

Анализ целесообразности применения дробно-степенных регуляторов в системе управления параллельным роботом

С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов, Р.С. Бородин

СТИ НИТУ «МИСИС», Старый Оскол

Аннотация: В рамках проведенного исследования была рассмотрена задача управления роботом параллельной структуры. В настоящей работе приведена модель плоского параллельного робота типа 3-RPR в пакете Matlab, разработанная для проведения вычислительных экспериментов. Проведено моделирование отработки двух типов траекторий движения с целью определения оптимальной структуры регуляторов положения приводного шарнира, используемых в системе управления роботом. Сравнению подвергались шесть структур регуляторов: три классических: ПД, ПИД, ПДД и три их дробно-степенных аналога: FOPD, FOPID, FOPDD. Для моделирования дробно-степенных регуляторов использовалось инструментальное средство FOMCON. Наилучшие результаты для робота типа 3-RPR показала система управления с FOPID регулятором, что свидетельствует о целесообразности применения для управления параллельными роботами дробно-степенных регуляторов.

Ключевые слова: параллельный робот, обратная задача кинематики, 3-RPR-робот, вычислительный эксперимент, отработка траектории движения, точность системы управления, дробно-степенной регулятор, параметрическая оптимизация регулятора, сравнительное моделирование, инструментальное средство FOMCON.

Наблюдающийся в настоящее время рост научного интереса к проблеме управления роботами-манипуляторами [1, 2] вызван все более широким их применением. Современные роботы с параллельной кинематикой представляют собой класс манипуляторов, обеспечивающих высокую скорость и точность позиционирования. В отличие от последовательных роботов такие устройства имеют в своем составе несколько параллельных кинематических цепей, связывающих его рабочий орган с неподвижным основанием, что придает их конструкции дополнительную жесткость.

Параллельные роботы находят сегодня применение в различных отраслях промышленности. Еще большему их распространению препятствует в первую очередь повышенная в сравнении с последовательными сложность алгоритма управления [3, 4]. Поэтому

совершенствование систем управления параллельными роботами представляет собой актуальную задачу.

Сложность управления объясняется сложностью структуры робота, благодаря которой положение его рабочего органа в большинстве случаев нелинейно зависит от состояния всех кинематических цепей. Кроме того, в ходе управления необходимо избегать попадания робота в особые (сингулярные) положения [5], где он теряет управляемость.

При этом благодаря конструктивной жесткости параллельных роботов для управления положением рабочего органа (или подвижной платформы) в большинстве случаев достаточно организовать расчет по специальным формулам и синхронное регулирование входных координат механизма (положений поворотных приводных шарниров или длин штанг, определяемых положением приводных призматических шарниров). Поэтому важнейшей задачей управления параллельным роботом является выбор типа и параметров управляющих устройств в подсистемах регулирования входных координат.

В настоящем исследовании выбор и оптимизация параметров регуляторов проводились для плоского параллельного робота типа 3-RPR (рис. 1).

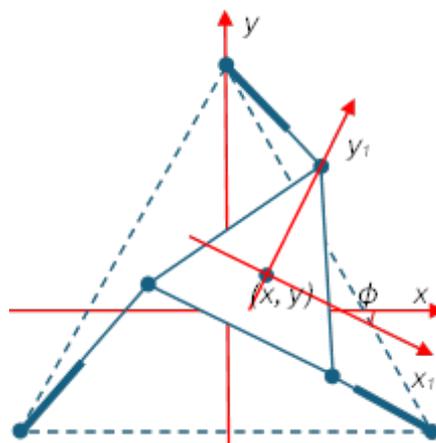


Рис. 1. – Топология плоского параллельного робота типа 3-RPR

Подвижная платформа робота [6] представляет собой равносторонний треугольник (меньший из двух на рис. 1) с поворотными шарнирами в его вершинах. С их помощью к платформе крепятся штанги, длина которых L_1 , L_2 , L_3 может изменяться благодаря наличию приводных призматических шарниров. Противоположный конец каждой штанги в точках, соответствующих вершинам равностороннего треугольника (большой на рис. 1), прикрепляется поворотным шарниром к неподвижному основанию. Оси вращения всех поворотных шарниров перпендикулярны плоскости основания.

Для проведения моделирования в среде Matlab Simulink была разработана структурная схема робота типа 3-RPR, представленная на рис. 2. Содержимое подсистем LEG-4, LEG-5 и LEG-6 одинаково (раскрыто в правой части рисунка).

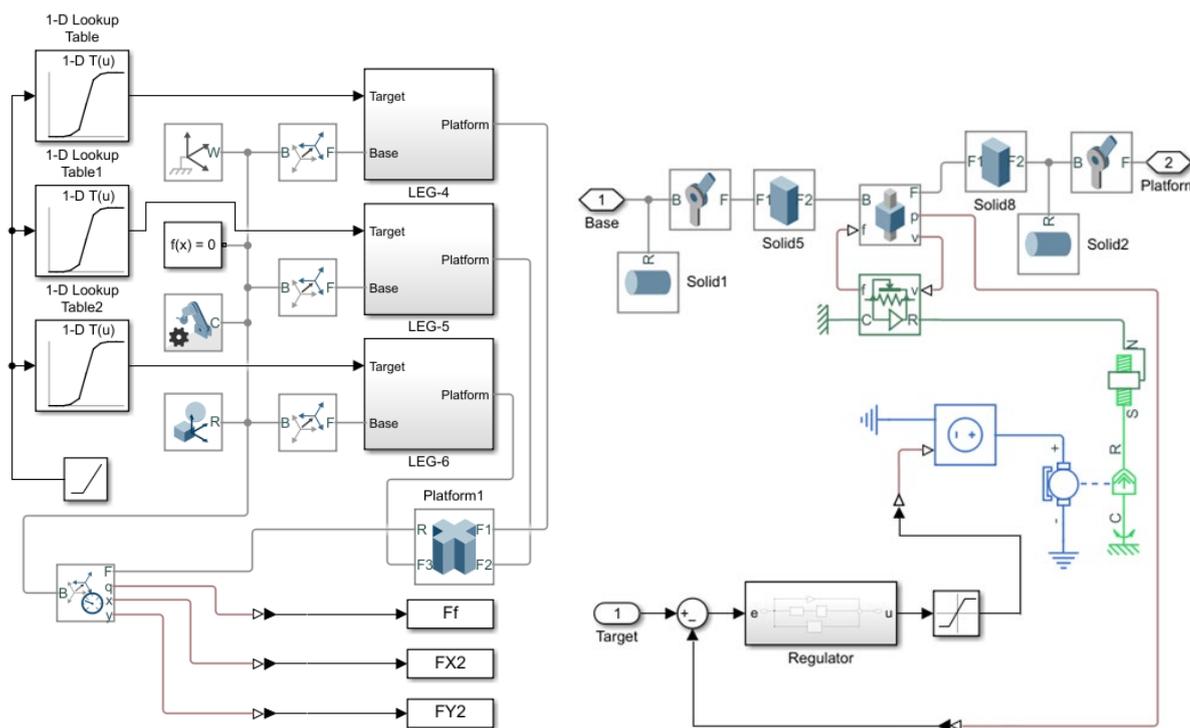


Рис. 2. – Схема структуры робота типа 3-RPR в Matlab

В ходе управления роботом состояние призматических шарниров изменяется благодаря функционированию трех независимых контуров

регулирования длин штанг. Схема системы управления плоским параллельным роботом [7], представлена на рис. 3.

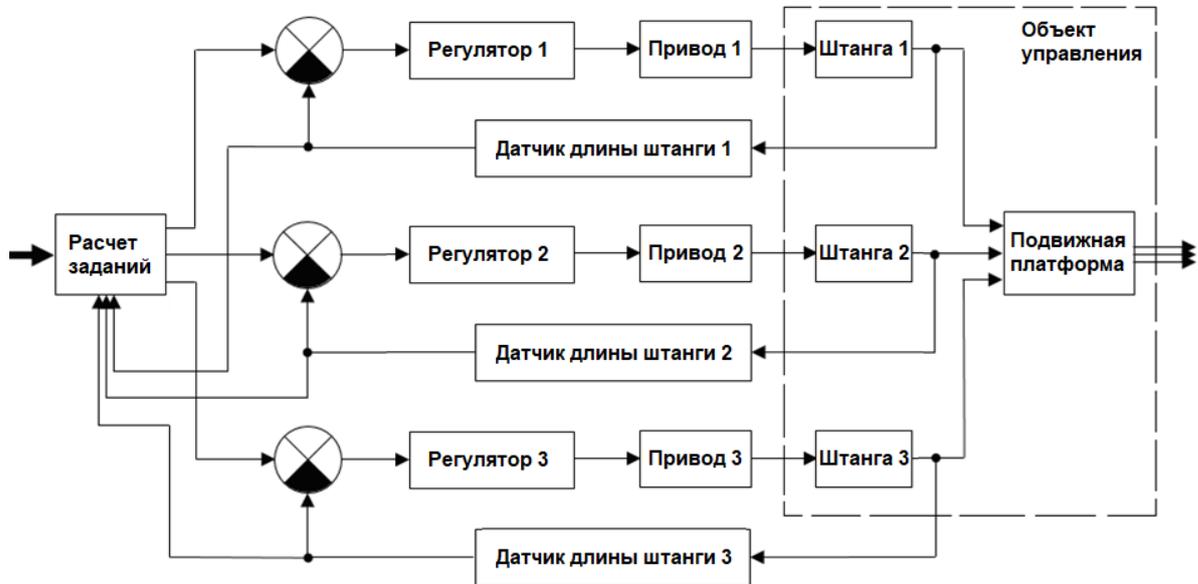


Рис. 3. – Система управления плоскопараллельным роботом

На вход системы управления подается траектория движения центра подвижной платформы. В блоке расчета заданий используются формулы для решения обратной задачи кинематического анализа (при моделировании расчет выполняется заблаговременно [5, 7]):

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \sqrt{\left(x + \frac{r}{2}(\sin \varphi - \sqrt{3} \cos \varphi) + \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y - \frac{r}{2}(\sqrt{3} \sin \varphi + \cos \varphi) + \frac{R}{2}\right)^2}, \\
 L_2 &= \sqrt{\left(x + \frac{r}{2}(\sin \varphi + \sqrt{3} \cos \varphi) - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left(y + \frac{r}{2}(\sqrt{3} \sin \varphi - \cos \varphi) + \frac{R}{2}\right)^2}, \\
 L_3 &= \sqrt{(x - r \sin \varphi)^2 + (y + r \cos \varphi - R)^2},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y – координаты центра подвижной платформы в системе, связанной с неподвижным основанием, φ – угол поворота подвижной платформы (угол между координатными осями x и x_1), R и r – радиусы окружностей, описанных около треугольников, образованных точками крепления поворотных шарниров к неподвижному основанию и подвижной платформе соответственно.

Рассогласования между заданиями и фактическими значениями длин штанг поступают в регуляторы каждого из контуров. Управляющие воздействия передаются на приводы призматических шарниров, что приводит к изменению положения подвижной платформы. Сигналы с датчиков длин штанг используются в качестве сигналов обратной связи и служат для контроля прохождения точек траектории.

В контурах регулирования длины объекты управления являются астатическими, поскольку скорость изменения длины штанги определяется величиной управляющего воздействия. Поэтому для управления параллельными роботами традиционно используют ПД-регуляторы.

С другой стороны, в работе [8] описан опыт успешного применения для управления параллельным роботом дробно-степенного (Fractional Order PID, FOPID) регулятора:

$$W_p(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\mu}, \quad (2)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального каналов соответственно, λ – степень интегрирования, μ – степень дифференцирования, $0 \leq \lambda, \mu \leq 1$. Увеличение числа параметров регулятора, с одной стороны, усложняет его оптимизацию, с другой – повышает гибкость настройки [9, 10].

Сравним в рамках настоящей работы результаты вычислительных экспериментов, предусматривающих применение классических и дробно-степенных регуляторов для управления роботом типа 3-RPR при отработке различных траекторий.

Задачей исследования являлось сравнение точности классических регуляторов (ПИД и ПД) с точностью регуляторов, использующих дробно-степенной закон регулирования (FOPID и FOPD, т.е. FOPID с нулевым K_i , дробный аналог ПД-регулятора). Регуляторы были реализованы в среде Matlab Simulink на основе инструментального средства FOMCON [11].

Настройка коэффициентов регуляторов проведена путем оптимизации целевой функции:

$$f(t) = \int_0^t (e_x(t))^2 + (e_y(t))^2 dt \quad (3)$$

где e_x, e_y – динамические ошибки по координатам x и y .

Вначале для отработки регулятором была предложена простая круговая траектория (рис. 4).

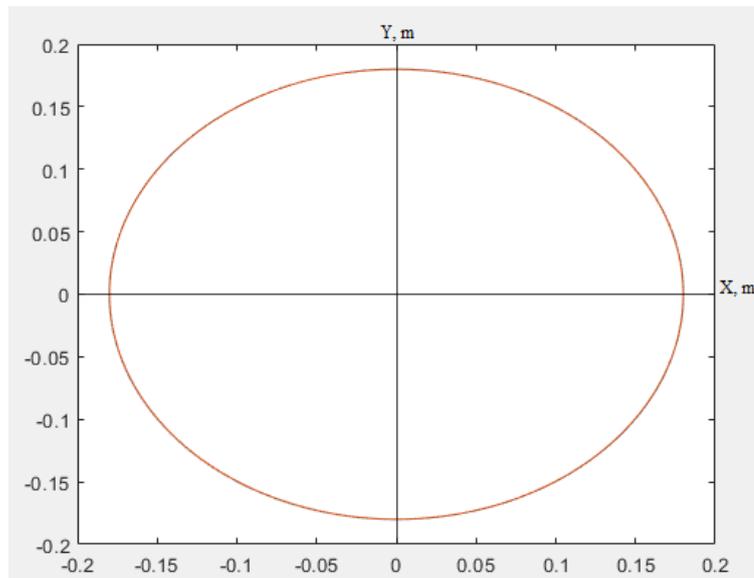


Рис. 4. – Круговая траектория

Результаты оптимизации параметров и работы системы с различными регуляторами представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры регуляторов и точность отработки круговой траектории

Регулятор	K_p	K_i	K_d	λ	μ	$f(t), *10^{-6}$
ПД	370	0	31.5	0	1	1.9249
FOPD	586	0	257	0	1.247	0.4751
ПИД	239	52.6	32.0	1	1	0.2850
FOPID	228	244	292	0.927	1.247	0.1176

Анализ показывает, что регуляторы ПИД и FOPID дают меньший интеграл квадрата ошибки, т.е. интегральный канал системе полезен. Наименьшее значение $f(t)$ оказалась у FOPID регулятора.

Следует также отметить, что в ходе оптимизации параметр μ вышел за обозначенные выше пределы. Это может свидетельствовать о целесообразности использования в системе ПДД-регулятора или его дробно-степенного аналога FOPDD:

$$W_p(s) = K_p + K_d s^\mu + K_{d2} s^{1+\mu_2}, \quad (4)$$

Результаты соответствующих экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры регуляторов ПДД и FOPDD и точность отработки круговой траектории

Регулятор	K_p	K_d	K_{d2}	μ	μ_2	$f(t), *10^{-6}$
ПДД	644	673	132	1	1	0.2977
FOPDD	648	694	148	0.311	0.897	0.1810

Анализ показывает, что регуляторы ПДД и FOPDD дают меньшее значение $f(t)$, чем ПД и FOPD соответственно, т.е. двойное дифференцирование также полезно системе. При этом наименьший интеграл квадрата ошибки по-прежнему у FOPID регулятора. На рис. 5 показаны графики квадрата динамической ошибки для всех регуляторов на круговой траектории.

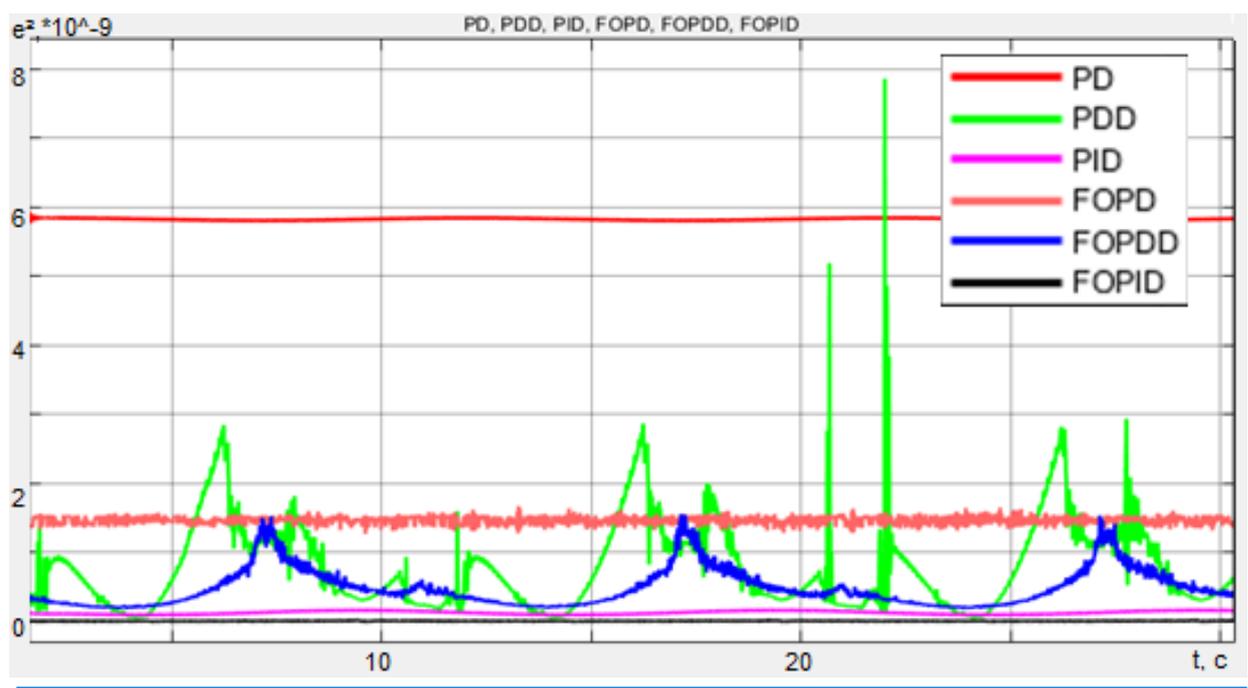


Рис. 5. – Квадрат динамической ошибки для регуляторов
 на круговой траектории

На следующем этапе все 6 регуляторов обрабатывали более сложную траекторию (рис. 6, табл. 3).

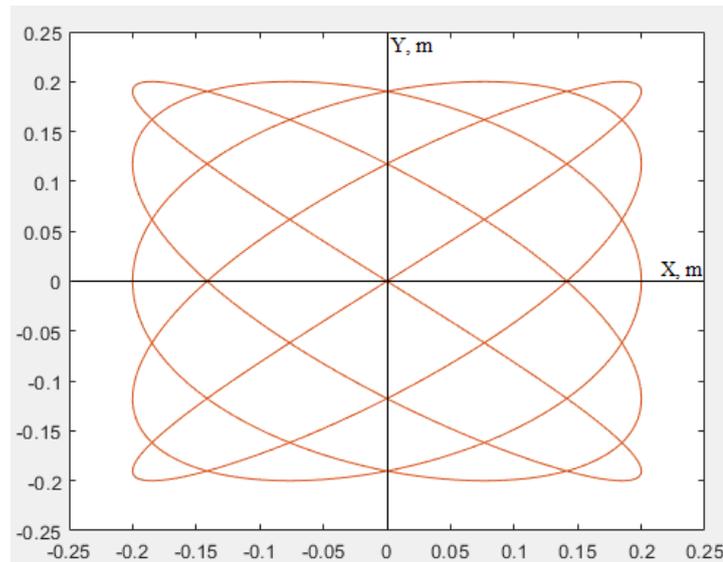


Рис. 6. – Траектория в виде фигуры Лиссажу

Таблица 3

Точность отрисовки роботом фигуры Лиссажу

Регулятор	K_p	K_i/K_{d2}	K_d	μ	λ/μ_2	$f(t), *10^{-6}$
ПД	446	0	58.0	1	0	19.2723
FOPD	468	0	163	1.175	0	10.0421
ПДД	693	36.0	590	1	1	7.2158
FOPDD	700	228	694	0.291	0.457	2.7559
ПИД	129	101	252	1	1	0.5024
FOPID	234	217	272	1.213	0.839	0.2681

По данным табл. 3 можно заметить, что при обработке траектории в виде фигуры Лиссажу регуляторы по величине $f(t)$ расположились в том же порядке.

Здесь разрыв между лучшим (FOPID) и худшим (ПД) регуляторами стал еще заметнее. Как и ранее, в парах «классический – соответствующий дробно-степенной регулятор» лучшими везде оказались дробно-степенные.

На рис. 7 показаны графики квадрата динамической ошибки для всех регуляторов при отработке траектории в виде фигуры Лиссажу.

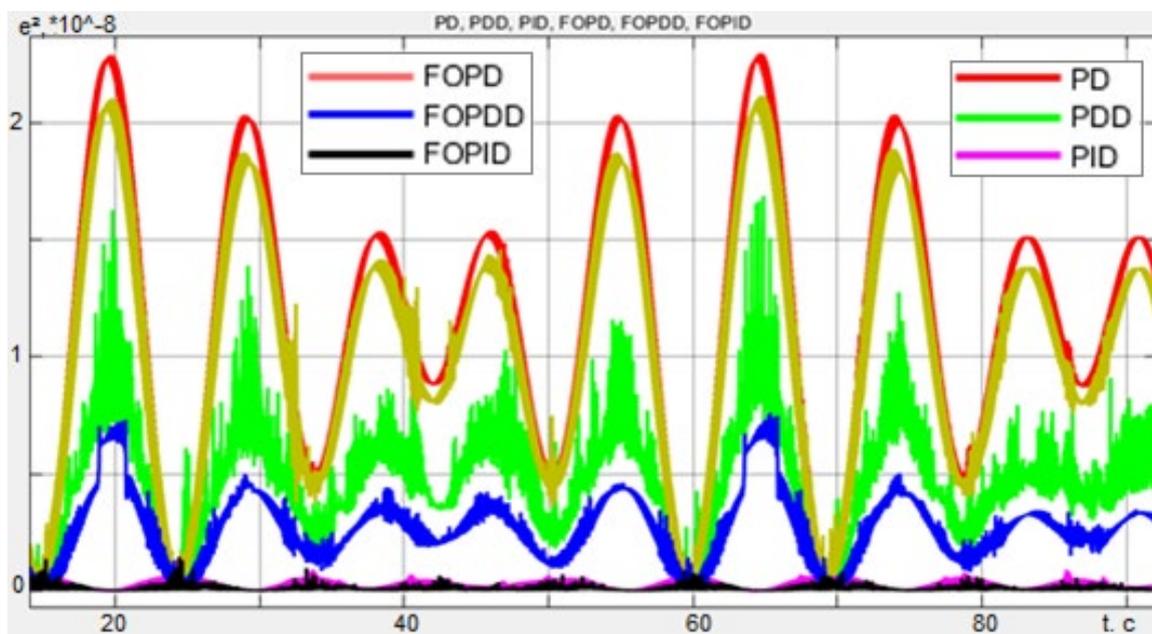


Рис. 7. – Квадрат динамической ошибки для регуляторов на траектории в виде фигуры Лиссажу

В ходе проведенного исследования выполнялась оптимизация коэффициентов классических и дробно-степенных регуляторов для системы управления плоским параллельным роботом типа 3-RPR.

Эксперименты по отработке различных траекторий показали, что точность дробно-степенных регуляторов при их применении к параллельным роботам выше точности их классических аналогов. При управлении роботом типа 3-RPR целесообразно использовать дробно-степенной ПИД (FOPID) регулятор.

Литература

1. Маршаков Д.В., Цветкова О.Л., Айдинян А.Р. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора // Инженерный вестник Дона. 2011. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504.
2. Абузов А.В., Зинкевич А.В., Мартынов А.А. Разработка цифрового

двойника роботизированного манипулятора // Инженерный вестник Дона. 2024. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9445.

3. Azar A.T., Zhu Q., Khamis A., Zhao D. Control design approaches for parallel robot manipulators: a review // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2017. Vol. 28. No. 3. pp. 199-211.

4. Chiaverini S., Sciavicco L. The parallel approach to force/position control of robotic manipulators // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993. Vol. 9. No. 4. pp. 361- 373.

5. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Gaponenko E.V. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol.327(4). № 042092.

6. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Malyshev D.I. Optimization of the trajectory of movement of a parallel robot based on a modified ACO algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560 (1). № 012036.

7. Khalapyan S., Rybak L., Malyshev D. Two-Stage Method for Controlling the Movement of a Parallel Robot Based on a Planar Three-Revolute-Prismatic-Revolute Mechanism // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1126. pp. 368-379.

8. Al-Mayyahi A., Aldair A.A., Chatwin C. Control of a 3-RRR Planar Parallel Robot Using Fractional Order PID Controller // International Journal of Automation and Computing. 2020. Vol. 17. No. 6. pp. 822-836.

9. Padula F., Visioli F. Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers // Journal of Process Control. 2011. Vol. 21. No. 1. pp. 69-81.

10. Жмудь В.А., Заворин А.Н. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления // Автоматика и программная инженерия. 2013. №1(3). С. 30-36.

11. Лысова Н. В., Мясникова Н. В. Применение регуляторов с дробными степенями для регулирования параметров технологических процессов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. № 8(4). URL: moitvvt.ru/ru/journal/article?id=876.

References

1. Marshakov D.V., Tsvetkova O.L., Aydinyan A.R. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504.
2. Abuzov A.V., Zinkevich A.V., Martynov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9445.
3. Azar A.T., Zhu Q., Khamis A., Zhao D. International Journal of Modelling, Identification and Control. 2017. Vol. 28. No. 3. pp. 199-211.
4. Chiaverini S., Sciavicco L. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993. Vol. 9. No. 4. pp. 361- 373.
5. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Gaponenko E.V. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol.327(4). № 042092.
6. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Malyshev D.I. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560(1). № 012036.
7. Khalapyan S., Rybak L., Malyshev D. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1126. pp. 368-379.
8. Al-Mayyahi A., Aldair A.A., Chatwin C. International Journal of Automation and Computing. 2020. Vol. 17. No. 6. pp. 822-836.
9. Padula F., Visioli F. Journal of Process Control. 2011. Vol. 21. No. 1. pp. 69-81.
10. Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Automatics & Software Engineering. 2013. No. 1(3). pp. 30-36.
11. Lysova N.V., Myasnikova N.V. Modeling, optimization and information technology. 2020. No. 8(4). URL: moitvvt.ru/ru/journal/article?id=876.

Дата поступления: 18.11.2024 Дата публикации: 3.01.2025
