings of the X Triennial International Conference Heavy Machinery, Session C 9-16, Vrnjačka Banja, June 23-25, 2021.
- [5] Vesović, M., Jovanović, R., Zarić, V., *Modelling and Speed Control in a Series Direct Current (DC) Machines Using Feedback Linearization Approach*, Proceedings of the 5th International Conference “Mechanical Engineering in the 21st Century” - MASING 2020, ISBN 978-86-6055-139-1, pp. 207-212, Niš, December 09-10, 2020.
- [6] Vesović, M., Jovanović, R., Trišović, N.: *Control of a DC motor using feedback linearization and gray wolf optimization algorithm*, Advances in Mechanical Engineering, Vol 14, No. 3, pp. 1-16, 2022.
- [7] Vesović, M., Jovanović, R., Zarić, V., Laban, L.: *Modelling and Control of a Series Direct Current (DC) Machines Using Feedback Linearization Approach*, Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN 2020, ISBN 978-86-7466-852-8, pp. 191-196, Belgrade, Čačak, Niš, Novi Sad, September 28-29, 2020.
- [8] Vesović, M., Jovanović, R.: *Grey Wolf Optimization for Position Control of a Direct Current Motor Driven by Feedback Linearization Method*, In Sinteza 2022-International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research, pp. 36-43. Singidunum University, 2022.

- [9] Jovanović, R., Zarić, V., Bučevac, Z. Bugarić, U.: *Discrete-Time System Conditional Optimization Based on Takagi–Sugeno Fuzzy Model Using the Full Transfer Function*, Applied Sciences, Vol. 12, No. 15, 7705, 2022.

Jovanović, R., Bugarić, U., Vesović, M., Perišić N.

FUZZY AND NONLINEAR CONTROL OF THE GRIPPING MECHANISM AND A DIRECT CURRENT MOTOR – OVERVIEW OF THE RESEARCH RESULTS WITHIN THE MISSION4.0 PROJECT

Abstract: *One of the work packages in the project Deep Machine Learning and Swarm Intelligence based Optimization Algorithms for Control and Scheduling of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0 - MISSION4.0 included research in the field of nonlinear optimization problems and control of the motion of the gripping mechanism in the presence of constraints. In order to achieve the proposed path of the gripping mechanism, control systems based on fuzzy logic, were designed and their parameters were optimized using various metaheuristic optimization methods. The application of the proposed control techniques is shown on the example of the gripping mechanism of an autonomous mobile robot. The second part of the research was related to the control of the speed and position of the direct current motor, as the main actuator of the gripping mechanism, where different control techniques were applied: fuzzy control, feedback linearization technique, as well as their optimized versions with different metaheuristic algorithms. This paper provides an overview of a part of the results of the MISSION4.0 project, published in various international and national journals and conferences, as well as an overview of the results presented in the technical report.*

Key words: *gripping device, DC motor, trapezoidal and polynomial velocity profile, fuzzy control and feedback linearization, metaheuristic optimization algorithms.*