

## ÜÇ SƏRBƏSTLİK DƏRƏCƏLİ ROBOT MANİPULYATOR SİSTEMİ ÜÇÜN OPTİMAL PİD TƏNZİMLƏYİCİSİNİN MODELLEŞDİRİLMƏSİ

**Kifayət Aslan qızı Məmmədova, Yeganə Novruz qızı Əliyeva,  
Aytən Əmiraslan qızı Əliyeva, Nigar Gündüz qızı Bağirova**  
*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan*

### MODELING AN OPTIMAL PID CONTROLLER FOR A THREE-DEGREE-OF-FREEDOM ROBOT MANIPULATOR SYSTEM

**Kifayat Aslan Mammadova, Yegana Novruz Aliyeva, Aytan Amiraslan Aliyeva, Nigar Gunduz Baghirova**  
*Azerbaijan State Oil and Industry University, Department of Computer Engineering, Baku, Azerbaijan:*  
*ka.mamedova@yandex.ru, yegane.aliyeva.1969@mail.ru, aytan\_aliyeva@gmail.com, bagirovan2309@gmail.com*  
*https://orcid.org/0000-0002-6530-2021, https://orcid.org/0000-0002-4211-9806,*  
*https://orcid.org/0009-0000-1379-4944, https://orcid.org/0009-0003-4170-1620*

**Abstract.** In this research work, the application and analysis of the optimization methodology based on the dynamic flying objects algorithm to design the robot manipulator based on the optimal PID controller is considered. Based on the dynamic analysis of robot manipulators, the interaction between the torques created by the actuators and the position and speed of the manipulator was investigated. The optimal PID control law obtained from the proposed algorithm is applied to the robot system. The proposed controller optimizes the trajectory of the robot's end-effector for input during variable time and hardens the robot against perturbing effects. To achieve a highly adaptive optimization process, the correct formulation of the utility function leads to optimal solutions. Three different objective functions were used in the process of optimization of control parameters in the robot system and their results were compared.

In this work, a new debugging methodology for trajectory tracking in robotic manipulator systems is presented. Optimum benefit is obtained by using the proposed PID regulation law. The obtained results are satisfactory and competitive. It has been determined that the problems of the smooth control system in the places where the robot system is highly non-linear are regulated by classical methods.

**Keywords:** *PID regulator, control systems, robotic manipulators, trajectory optimization.*

© 2024 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

## 1. Giriş

Robot manipulyatoru öz funksiyalarını inteqrasiya olunmuş şəkildə yerinə yetirmək üçün ən azı bir quraşdırılmış qolu ehtiva edən mobil robot bazasıdır. Mobil manipulyatorların istifadəsi insan təhlükəsizliyi ilə bağlı amillərə görə müxtəlif sahələrdə eksponent olaraq artır. Real həyatda tətbiq olunan mühitlər, məsələn, yüksək temperaturlu ərazilər və ya zərərli qazların mövcud olduğu yerlər insanlar üçün təhlükəli ola bilər. Manipulyatorun əsas məqsədi müəyyən bir yerə çatmaq və obyekt-ləri götürməkdir. Sənaye sahələrində mobil manipulyatorlardan istifadənin iki ssenarisi var. Birinci ssenari, məlum mühitlərdə obyektlərin və alətlərin daşınmasında robot manipulyatorlarından istifadəni nəzərdə tutur. İkincisi, robotların strukturlaşdırılmamış mühitlərdə, xüsusən də insanlar üçün yararsız olan təhlükəli yerlərdə istifadəsini nəzərdə tutur. Hətta, köməkçi robotlar evdə gündəlik məişət işlərini yerinə yetirməkdə kömək edə biləcək başqa bir avtonom robotlar kateqoriyasını da təşkil edir. Bütün tətbiqlərdə robotlardan yüksək etibarlılığa nail olmaq üçün işlərini yüksək səviy-yədə dəqiqliklə yerinə yetirmək tələb olunur.

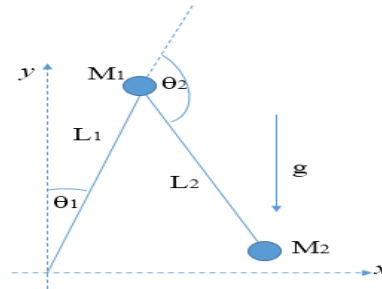
Robot manipulyatorlarının idarə edilməsi onun mürəkkəb dinamik modelinə görə çox öyrənilən bir sahədir. [1]-də robot modelin dinamik təhlili əsasında aktuatorların birgə fırlanma momentləri ilə robot manipulyatorunun mövqeləri arasında birləşmə əlaqəsi araşdırılmışdır. Qeyri-xətti dinamika və mövqelərin birləşmə əlaqələri dəqiq və ciddi idarəetməni çətinləşdirir. Belə ki, robot sisteminin dinamikasından asılı olan klassik idarəetmə üsulları əsasında tənzimləyicinin layihələndirilməsi çox çətinidir. İki keçid manipulyator robot sistemi üçün müxtəlif idarəetmə sxemləri verilmişdir. Perez neyron şəbəkələrdən asılı olan PİD tənzimləmə qanununu təqdim edilmişdir. Qeyri-səlis PİD kontrollerlər əsasında trayektoriyayı izləyən robot sistemlərindən istifadə edilmişdir [2]. Son

dövrərdə təkamül alqoritmləri əsasında robot sistemlərinin hərəkət trayektoriyasının planlaşdırılması geniş öyrənilir. Başqa sözlə desək, təkamül alqoritmləri robotların sistem tətbiqləri üçün alternativ layihələnmə metodologiyası kimi meydana çıxmışdır [3,4].

Təkamül alqoritmləri bir çox tədqiqatçılar üçün təbii sistemləri və ya bioloji prosesləri təqlid edən stoxastik optimallaşdırma üsullarıdır [5]. Təbii sistemləri təqlid etmək, möhkəmlik və kollektiv öyrənmə prosesi təkamül alqoritmlərinin əsas xüsusiyyətləri olub, qlobal optimal həlli tapmaq qabiliyyəti və çoxlu sayda qeyri-xətti dəyişən problemlərlə üzləşə bilmək imkanına malikdir [6]. Ədədi optimallaşdırma məsələlərini həll etmək üçün [7]-də virtual təkamül alqoritmı təqdim edilmişdir. Bu alqoritmə problemlər robotun qida mənbələrinin seçilməsi və tətbiqi kimi model-ləşdirilmişdir. Onlara münasib uyğunluq funksiyaları qida mənbələrinin keyfiyyətinə uyğunlaşdırılır. Robotun qida mənbələrinin həcmi ölçmək üçün ölçü cihazı və ya müşahidəçi sensorlar adlanan qurğuya informasiyalar göndərilir.

## 2. Robot sisteminin dinamik modeli

Robot manipulyatoru robot sisteminin insan operatoru tərəfindən idarə olunan və kompo-nentlərin, alətlərin və s. daşınmasında xüsusi tapşırıqların yerinə yetirilməsi üçün istifadə edilən hissəsidir. Müxtəlif hərəkətləri yerinə yetirmək üçün tapşırıqlar yazılı proqramla daxil edilə bilər [9,10]. Robot manipulyatoru kinematik cütlərlə birləşən və xətti hərəkət edən bir neçə bənddən ibarətdir. Hərəkət, robot bəndlərinin mövqelərini ölçən bir neçə aktuator və sensor vasitəsilə idarə olunur (şəkil 1).



Şəkil 1. Robot modeli

Burada  $M_1$  və  $M_2$  kq-la ölçülən oynaq (şarnir) kütlələridir,  $L_1$  və  $L_2$  bəndlərin uzunluqlarıdır,  $g$  gravitasiya sabitidir,  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$  və  $\ddot{\theta}$  müvafiq olaraq vəziyyət, sürət və təcillərdir.

İdarəetmə sisteminin məqsədi tapşırığı yerinə yetirmək üçün aktuatoru (bəzi ədəbiyyatlarda son effektor da adlanır) və ən uzaq əlaqəni əvvəlcədən müəyyən edilmiş koordinatlarda yerləşdirməkdir. Aktuatorlar (bunlara informasiya ötürücüləri də deyilir) xüsusi fırlanma momenti tətbiq etməklə manipulyatorun birləşmə bucaqlarını hərəkət etdirirlər.

### 2.1. Robot manipulyatorun hərəkət dinamikası məsələsi

Robot manipulyatorunun seqmentlərinin dekart və qütb koordinatları arasında sadə keçid mövcuddur. 2DOF (Degree of Freedom – Sərbəstlik dərəcəsi) robot manipulyatoru üçün XY koordinat müstəvisində cütlərin bucaqları arasında keçid etmək üçün aşağıdakı birbaşa keçid tənlik-lərindən istifadə olunur [7,8].

$$x_1 = L_1 \sin(\theta_1); \quad (1)$$

$$y_1 = L_1 \cos(\theta_1); \quad (2)$$

$$x_2 = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2); \quad (3)$$

$$y_2 = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2); \quad (4)$$

Yuxarıdakı robot sisteminin kinetik enerjisini hesablayan tənlik aşağıdakı kimi təsvir edilir:

$$KE = \frac{1}{2}(M_1 + M_2)L_1^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}M_2L_2^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}M_2L_2^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}M_2L_2^2\dot{\theta}_2^2 + M_2L_1L_2\cos(\theta_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \quad (5)$$

Potensial enerji aşağıdakı kimidir:

$$PE = M_1gL_1\cos\theta_1 + M_2g(L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1 + \theta_2)) \quad (6)$$

Kinetik enerji tənliyini sadələşdirməklə Karteziandan polyar tənliklərinə keçdikdən sonra robot manipulyatorunun hərəkətini təsvir edən tənlik aşağıdakı kimi olacaq:

$$B(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q) + g(q) = F, \quad (7)$$

Buradan (8) alınır:

$$q = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$n$  ölçülü ardıcıl keçidli robot manipulyator sistemi üçün  $B(q) \in R^{n \times n}$  müəyyən müsbət ətalət matrisidir,  $C(\dot{q}, q) \in R^n$  mərkəzdənqaçma qüvvələrin vektoru,  $g(q)$  qravitasiya matrisidir və  $F \in R^n$  birləşmələrdə tətbiq olunan fırlanma anını göstərir. Bu matrislər robot sisteminin dinamik hərəkətini təsvir edir [4,10]:

$$B(q) = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

Burada,

$$B_{11} = (M_1 + M_2)L_1^2 + M_2L_2^2 + 2M_2L_1L_2\cos(\theta_2); \quad (10)$$

$$B_{12} = B_{21} = M_2L_2^2 + 2M_2L_1L_2\cos(\theta_2); \quad (11)$$

$$B_{22} = M_2L_2^2; \quad (12)$$

Ətalət (13) və cazibə (14) matrisləri aşağıda verilib:

$$C(\dot{q}, q) = \begin{pmatrix} -M_2L_1L_2\sin(\theta_2)(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -M_2L_1L_2\sin(\theta_2)(\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$g(q) = \begin{pmatrix} -(M_1+M_2)gL_1\sin\theta_1 - M_2gL_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ -M_2gL_2\sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

Tətbiq olunan fırlanma momenti:

$$F = \begin{pmatrix} f_{\theta_1} \\ f_{\theta_2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

kimi təyin edilir.

## 2.2. İdarəetmə sisteminin qurulması

**Məsələnin həlli üsulu.** İstənilən sistem modeli üçün PİD tənzimləyicisinin ümumi strukturunun xəta signalının proporsional, inteqral və differensial hərəkət qanunları əsasında təyin olunduğu məlumdur [11,12]. PİD tənzimləyicisinin riyazi təsviri (16)-da verilir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (16)$$

Robot manipulyator modeli üçün tənzimləyicinin çıxışı robot dinamik sisteminə (17) tətbiq olunan fırlanma momentidir:

$$\ddot{q} = B(q)^{-1}[-C(\dot{q}, q) - g(q)] + F, \quad (17)$$

(17.1)-də verilmiş  $\hat{F}$  qeyri-fiziki fırlanma momentidir. Robot sisteminin dinamik təsviri,  $B(q)$  faktiki giriş momenti ilə ətalət matrisi əsasında əlaqələndirilir (17.1):

$$\hat{F} = B(q)^{-1}F \leftrightarrow F = B(q)\hat{F} \quad (17.1)$$

Qeyri-fiziki giriş momentinə sahib olmaq üçün yuxarıdakı sistemi ayırmaqla aşağıdakılar əldə edilir:

$$\hat{F} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Dinamik sistemin fiziki giriş anı (19-21) kimi təyin edilir:

$$\begin{pmatrix} f_{\theta_1} \\ f_{\theta_2} \end{pmatrix} = B(q) \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$f_1 = K_{P1}(\theta_{1f} - \theta_1) + K_{11} \int e(\theta_1)dt - K_{11}\dot{\theta}_1 \quad (20)$$

$$f_2 = K_{P2}(\theta_{2f} - \theta_2) + K_{12} \int e(\theta_2)dt - K_{12}\dot{\theta}_2. \quad (21)$$

Beləliklə, tam tənliklər sistemi (22) kimi təyin edilir:

$$\ddot{q} = B(q)^{-1}[-C(\dot{q}, q) - g(q)] + \begin{pmatrix} K_{P1}(\theta_{1f} - \theta_1) + K_{11} \int e(\theta_1)dt - K_{11}\dot{\theta}_1 \\ K_{P2}(\theta_{2f} - \theta_2) + K_{12} \int e(\theta_2)dt - K_{12}\dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

İndi məqsəd kinematikanın trayektoriya xətlərini minimuma endirmək məqsədilə hər bir birləşmə üçün uyğun  $K_P$ ,  $K_I$  və  $K_D$  əmsallarını (22) tapmaqdır.

### 2.3. Faydalılıq funksiyası

Yüksək adaptivli optimallaşdırma prosesinə nail olmaqda ən vacib məsələ həllin uyğunluğunun qiymətləndirilməsində istifadə olunan faydalılıq funksiyasının seçilməsidir. Optimallaşdırma prosesi zamanı faydalılıq funksiyasının düzgün formalaşdırılması optimal həllərə gətirib çıxarır (cədvəl). Bu robot sisteminə idarəetmə parametrlərinin optimallaşdırılması prosesində (23)–(25) üç müxtəlif məqsəd funksiyası seçilir.

Kvadratik Xətanın Orta Kökü (KXOK):

$$KXOK = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sqrt{e_{\theta_1}(i)^2 + e_{\theta_2}(i)^2} \quad (23)$$

Mütləq Orta Xəta (MOX):

$$MOX = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |e_{\theta_1}(i)| + |e_{\theta_2}(i)| \quad (24)$$

Faydalılıq funksiyası üçün parametrlər

İndeks	KXOK	MOX	ITIX
K <sub>F1</sub>	203.0000	200.0000	20.2456
K <sub>I1</sub>	20.3749	50.0078	2.9800
K <sub>D1</sub>	23.7962	6.9577	28.0853
K <sub>F2</sub>	184.0705	256.496	41.7381
K <sub>I2</sub>	50.0000	47.2071	4.9872
K <sub>D2</sub>	7.8562	9.5697	3.0969
K <sub>F3</sub>	6.4567	5.6784	3.5676
K <sub>I3</sub>	45.3876	67.345	87.3454
K <sub>D3</sub>	23.4567	87.3453	76.349
Faydalılıq funksiyası	0.3487656	0.56324	45.5643

İdarəetmə Təsirli İstinad Xətası (İTİX):

$$ITIX = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |e_{\theta_1}(i)| + |e_{\theta_2}(i)| + |u_{\theta_1}(i)| + |u_{\theta_2}(i)| \quad (25)$$

Bu məqsəd funksiyaları robot sisteminin dinamik reaksiyasına əsasən hesablanır [12].

### 3. Dinamik obyektlərin hərəkət trayektoriyasının kompüter modelləşdirilməsi

#### 3.1. Məsələnin həlli algoritmi

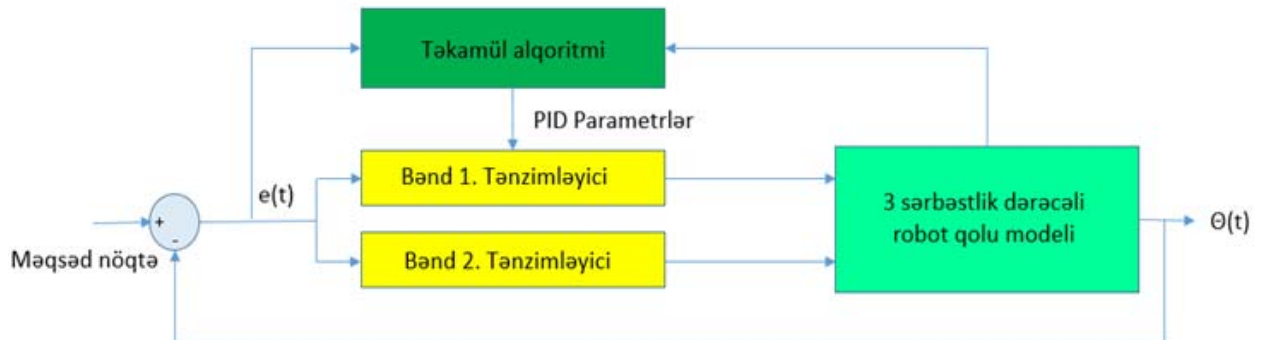
Təklif olunan tənzimləmə prosesini qiymətləndirmək üçün kompüter simulyasiyalarının ədədi nəticələri analiz edilmişdir (şəkil 2). Robot sistemi üçün hər iki oynaqın kütləsi  $M_1 = 1 \text{ kq}$  və  $M_2 = 1 \text{ kq}$ ; bəndlərin uzunluqları  $L_1 = 1 \text{ m}$  və  $L_2 = 1 \text{ m}$ -dir; qravitasiya sürəti  $g = 9,81 \text{ m/san}^2$ ; simulyasiya müddəti 20 saniyə götürülür.

Analiz edilən robot manipulyatorunun trayektoriyası sinusoidal siqnal kimi qəbul edilir:

$$\theta_{1f}(t) = 0.1524 + 0.24384 \cos\left(\frac{2\pi t}{5} - \frac{\pi}{2}\right); \quad (26)$$

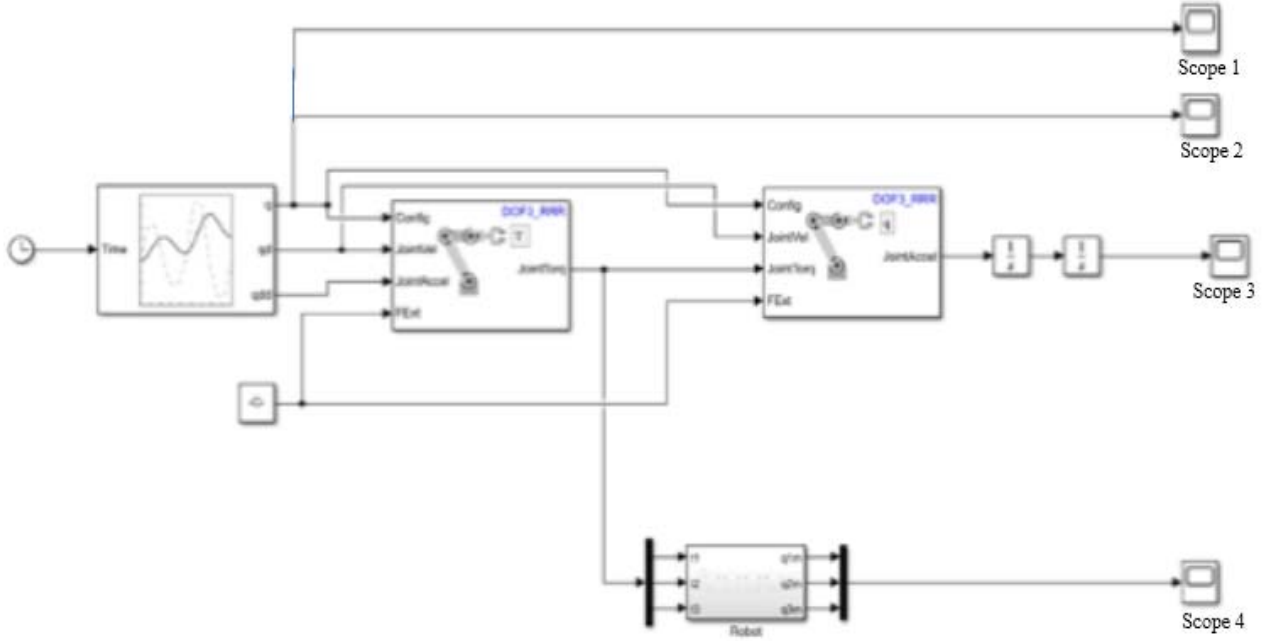
$$\theta_{2f}(t) = 0.39624 + 0.24384 \cos\left(\frac{2\pi t}{5} - \frac{\pi}{2}\right); \quad (27)$$

Təklif olunan 3DOF Robot manipulyatoru üçün optimal PİD tənzimləyicisinin layihəsi əsasında bir neçə simulyasiya təcrübələri aparılmışdır. Robot sisteminin daxili strukturu Simulink MATLAB Proqram Alətindən istifadə etməklə qurulur (şəkil 3).



Şəkil 2. Robot sisteminin PİD tənzimləməsinin sxematik diaqramı

Optimallaşdırma prosesi robot manipulyatorun son effektorunun trayektoriyasında xətni minimuma endirmək üçün həyata keçirilir.



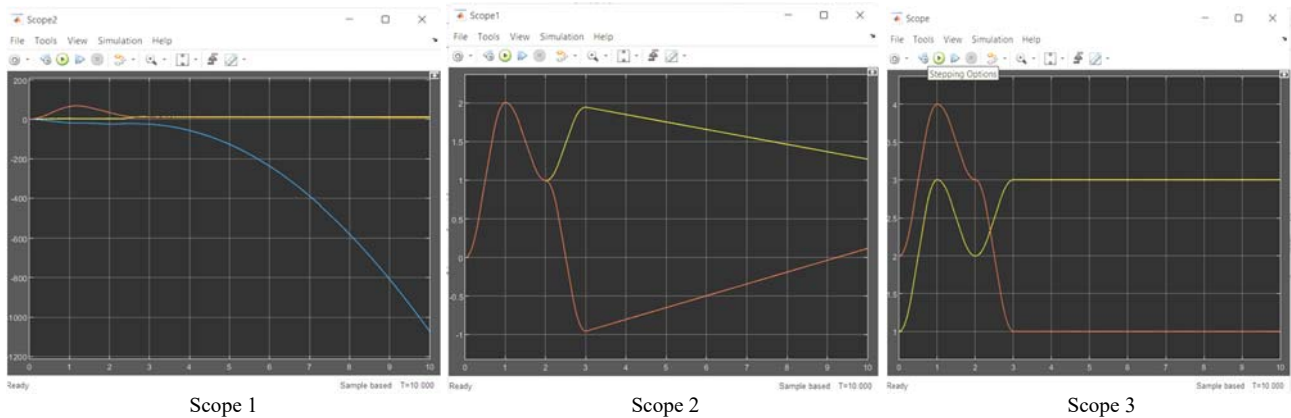
Şəkil 3. PİD kontroller qoşulmazdan əvvəl 3DOF robot manipulyatorun dinamik sistemi

### 3.2. Nəticələrin analizi

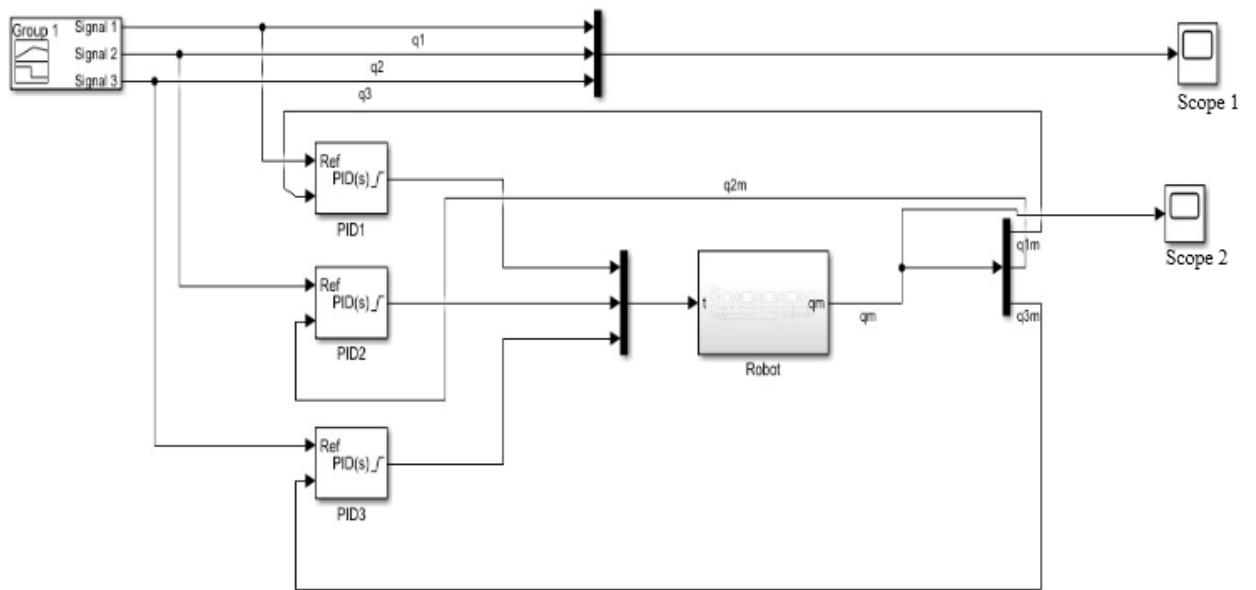
Şəkil 3-də verilmiş Simulink modelinə əsasən Scope 1-dən alınmış nəticə trayektoriyanın düz və tərs məsələsi həll olunmazdan qabaq robotun trayektoriyada olan hərəkətinin qrafikini əks etdirir. Scope 2-dən alınmış nəticə isə kinematikanın həm düz, həm də, tərs məsələsi həll olunduqdan sonrakı yekun qrafikdir. Scope 3-də kinematikanın yalnız tərs məsələsinin həlli nəticəsində alınan keçid prosesi ayrısi təsvir olunur (şəkil 4).

Şəkil 5-də verilmiş PİD kontrollerlərində PİD konfiqurasiya olunmadığı üçün Şəkil 7-dən alınmış nəticədə, robotun hərəkətinin qrafiki hər bir PİD kontrollerləri üçün fərqli şəkildə verilmişdir.

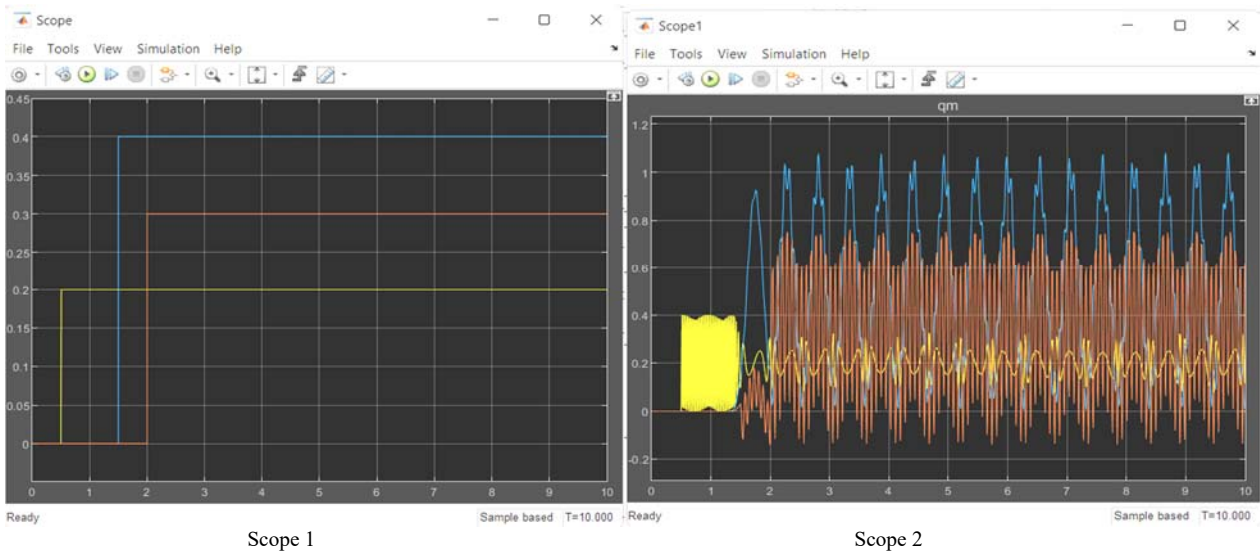
Şəkil 8-də alınmış nəticəyə əsasən deyə bilərik ki, PİD konfuqurasiya olunmazdan əvvəl Şəkil 6-da Scope 1-də alınmış qrafikin Scope 2-də alınmış qrafiklə heç bir əlaqəsi yoxdur. Yəni, konfuqurasiyadan əvvəl robotun PİD kontrollersiz alınmış nəticəsi (Şəkil 4) Şəkil 8-də alınmış nəticə ilə əlaqələlidir.



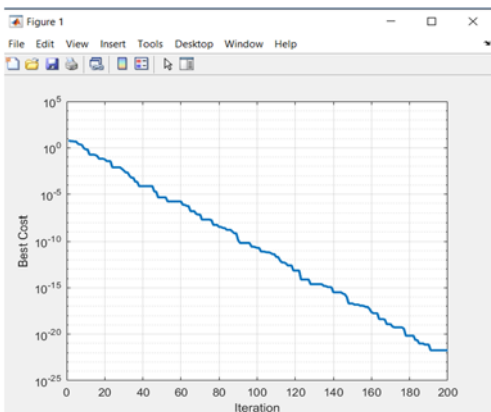
Şəkil 4. Scope 1, Scope 2 və Scope 3-dən alınmış nəticələr



Şəkil 5. PID kontroller qoşulmuş 3DOF robot manipulyatorunun simulink sxemi



Şəkil 6. Şəkil 5-dəki Scope 1 və Scope 2-dən alınmış nəticə



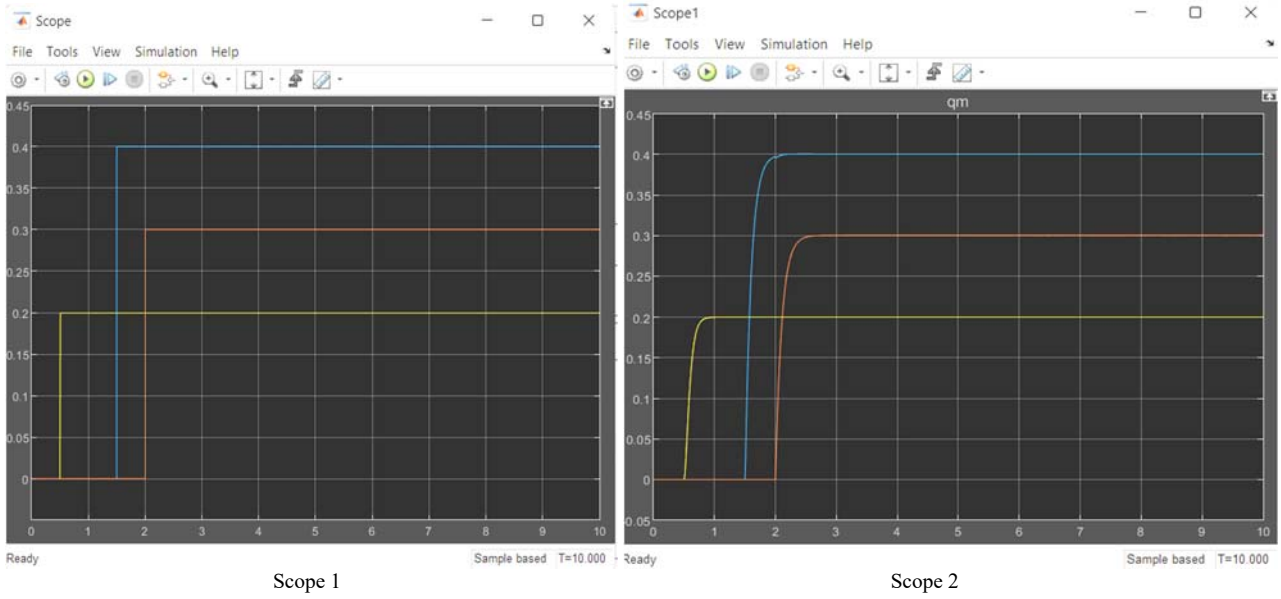
a)

```

1 TunedBlocks={'PD1','PD2','PD3'};
2 ST0=sITuner('DOF_RRR',TunedBlocks);
3 addPoint(ST0,TunedBlocks);
4 addPoint(ST0,'Robot/qm');
5 RefSignals={...
6     'DOF_RRR/Signal Builder/q1','DOF_RRR/Signal Builder/q2','DOF_RRR/Signal Builder/q3'};
7 addPoint(ST0,RefSignals);
8 Controls=TunedBlocks;
9 Measurements='DOF_RRR/Robot/qm';
10 options=looptuneOptions('RandomStart',80,'UseParallel',false);
11 TR=TuningGoal.StepTracking(RefSignals,Measurements,0.05,0);
12 ST1=looptune(ST0,Controls,Measurements,TR,options);
13 writeBlockValue(ST1)
14
15
16
    
```

b)

Şəkil 7. a) ABC(Artificial Bee Colony) alqoritmindən alınmış nəticə, b) PID kontrollerinin sazlanması alqoritmi



Şəkil 8. Sazlanmadan sonra şəkil 2-dəki 1-ci və 2-ci Scope-dan alınmış nəticə

#### 4. Nəticə

Bu məqalədə robot manipulyator sistemlərində trayektoriyanın izlənməsi üçün yeni sazlama metodologiyası təqdim edilmişdir. Təklif olunan PİD tənzimləmə qanunundan istifadə etməklə optimal fayda əldə edilir. Alınan nəticələr qənaətbəxşdir. Robot idarəetmə sisteminin yüksək qeyri-xətti olduğu yerlərdə səlis idarəetmə sisteminin çətinlikləri klassik üsullarla tənzimlənmişdir. KXOK, MOX və İTİX kimi üç məqsəd funksiyasına görə oynaqların faktiki mövqeləri və istənilən təyinat nöqtəsi, simulyasiya zamanı yaranan xətalər, faktiki fırlanma momentləri üzrə alınmış nəticələr müqayisə edilmişdir. Ən yaxşı məqsəd funksiyası olaraq İTİX müəyyən edilmişdir (cədvəl).

#### ƏDƏBİYYAT

1. Darajat, A. U., & Istiqphara, S. Control of two-link robot manipulator with uncertainty parameter using self-tuning sliding mode control // 3rd International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT), Medan, Indonesia, 2020. <https://doi.org/10.1109/mecnit48290.2020.9166643>
2. Kamal M., H. Raheem. Modeling 3-Degree of freedom robotics manipulator with PID and sliding mode controller // AIP Conference Proceedings. Volume 2931, Issue 1, 15 December 2023
3. Massaoudi, F., Elleuch, D. Robust control for a two DOF robot manipulator. // *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, pp.1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/3919864>
4. Anh, H. P. H., Kien, C. V., Son, N. N., & Nam, N. T. New approach of sliding mode control for nonlinear uncertain pneumatic artificial muscle manipulator enhanced with adaptive fuzzy estimator // *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, pp1–11. <https://doi.org/10.1177/1729881418773204>
5. Dhyani, A., Panda, M. K., & Jha, B. Design of an evolving fuzzy-PID controller for optimal trajectory control of a 7-DOF redundant manipulator with prioritized sub-tasks // *Expert Systems with Applications*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113021>
6. Fateh, M. M. On the voltage-based control of robot manipulators // *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 6(5), 2018, pp.702–712. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0035-0>
7. Chung, S. Y. et al. Task space trajectory planning for robot manipulators to follow 3-d curved contours // *Electronics*, 9(9), 2024, pp.14-24. <https://doi.org/10.3390/electronics9091424>
8. Ghaleb, N. M., & Aly, A. A. Modeling and control of 2-DOF robot arm // *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 6(11), 2018, 24–31. <https://www.ijeert.org/papers/v6-i11/3.pdf>
9. Gambhire, S. J., Kishore, D. R., Londhe, P. S., & Pawar, S. N. Review of sliding mode based control techniques for control system applications // *International Journal of Dynamics and Control*, 9(1), 2021, pp.363–378. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00638-7>



10. Huang, J. et al. Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots // *Mechanism and Machine Theory*, 121, 2018, pp.530–544. DOI: 10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2017.11.006  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094114X17302914>
11. Kapoor N., Ohri, J. Sliding Mode Control (SMC) of robot manipulator via intelligent controllers// *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, 98(1), 2017, pp.83–98. <https://doi.org/10.1007/s40031-016-0216-x>
12. Karamali R. et al. Hybrid force/position control of robotic arms manipulating in uncertain environments based on adaptive fuzzy sliding mode control // *Applied Soft Computing*, 70, 2018, pp.864–874.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.05.048>

## ÜÇ SƏRBƏSTLİK DƏRƏCƏLİ ROBOT MANİPULYATOR SİSTEMİ ÜÇÜN OPTİMAL PİD TƏNZİMLƏYİCİSİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

K.A.Məmmədova, Y.N.Əliyeva, A.Ə.Əliyeva, N.G.Bağirova

**Xülasə.** Bu tədqiqat işində optimal PİD tənzimləyicisi əsasında robot manipulyatorunu layihələndirmək üçün dinamik uçan obyektlər alqoritminə əsaslanan optimallaşdırma metodologiyasının tətbiqi və təhlili nəzərdə tutulmuşdur. Robot manipulyatorlarının dinamik təhlili əsasında aktuatorların yaratdığı fırlanma momentləri ilə manipulyatorun mövqeyi və sürəti arasında qarşılıqlı əlaqə araşdırılmışdır. Təklif olunan alqoritmədən alınan optimal PİD tənzimləmə qanunu robot sisteminə tətbiq edilir. Təklif olunan tənzimləyici dəyişən zaman ərzində giriş üçün robotun son effektorunun trayektoriyasını optimallaşdırır və robotu həyacanlandırıcı təsirlərə qarşı möhkəmləndirir. Yüksək adaptivli optimallaşdırma prosesinə nail olmaq üçün faydalılıq funksiyasının düzgün formalaşdırılması optimal həllərə gətirib çıxarır. Robot sistemində idarəetmə parametrlərinin optimallaşdırılması prosesində üç müxtəlif məqsəd funksiyasından istifadə edilmiş və onların nəticələri müqayisə edilmişdir.

Bu işdə, robot manipulyator sistemlərində trayektoriyanın izlənməsi üçün yeni sazlama metodologiyası təqdim edilmişdir. Təklif olunan PİD tənzimləmə qanunundan istifadə etməklə optimal fayda əldə edilmişdir. Alınan nəticələr qənaətbəxş və rəqabətliyədir. Müəyyən olunmuşdur ki, robot sisteminin yüksək qeyri-xətti olduğu yerlərdə yaranan səliss idarəetmə sistemi çətinlikləri klassik üsullarla tənzimlənir.

**Açar sözlər:** PİD tənzimləyici, idarəetmə sistemləri, robot manipulyatorlar, trayektoriyanın optimallaşdırılması.

*Accepted: 04.04.2024*