

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.865.8

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185004>

EDN: <https://www.elibrary.ru/NGDREK>



Управление траекторией движения робота-манипулятора с использованием интеллектуальных методов и предотвращением сингулярностей

Мохаммад Ясин Альвардат^{1✉}, Хасан Мохаммед Ал-Аражи²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Технологический университет, Багдад, Ирак

¹ moh.alwardat@yahoo.com[✉]

² hassana@mail.ru

Аннотация. Наличие сингулярностей в роботизированных манипуляторах создает значительные трудности в обеспечении стабильности, отслеживания траекторий и точности управления, что может привести к потере управляемости и снижению производительности. В данной статье рассматриваются управление траекторией и реализация передовых интеллектуальных методов управления для предотвращения сингулярных конфигураций в манипуляторах с шестью степенями свободы. Используются пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) управление, управление на основе нечеткой логики (НЛУ) и гибридный подход, сочетающий НЛУ и ПИД. Гибридный контроллер НЛУ-ПИД разработан для динамической адаптации параметров управления в реальном времени на основе определения близости к сингулярностям, что повышает способность манипулятора выполнять задачи с высокой точностью и надежностью. Результаты моделирования и сравнительного анализа показывают, что при использовании НЛУ-ПИД средние ошибки отслеживания уменьшаются на 60%, стабильность системы возрастает на 80%, а энергоэффективность повышается на 20% в условиях, порождающих возникновение сингулярности.

Ключевые слова: манипулятор, предотвращение сингулярностей, оптимизация траекторий, интеллектуальное управление, ПИД-управление, управление на основе нечеткой логики, гибридное управление НЛУ-ПИД

Для цитирования: Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Управление траекторией движения робота-манипулятора с использованием интеллектуальных методов и предотвращением сингулярностей // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 182–195. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185004>

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Optimized Robot Control: A Comparative Study of PID, Fuzzy Logic, and Hybrid FLC-PID Techniques

Mohammad Yasin Alwardat^{1✉}, Hassan Mohammed Alwan²

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St.Petersburg, Russian Federation

² University of Technology, Baghdad, Iraq

¹ moh.alwardat@yahoo.com[✉]

² hassana@mail.ru

Abstract

This study addresses the critical challenge of singularity avoidance in robotic manipulators with six degrees of freedom by proposing an advanced intelligent control framework that integrates trajectory optimization with robust control strategies. The paper explores the adverse effects of singular configurations—conditions under which the manipulator loses degrees of freedom and control precision—and presents a comprehensive analysis of methods to mitigate these issues. The research primarily compares three control techniques: classical Proportional-Integral-Derivative (PID) control, Fuzzy Logic Control (FLC), and a novel hybrid FLC-PID approach, each evaluated through detailed simulation studies.

The article begins by reviewing the fundamental concepts of robotic kinematics, emphasizing the importance of both forward and inverse kinematics in determining the position and orientation of the manipulator's end-effector. It further elaborates on the derivation and role of the Jacobian matrix, which is crucial for relating joint velocities to end-effector motions and serves as the basis for singularity analysis. When the Jacobian becomes singular (its determinant approaches zero or its rank decreases), the manipulator's ability to execute precise movements is compromised, potentially leading to instability and increased tracking errors.

To overcome these challenges, the study investigates various control strategies. The conventional PID controller is noted for its simplicity and effectiveness in managing system dynamics; however, its performance degrades near singular configurations due to the inability to adapt to rapid system nonlinearities. FLC, on the other hand, introduces a degree of adaptability by employing a set of linguistic rules that handle uncertainties and non-linearities in real time, thereby improving the smoothness of the trajectory tracking. The proposed hybrid FLC-PID controller merges the stability of PID control with the adaptive capabilities of fuzzy logic, dynamically adjusting its parameters based on the proximity to singular regions.

Simulation results demonstrate that the hybrid FLC-PID controller significantly outperforms the standalone methods. Quantitative analysis reveals that the hybrid approach reduces average tracking errors by approximately 60% compared to the PID controller, enhances overall system stability by 80%, and improves energy efficiency by 20% under conditions prone to singularity. These improvements are supported by comparative graphs, detailed performance tables, and extensive modeling that illustrate the robustness and precision of the proposed system.

In conclusion, the article establishes that the hybrid FLC-PID strategy not only mitigates the detrimental effects of singularities but also optimizes trajectory tracking, rendering it highly suitable for practical applications in dynamic and complex robotic environments. The findings suggest that integrating intelligent control methods with traditional approaches can substantially elevate the performance and reliability of robotic manipulators in industrial, medical, and autonomous systems.

Keywords: Manipulator, Singularity Avoidance, Trajectory optimization, Intelligent control, PID control, Fuzzy logic control, Hybrid FLC-PID

For citation: Alwardat M.Y., Alwan H.M. Optimized Robot Control: A Comparative Study of PID, Fuzzy Logic, and Hybrid FLC-PID Techniques. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):182-195. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185004>

List of Figures

- Fig. 1. Block diagram of the robot-manipulator control algorithm
 Fig. 2. Robot manipulator diagram
 Fig. 3. Manipulator kinematic diagram
 Fig. 4. Jacobian Matrix determinant (singularity detection)
 Fig. 5. Jacobian determinant impact on control performance
 Fig. 6. PID-controller structural diagram
 Fig. 7. Trajectory tracking in the form of the figure-of-eight (a) and circular form (b) by the PID-controller
 Fig. 8. Tracking error comparison both with and without PID-controller and without PID-controller
 Fig. 9. Block diagram of the FLC-controller
 Fig. 10. Membership functions for the error (E), and error variation (ΔE)
 Fig. 11. Membership functions for velocity
 Fig. 12. Trajectory tracking in the form of the figure-of-eight (a) and circular form (b) by the FLC-controller
 Fig. 13. Tracking error comparison both with and without the FLC-controller
 Fig. 14. The FLC–PID-controller block diagram
 Fig. 15. Trajectory tracking in the form of the figure-of-eight (a) and circular form (b) by the hybrid FLC–PID-controller
 Fig. 16. Tracking error comparison both with and without hybrid FLC–PID controller
 Fig. 17. Trajectory comparison for all controllers in the form of the figure-of-eight (a) and circular form (b)
 Fig. 18. Control action comparison of various controllers
 Fig. 19. Tracking error comparison for all controllers
 Fig. 20. Comparison of the FLC, PID-, and Hybrid FLC–PID Responses

List of Tables

- Table 1. Literature review on the singularity analysis problem
 Table 2. Comparative table of performance
 Table 3. Parameters of controllers

Введение

Современные робототехнические системы, включая манипуляторы с несколькими степенями свободы, играют важную роль в промышленности и научных исследованиях благодаря своей способности выполнять сложные задачи с высокой точностью [1]. Однако одной из ключевых проблем, связанных с управлением такими системами, является возникновение сингулярностей, которые могут привести к потере управляемости манипулятора и снижению его функциональности [2]. Для решения данной проблемы разработаны различные методы, включая оптимизацию траекторий и интеллектуальные методы управления, такие как нечеткая логика, нейронные сети и алгоритмы оптимизации [3, 4].

В данной статье представлен подход к управлению траекториями и предотвращению сингулярностей в манипуляторах с шестью степенями свободы с использованием интеллектуальных методов управления. Мы анализируем существующие методы, включая нечеткую логику, ПИД-контроллер, гибридные системы НЛУ-ПИД, проводя их сравнительную оценку. Целью исследования является разработка надежной стратегии управления, которая минимизирует влияние сингулярностей и обеспечивает высокую производительность системы.

Статья состоит из разделов, охватывающих основные аспекты исследования. В разделе «Обзор литературы» анализируются существующие подходы к управлению манипуляторами и предотвращению сингулярностей. Раздел «Блок-схема» иллюстрирует методологию исследования. В разделе «Кинематический анализ» рассматриваются прямая и обратная кинематика, а также матрица Якоби. В разделе «Анализ сингулярностей» объясняются математические основы их возникновения. В разделе «Стратегии управления» обсуждаются три подхода: ПИД-контроль, управление на основе нечеткой логики и гибридный подход НЛУ–ПИД.

Обзор литературы

Обзор литературы по проблеме анализа сингулярности робота-манипулятора и оптимизации траекторий представлен в табл.1, содержащей ключевые результаты и используемые методы исследований, а также отражающей основные подходы, применяемые в современных исследованиях, с акцентом на использование интеллектуальных методов управления.

В результате анализа установлено, что интеллектуальные методы управления, такие как нечеткая логика, адаптивные нейронные сети и алгоритмы оптимизации, оказываются наиболее перспективными для предотвращения сингулярностей и оптимизации работы манипуляторов.

Таблица 1. Обзор литературы по проблеме анализа сингулярности

Номер в списке источников	Метод	Рассматриваемые аспекты	Результаты и выводы
5	Анализ сингулярностей и планирование траектории их избегания	Промышленные роботы	Эффективное планирование траекторий с избеганием сингулярностей улучшило надежность роботизированной системы
6	Оптимальное Fuzzy-FOPID и Fuzzy-PID управление	Отслеживание траектории робота-манипулятора с 3-я степенями свободы (3DOF)	Контроллер Fuzzy-FOPID показал наилучшую точность и устойчивость отслеживания по сравнению с другими методами
7	Муравьиная оптимизация (ACO- ПИД и Fuzzy-PID)	Управление роботом для реабилитации верхних конечностей	Повышенная точность отслеживания траектории при использовании Fuzzy-PID с алгоритмом ACO по сравнению с традиционным ПИД
8	Дробный нечеткий контроллер с оптимизацией GWO-ABC	Улучшение отслеживания траектории робота	Улучшение точности отслеживания траектории за счет гибридного дробного нечеткого контроллера, оптимизированного алгоритмом GWO-ABC
9	Сравнение контроллеров Fuzzy-PID, Fuzzy Logic и ПИД	Управление автономным роботом	Контроллеры Fuzzy-PID показали лучшие результаты по сравнению с обычными контроллерами ПИД и Fuzzy Logic
10	Оптимизация и метод сокращенного порядка для Fuzzy-PID	Оптимизация проектирования контроллеров	Улучшенная устойчивость и снижение вычислительной сложности для роботизированных систем
11	Сравнение контроллеров ПИД и Fuzzy Logic	Управление позиционированием двухзвенного робота-манипулятора	Нечеткие контроллеры продемонстрировали лучшую точность и устойчивость по сравнению с ПИД
12	ПИД -контроллер с метаэвристической оптимизацией	Управление гибридными роботами	Улучшенная эффективность ПИД-контроллеров с помощью метаэвристических алгоритмов оптимизации
13	Оптимизация контроллера на основе нечеткой логики	Отслеживание траектории мобильного робота	Оптимальная настройка параметров нечеткого контроллера значительно повысила точность отслеживания траектории
14	Нелинейный контроллер второго типа Fuzzy FOPID	Интегральные критерии производительности	Нечеткие контроллеры второго типа (Type-2) FOPID обеспечили более высокую устойчивость и уменьшение ошибки в стационарном состоянии
15	ПИД -оптимизация функций принадлежности для нечеткого управления	Управление роботами-манипуляторами	Использование данных ПИД значительно улучшило производительность и надежность нечеткого управления роботами-манипуляторами

Блок-схема

Предлагаемая система управления роботами-манипуляторами решает задачу точного позиционирования и предотвращения сингулярностей с использованием современных методов управления. Алгоритм включает вычисление обратной кинематики, анализ матрицы Якоби для выявления сингулярностей и внедрение стратегий их избегания, таких как корректировка конфигурации сочленений. Для минимизации ошибок применяются адаптивные контроллеры ПИД, НЛУ или их гибридные модели. Постоянное обновление углов сочленений и контроль через прямое кинематическое модели-

рование обеспечивают высокую точность управления и надежность работы манипулятора в сложных (рис. 1).

Кинематический анализ

Кинематическому анализу подвергаются кинематические характеристики манипулятора, включая прямую и обратную кинематику [16]. Прямой кинематический анализ используется для определения положения и ориентации рабочего органа манипулятора на основе заданных углов сочленений. Обратный кинематический анализ позволяет вычислить углы сочленений,

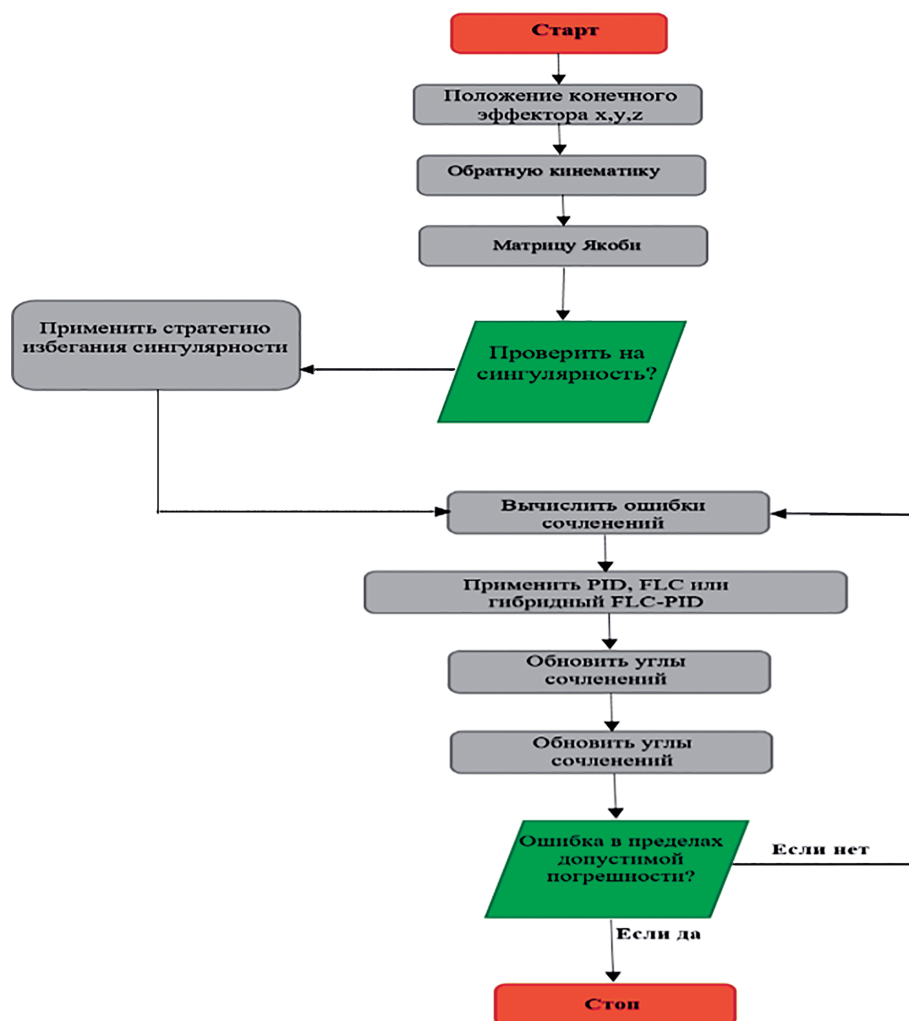


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления роботом-манипулятором

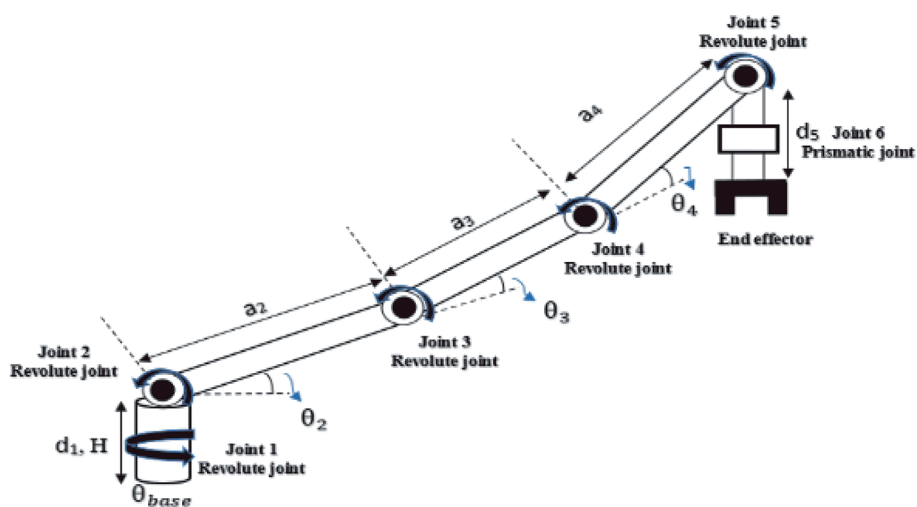


Рис. 2. Схема робота-манипулятора

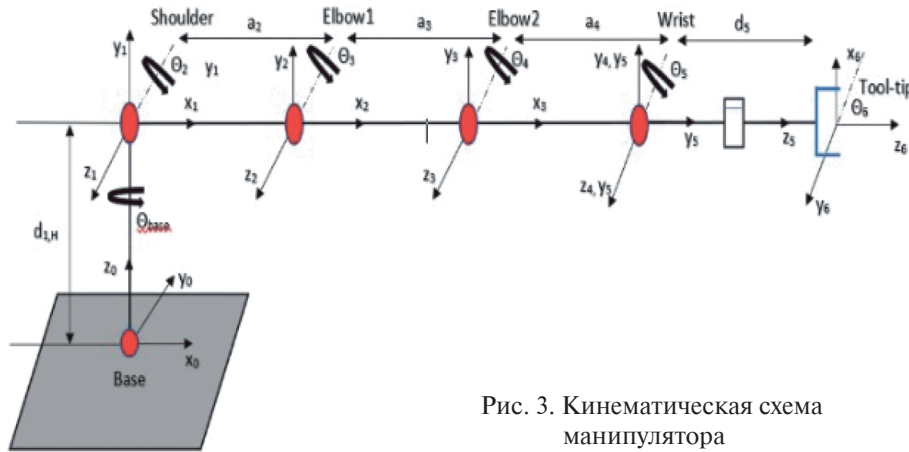


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора

необходимые для достижения заданной конечной точки.

Манипулятор имеет пять звеньев (d_1, a_2, a_3, a_4, d_5), пять углов ($\theta_{base}, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$) и одно призматическое сочленение (рис. 2). На рис. 3 показаны геометрические параметры и обозначения.

Прямая кинематика

При прямом кинематическом анализе углы сочленения используются для определения положения и ориентации рабочего органа путем их подстановки в однородную матрицу преобразования между сочленениями i и $i + 1$ [17]:

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\alpha_i} & \alpha_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} s_{\alpha_i} & \alpha_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Итоговая матрица поворота получается в результате умножения матриц поворота, соответствующих отдельным звеньям:

$$T_6^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В общей матрице преобразования T_6^0 (*)

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} s_6 s_{base} + c_{2345} c_6 c_{base} & s_{base} c_6 - c_{2345} s_6 c_{base} & c_1 s_{2345} & p_x \\ c_{2345} s_{base} c_6 - c_{base} s_6 & -c_{base} c_6 - c_{2345} s_6 s_{base} & s_1 s_{2345} & p_y \\ s_{2345} c_6 & -s_{2345} s_6 & -c_{2345} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (*)$$

$$p_x = c_{base} (a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} + d_5 s_{2345}); \quad (3)$$

$$p_y = s_{base} (a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} + d_5 s_{2345}); \quad (4)$$

$$p_z = d_1 + a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 c_{234} - d_5 c_{2345}, \quad (5)$$

где p_x, p_y, p_z представляют положение, а $\{(n_x, o_x, a_x), (n_y, o_y, a_y), (n_z, o_z, a_z)\}$ — ориентацию рабочего органа.

Обратная кинематика

Обратная кинематика манипулятора позволяет вычислить углы сочленений для достижения заданной позиции и ориентации рабочего органа [18].

Определение базового угла:

$$\theta_{base} = \text{atan2}(WC_y, WC_x). \quad (6)$$

Угол θ_3 рассчитывается через закон косинусов:

$$\cos \theta_3 = \frac{a^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}. \quad (7)$$

Угол θ_2 рассчитывается как

$$\varnothing = \text{atan2}(s, r);$$

$$\theta_2 = \varnothing - a_3 \sin(\theta_3), a_2 + \cos(\theta_3). \quad (8)$$

Длина призматического сочленения

$$d_5 = \sqrt{(p_x - WC_x)^2 + (p_y - WC_y)^2 + (p_z - WC_z)^2}. \quad (9)$$

Матрица ориентации рабочего органа R_6^0 представляется через промежуточные матрицы:

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1} R_6^0 = (R_3^0)^T R_6^0.$$

Параметры ориентации вычисляются из матрицы R_6^3 :

$$R_6^3 = R_{x,y,z} = R_{x,\emptyset} R_{y,\emptyset} R_{z,\emptyset} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix};$$

$$\theta_4 = \arctan2(R_{32}, R_{31}); \quad (10)$$

$$\theta_5 = \arccos(R_6^3(2, 2)); \quad (11)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(R_6^3(3, 2), R_6^3(3, 1)). \quad (12)$$

Матрица Якоби

Матрица Якоби выражает зависимости между скоростями сочленений и движением рабочего органа, позволяя определять скорости и силы в системе. Якобиан также используется для выявления сингулярностей, что обеспечивает основу для разработки эффективных стратегий управления манипулятором. Итоговая матрица Якоби манипулятора с угловой и линейной составляющими примет вид [4, 19]:

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_1(q) & J_2(q) & \dots & J_n(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{v1}(q) & J_{v2}(q) & \dots & J_{vn}(q) \\ J_{\omega1}(q) & J_{\omega2}(q) & \dots & J_{\omega n}(q) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Тогда Якобиан манипулятора можно выразить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ 0 & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ 0 & s_{base} & s_{base} & s_{base} & s_{base} & 0 \\ 0 & -c_{base} & -c_{base} & -c_{base} & -c_{base} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix};$$

$$J_{11} = -s_{base}(a_2 c_2 + a_3 c_{23} + a_4 c_{234} + d_5 s_{2345});$$

$$J_{12} = -c_{base}(a_2 s_2 + a_3 s_{23} + a_4 s_{234} + d_5 c_{2345});$$

$$J_{13} = -c_{base}(a_3 s_{23} - d_5 c_{2345} + a_4 s_{234});$$

$$J_{14} = -c_{base}(d_5 c_{2345} - a_4 s_{234});$$

$$J_{15} = \frac{d_5 [c_{base2345} + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base})]}{2};$$

$$J_{16} = s_{2345} c_{base}; \quad J_{35} = d_5 s_{2345}; \quad J_{36} = -c_{2345};$$

$$J_{21} = c_{base}(d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_4 c_{234});$$

$$J_{22} = -s_{base}(a_3 c_{23} - d_5 s_{2345} + a_2 s_2 + a_4 s_{234});$$

$$J_{23} = -s_{base}(a_3 c_{23} - d_5 s_{2345} + a_4 s_{234});$$

$$J_{24} = s_{base}(d_5 s_{2345} - a_4 s_{234}); \quad J_{2,6} = s_{2345} s_{base};$$

$$J_{25} = \frac{d_5 [s_{base2345} - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base})]}{2};$$

$$J_{32} = d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + a_4 c_{234};$$

$$J_{33} = d_5 s_{2345} + a_3 c_{23} + a_4 c_{234};$$

$$J_{34} = d_5 s_{2345} + a_4 c_{234}.$$

Анализ сингулярностей

Анализ сингулярностей выявляет состояния манипулятора, при которых матрица Якоби становится вырожденной, приводя к потере управляемости. Это происходит, когда определитель Якобиана равен нулю или его ранг снижается. Такой анализ необходим для разработки стратегий избегания сингулярностей и повышения эффективности управления [20].

Для анализа сингулярности робота-манипулятора применим вычисление определителей матрицы. Сингулярность возникает, когда:

1. Определитель матрицы Якоби равен нулю: $\det(J)=0$;

2. Ранг матрицы Якоби меньше 6 (для систем с полной степенью свободы).

На рис. 4 и 5 представлены зависимости, отражающие изменение значений определителя матрицы Якоби в процессе работы манипулятора и их влияние на точность позиционирования.

Стратегии управления для предотвращения сингулярности

Исследуются и обсуждаются передовые стратегии управления, повышающие его эффективность и предотвращающие сингулярность в робототехнических системах. Особое внимание уделяется трем типам контроллеров: пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД), управлению на основе нечеткой логики НЛУ и гибридному подходу, сочетающему НЛУ с ПИД. Анализируются теоретические основы каждой стратегии, детали реализации и эффективность в предотвращении сингулярности.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный контроллер

ПИД-контроллер является одной из наиболее широко используемых техник управления в робототехнике благодаря его простоте и эффективности управления динамическими системами [21]. Подход к предотвращению сингулярности с использованием ПИД-контроллера включает в себя точную настройку трех основных параметров: коэффициента пропорционального усиления K_p , коэффициента интегрального усиления K_i и коэффициента дифференциального усиления K_d (рис. 6). Эти параметры

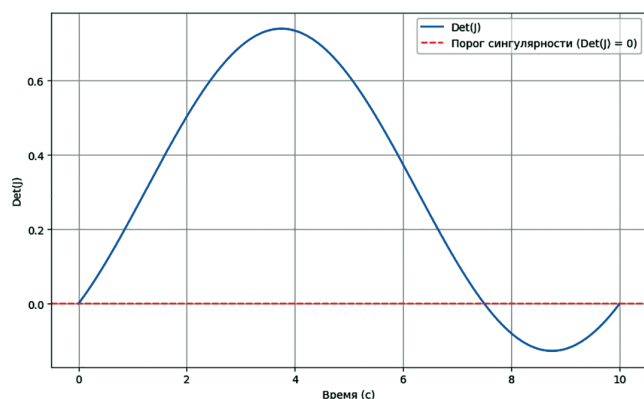


Рис. 4. Определитель матрицы Якоби (определение сингулярности)

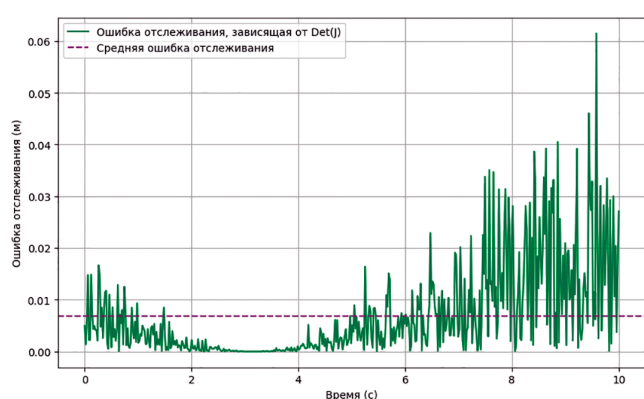


Рис. 5. Влияние определителя матрицы Якоби на эффективность управления

помогают регулировать отклик системы в реальном времени, повышая стабильность и уменьшая колебания, даже вблизи сингулярных конфигураций.

ПИД-контроллер работает на основе ошибки $e(t)$, которая определяется как разница между желаемым выходом $r(t)$ и фактическим выходом $y(t)$. Управляющее воздействие $u(t)$ вычисляется следующим образом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (14)$$

где K_p – коэффициент пропорционального усиления, определяющий силу реакции на текущую ошибку; K_i – коэффициент интегрального усиления, компенсирующий накопленные прошлые

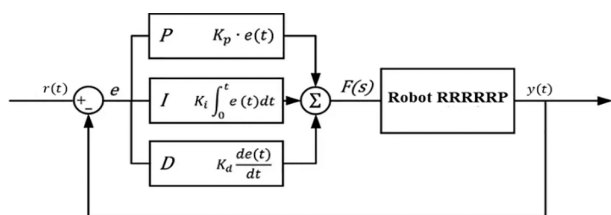


Рис. 6. Структурная схема ПИД-контроллера

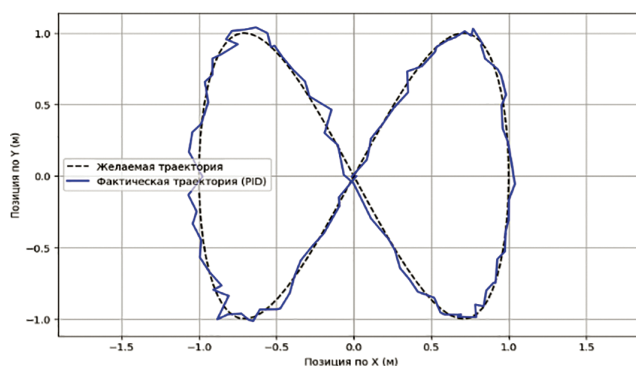
ошибки для устранения постоянного смещения; K_d – коэффициент дифференциального усиления, предсказывающий тенденции будущих ошибок для уменьшения перерегулирования и колебаний.

ПИД-контроллеры обычно используются для коррекции отклонений от желаемой траектории, чтобы предотвратить приближение к сингулярной точке. Дифференциальный член помогает смягчать внезапные изменения скорости, которые могут возникать вблизи сингулярностей, в то время как интегральный член помогает компенсировать накопленные ошибки положения.

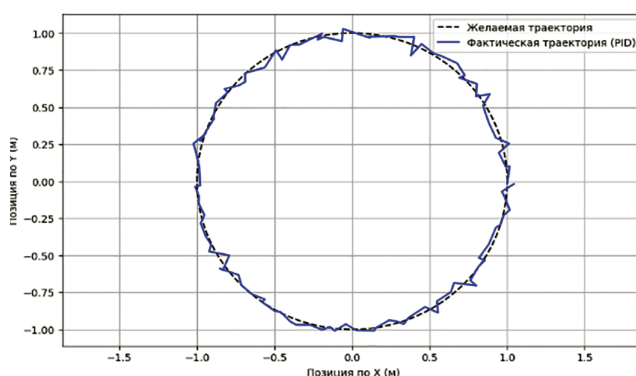
Результаты моделирования с помощью ПИД-контроллера представлены на рис. 7 и 8.

Нечеткое логическое управление (НЛУ)

НЛУ представляет собой стратегию управления, основанную на принципах нечеткой логики, что позволяет эффективно работать в условиях неопределенности и нелинейности, характерных для робототехнических систем [21]. Основное преимущество НЛУ заключается в его способности адаптироваться к динамическим изменениям системы, не требуя точной математической модели. На рис. 9 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ и отображает его основные элементы.



а



б

Рис. 7. Отслеживание траектории в форме восьмерки (а) и круговой (б) с использованием ПИД-контроллера

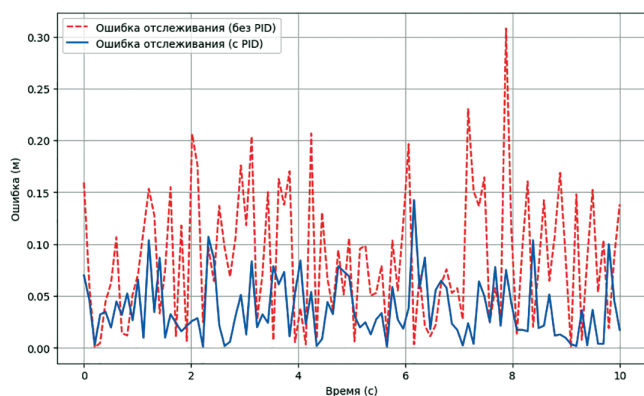


Рис. 8. Сравнение ошибки отслеживания с ПИД-контроллером и без него

В рамках данного подхода нечеткая логика используется для адаптивного управления манипулятором. Для НЛУ было определено 25 правил, которые учитывают текущую ошибку и изменение ошибки для корректировки управляющих воздействий. Этот метод продемонстрировал высокую точность и плавность движений.

Графики функций принадлежности для системы управления НЛУ представлены ниже. Рис. 10,а показывает степень принадлежности для различных уровней ошибки (от большой отрицательной до большой положительной). Рис. 10,б отображает изменение ошибки (ΔE): показывает, как изменение ошибки классифицируется (от большой отрицательной до большой положительной). Рис. 11 демонстрирует коррекцию выходной скорости на основе правил нечеткой логики.



Рис. 9. Структурная схема НЛУ-контроллера

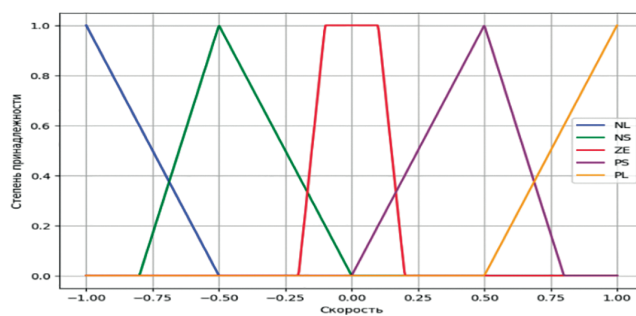
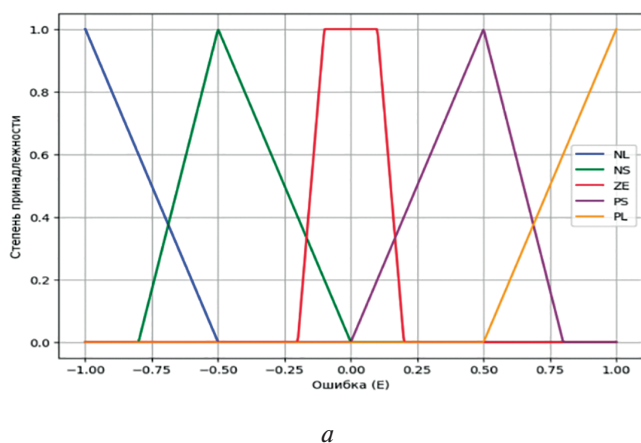


Рис. 11. Функции принадлежности для скорости

Результаты моделирования с помощью НЛУ-контроля представлены на рис. 12 и 13.

Гибридный контроллер НЛУ-ПИД

Гибридное управление НЛУ-ПИД представляет собой объединение преимуществ классического ПИД-контроллера и нечеткой логики управления. Этот подход позволяет обеспечить высокую точность, устойчивость и адаптивность при управлении робототехническими системами, особенно в сложных динамических условиях и при приближении к сингулярным положениям. На рис. 14 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ-ПИД и отображает его основные элементы.

Гибридный контроллер сочетает преимущества ПИД и НЛУ, благодаря чему достигаются высокая точность и стабильность управления. ПИД обеспечивает базовый уровень стабильности, а НЛУ добавляет адаптивные свойства для эффективной работы в условиях нелинейностей и сингулярностей. Параметры гибридного контроллера были настроены следующим образом: $K_p = 1,8$, $K_i = 0,9$, $K_d = 0,4$, при этом использовались 25 правил для нечеткой логики.

Результаты моделирования с помощью гибридного контроллера НЛУ-ПИД представлены на рис. 15 и 16.

Сравнение производительности контроллеров представлено на рис. 17–20.

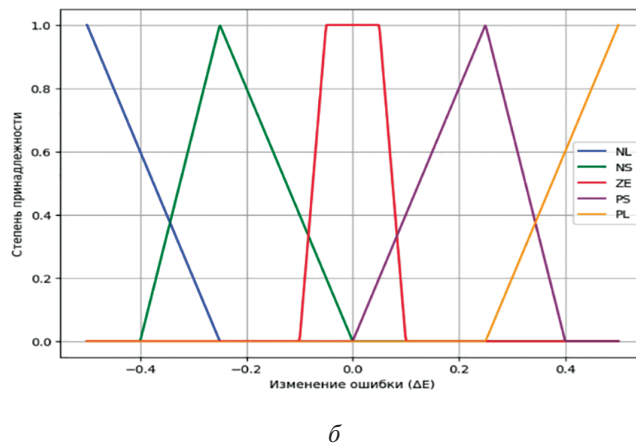
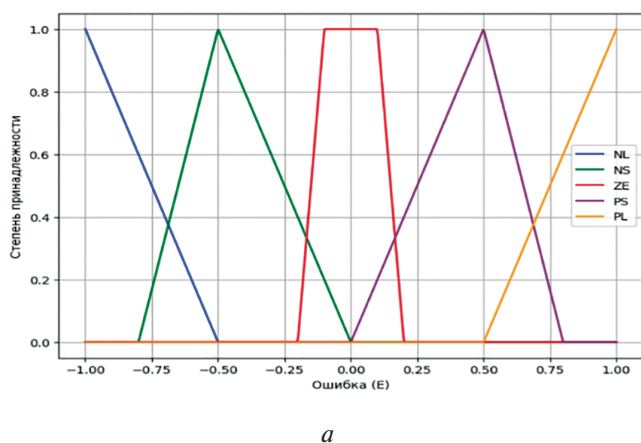
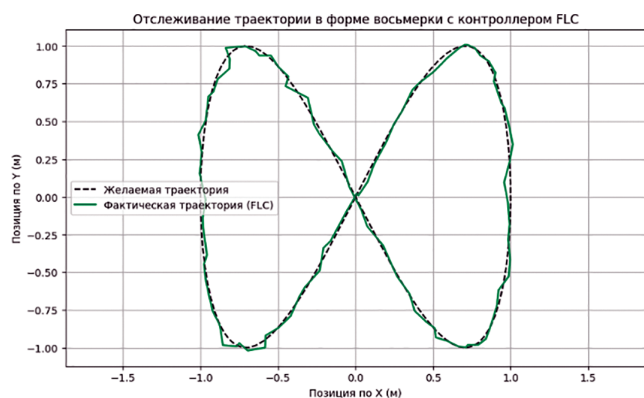
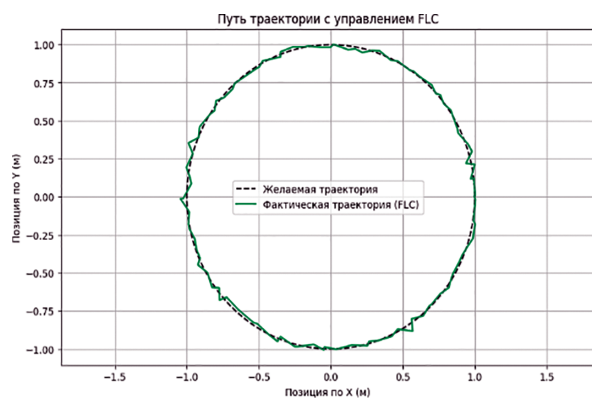


Рис. 10. Функции принадлежности: а — для ошибки (E); б — для изменения ошибки (ΔE)

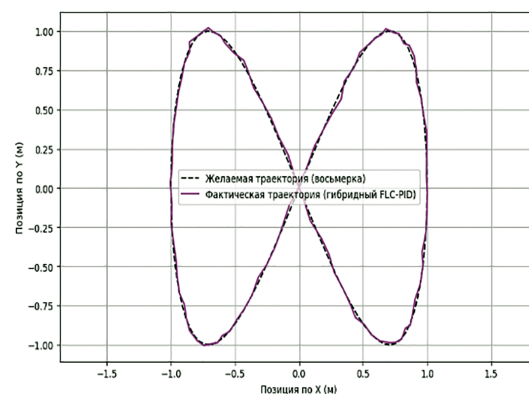


а

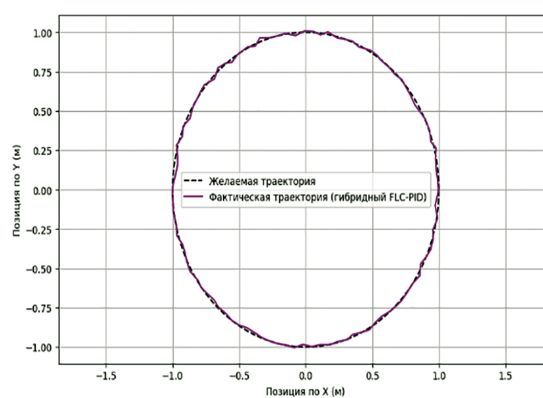


б

Рис. 12. Отслеживание траектории в форме восьмерки (а) и круговой (б) с использованием НЛУ-контроллера



а



б

Рис. 15. Отслеживание траектории в форме восьмерки (а) и круговой (б) с использованием гибридного контроллера НЛУ-ПИД

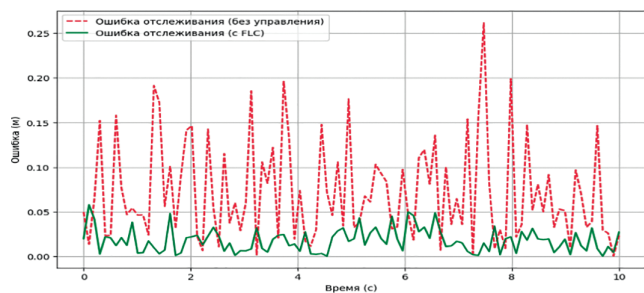


Рис. 13. Сравнение ошибки отслеживания с НЛУ-контроллером и без него

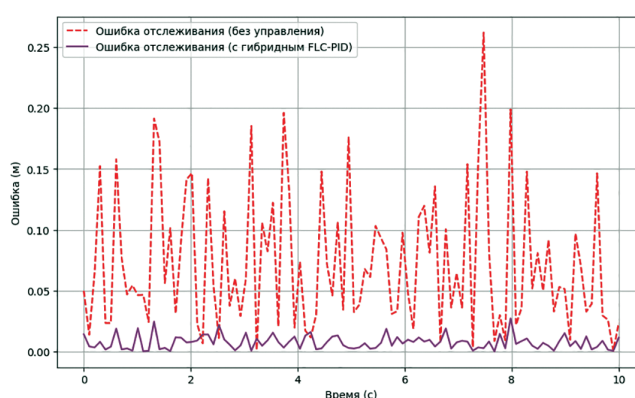


Рис. 16. Сравнение ошибки отслеживания с гибридным контроллером НЛУ-ПИД и без него

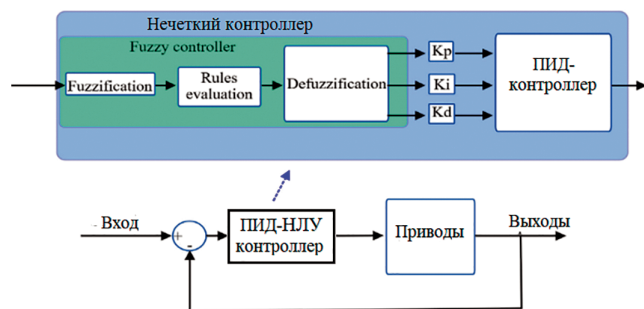


Рис. 14. Структурная схема контроллера НЛУ-ПИД

В табл. 2 приведены показатели производительности контроллеров ПИД, НЛУ и гибридного НЛУ-ПИД. У гибридного НЛУ-ПИД наилучшие результаты по точности, плавности управления и энергозатратам. В табл. 3 приведены параметры настройки контроллеров.

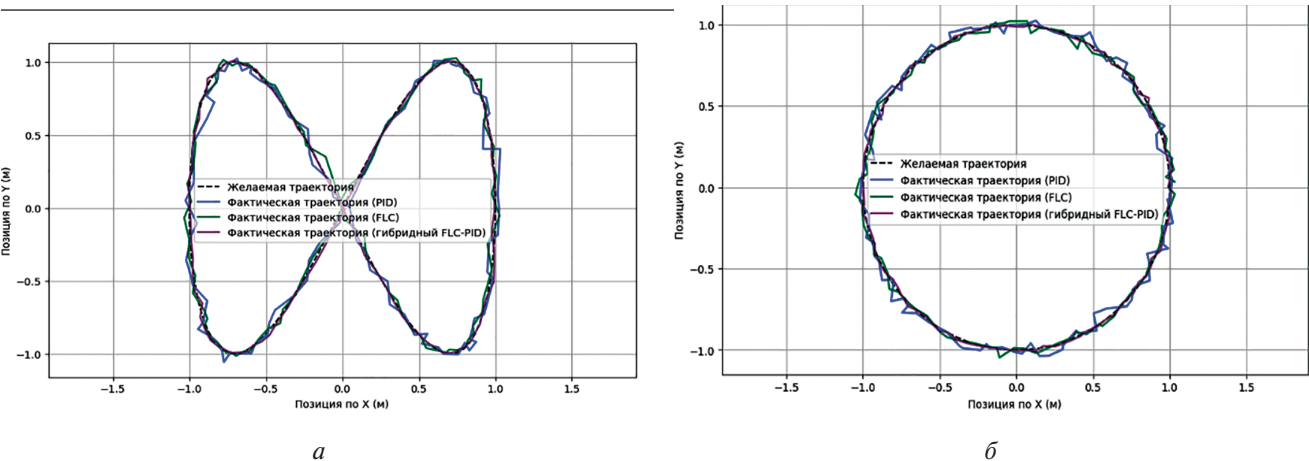


Рис. 17. Сравнение для всех контроллеров траекторий в форме восьмерки (а) и круговой (б)

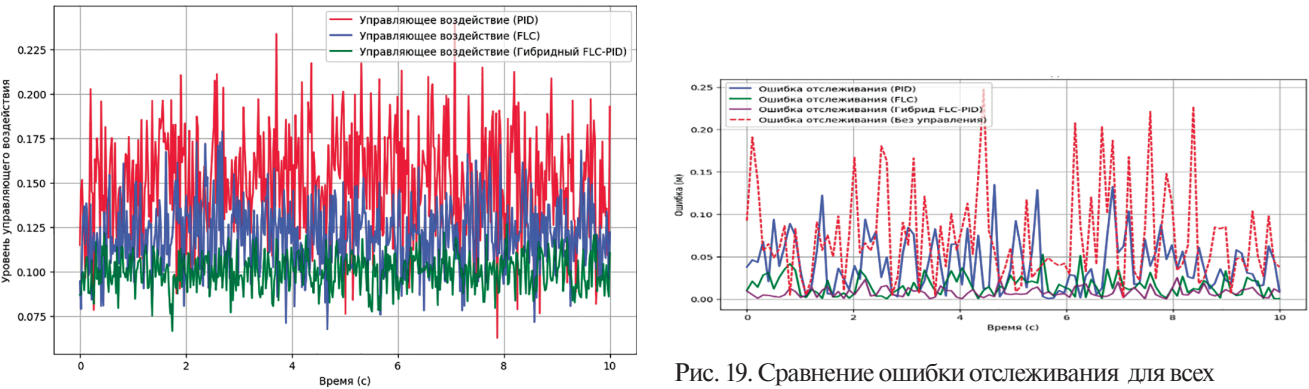


Рис. 18. Сравнение управляющих воздействий разных контроллеров

Рис. 19. Сравнение ошибки отслеживания для всех контроллеров

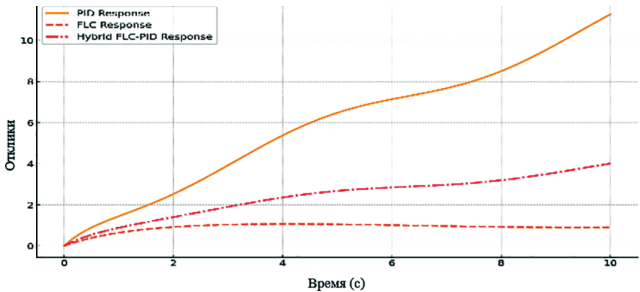


Рис. 20. Сравнение откликов НЛУ-, ПИД- и гибридного НЛУ-ПИД-контроллеров

Таблица 2. Сравнительная таблица производительности

Метрика	ПИД	НЛУ	Гибридный НЛУ-ПИД
Средняя ошибка отслеживания	0,08 м	0,04 м	0,02 м
Максимальная ошибка отслеживания	0,2 м	0,1 м	0,05 м
Средняя скорость сустава	2,5 рад/с	1,8 рад/с	1,5 рад/с
Максимальная скорость сустава	3,2 рад/с	2,4 рад/с	2,0 рад/с
Среднее ускорение сустава	0,08 рад/с ²	0,06 рад/с ²	0,05 рад/с ²
Максимальное ускорение сустава	0,15 рад/с ²	0,10 рад/с ²	0,08 рад/с ²
Потребляемая энергия	25 Дж	23 Дж	20 Дж
Эффективность отслеживания траектории	85%	92%	97%

Таблица 3. Параметры контроллеров

Метрика	ПИД	НЛУ	Гибридный НЛУ-ПИД
Kp	2,0	—	1,8
Ki	1,0	—	0,9
Kd	0,5	—	0,4
Число правил	—	25	25
Весовые коэффициенты	—	Настраиваемые	Настраиваемые
Адаптация	Нет	Да	Да
Преимущества	Уменьшается ошибка установившегося режима	Адаптируется к нелинейностям	Высокая точность

Обсуждение результатов

- Гибридный контроллер НЛУ-ПИД значительно превосходит традиционный ПИД-контроллер и стандартный НЛУ по точности отслеживания.
- Средняя ошибка отслеживания для НЛУ-ПИД составила всего 0.02 м, что на 60% меньше, чем у ПИД, и на 33% меньше, чем у НЛУ. Это объясняется комбинацией адаптивности НЛУ и стабильности ПИД, что позволяет эффективно справляться с нелинейностями и динамическими изменениями.
- Гибридный контроллер НЛУ-ПИД показал наивысшую эффективность отслеживания траектории (97%) по сравнению с контроллерами НЛУ (92%) и ПИД (85%). Улучшение показателей производительности достигается благодаря сочетанию адаптивности нечеткой логики и стабильности ПИД. Это подтверждает преимущество гибридного подхода при решении задач точного позиционирования робота.

Выводы

Результаты исследования подтверждают, что метод, основанный на использовании гибридного контроллера НЛУ-ПИД, превосходит традиционные методы управления, такие как ПИД и НЛУ, по всем основным показателям производительности. Этот подход минимизирует ошибки отслеживания (средняя ошибка 0,02 м), обеспечивает плавность движения и высокую энергоэффективность, что делает его надежным методом для предотвращения сингулярностей в роботизированных манипуляторах. Гибкость и адаптивность гибридного контроллера позволяют эффективно работать в условиях высокой динамичности и нелинейности системы. Представленный метод демонстрирует высокую точность и стабильность, что подтверждает его практическую применимость для управления роботизированными системами с повышенными требованиями к точности, надежности и энергоэффективности.

Список источников

1. Donelan P.S. Singularities of Robot Manipulators // Singularity Theory and its Applications. 2007, pp. 189–217. DOI: 10.1142/9789812707499_0006
2. Asgari M., Bonev I.A., Gosselin C. Singularities of ABB’s YuMi 7-DOF Robot Arm // Mechanism and Machine Theory. 2025. Vol. 205. No. 2: 105884. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884
3. Slim M., Rokbani N., Neji B., et al. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning // Robotics. 2023. Vol. 12. No. 2:38. DOI: 10.3390/robotics12020038
4. Almarkhi A.A., Maciejewski A.A. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure // 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (29–31 July 2019; Prague, Czech Republic). SciTePress; 2019. Vol. 2, pp. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049
5. Zhao H., Zhang B., Yin X., et al. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots // China Automation Congress (22–24 October 2021; Beijing, China). DOI: 10.1109/CAC53003.2021.9727497
6. Shatnan W.A., Almalawae M.D.H., Jabur M.A.A.L.A. Optimal Fuzzy-FOPID, Fuzzy-PID Control Schemes for Trajectory Tracking of 3DOF Robot Manipulator // Tikrit Journal of Engineering Sciences. 2023. Vol. 30. No. 4, pp. 46–53. DOI: 10.25130/tjes.30.4.6
7. Mirrashid N., Alibeiki E., Rakhtala S.M. Development and Control of an Upper Limb Rehabilitation Robot via Ant Colony Optimization-PID and Fuzzy-PID Controllers // International Journal of Engineering. 2022. Vol. 35. No. 08, pp. 1488–1493. DOI: 10.5829/ije.2022.35.08b.04
8. Gaidhane P.J., Adam S. The Enhanced Robotic Trajectory Tracking by Optimized Fractional-Order Fuzzy Controller Using GWO-ABC Algorithm // In book: Kumar R., Ahn C.W., Sharma T.K. et al. (eds) Soft Computing: Theories and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 425. Springer, Singapore; 2022, pp. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55

9. Mac T.T., Thanh N.C., Cuong N.C., et al. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot // In: Long B.T., Kim Y.H., Ishizaki K. et al. (eds) Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham; 2021. pp. 1033–1040. DOI: 10.1007/978-3-030-69610-8_136
10. Kovvuru A.K., Dewangan P.D. Design of Fuzzy-PID Controller Using Optimization Technique Based Reduced Order Modelling // 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (15-17 June 2023; Shillong, India). DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513
11. Maniha N., Ghani N.M.A., Othman A., et al. Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators // Journal of Intelligent Systems and Control. 2023. Vol. 2. No. 4, pp. 183–196. DOI: 10.56578/jisc020401
12. Aly R.H.M., Rahouma K.H., Hussein A.I. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots // 20th Learning and Technology Conference (26-26 January 2023; Jeddah, Saudi Arabia), pp. 85-90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348
13. Tolossa T.D., Gunasekaran M., Halder K., et al. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters // Robotica. 2024. Vol. 42. No. 8, pp. 2801 – 2824. DOI: 10.1017/S0263574724001140
14. Al-Momani M.M., Al-Mbaideen A., Al-Odienat A.I., et al. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM // IEEE Access. 2023. Vol. 11, pp. 53439 – 53467. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3279862
15. Chotikunnan P., Chotikunnan R., Nirapai A. et al. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques // Journal of Robotics and Control. 2023. Vol. 4. No. 2, pp. 128-140. DOI: 10.18196/jrc.v4i2.18108
16. Kreutz-Delgado K., Long M., Seraji H. Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators // International Journal of Robotics Research. 1992. Vol. 11. No. 5, pp. 469–481. DOI: 10.1177/027836499201100504
17. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Forward and Inverse Kinematics of a 6-DOF Robotic Manipulator with a Prismatic Joint Using MATLAB Robotics Toolbox // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2024. Vol. 11. No. 117, pp. 1097–1111. DOI: 10.19101/ijatee.2024.111100210
18. Alwardat M.Y., Alwan H.M., Kochneva O.V. Comprehensive Kinematic Analysis for Optimal Performance of a 6-DOF Robotic Manipulator with Prismatic Joint (RRRRRP) // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44. No. 11, pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691
19. Альвардат М.Я., Ал-Аражди Х.М.А., Мболо О.Э.-Л. Геометрический вывод Якобиана для шести степеней свободы с призматическим сочленением // Робототехника и техническая кибернетика. 2024. Т. 12. № 4. С. 261-269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403
20. Альвардат М.Я., Мболо О.Э.-Л., Кочнева О.В. и др. Исследование сингулярности роботов-манипуляторов // Автоматизация и современные технологии. 2024. № 4. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179
21. Альвардат М.Я., Мболо О.Э.-Л., Черненькая Л.В. и др. Обзор интеллектуальных методов управления манипуляторами с жесткими звеньями // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77. № 10. С. 466–474. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474

References

1. Donelan PS. Singularities of Robot Manipulators. *Singularity Theory and its Applications*. 2007:189–217. DOI: 10.1142/9789812707499_0006
2. Asgari M, Bonev IA, Gosselin C. Singularities of ABB's YuMi 7-DOF Robot Arm. *Mechanism and Machine Theory*. 2025;205(2):105884. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884
3. Slim M, Rokbani N, Neji B, et al. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning. *Robotics*. 2023;12(2):38. DOI: 10.3390/robotics12020038
4. Almarkhi AA, Maciejewski AA. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure. *16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (July 29-31, 2019; Prague, Czech Republic)*. SciTePress; 2019. Vol. 2. p. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049
5. Zhao H, Zhang B, Yin X, et al. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots. *China Automation Congress (October 22-24, 2021; Beijing, China)*. DOI: 10.1109/CAC53003.2021.9727497
6. Shatnan WA, Almawlawe MDH, Jabur MAALA. Optimal Fuzzy-FOPID, Fuzzy-PID Control Schemes for Trajectory Tracking of 3DOF Robot Manipulator. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2023;30(4):46–53. DOI: 10.25130/tjes.30.4.6
7. Mirrashid N, Alibeiki E, Rakhtala SM. Development and Control of an Upper Limb Rehabilitation Robot via Ant Colony Optimization-PID and Fuzzy-PID Controllers. *International Journal of Engineering*. 2022;35(08):1488–1493. DOI: 10.5829/ije.2022.35.08b.04
8. Gaidhane PJ, Adam S. The Enhanced Robotic Trajectory Tracking by Optimized Fractional-Order Fuzzy Controller Using GWO-ABC Algorithm. In book: Kumar R, Ahn CW, Sharma TK, et al. (eds) *Soft Computing: Theories and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 425. Springer, Singapore; 2022. p. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55

9. Mac TT, Thanh NC, Cuong NC, et al. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot. In: Long BT, Kim YH, Ishizaki K, et al. (eds) *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham; 2021. p. 1033–1040. DOI: 10.1007/978-3-030-69610-8_136
10. Kovvuru AK, Dewangan PD. Design of Fuzzy-PID Controller Using Optimization Technique Based Reduced Order Modelling. *5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (June 15-17, 2023; Shillong, India)*. DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513
11. Maniha N, Ghani NM., Othman A, et al. Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators. *Journal of Intelligent Systems and Control*. 2023;2(4):183–196. DOI: 10.56578/jisc020401
12. Aly RHM, Rahouma KH, Hussein AI. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots. *20th Learning and Technology Conference (January 26-26, 2023; Jeddah, Saudi Arabia)*. p. 85-90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348
13. Tolossa TD, Gunasekaran M, Halder K, et al. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters. *Robotica*. 2024;42(8):2801–2824. DOI: 10.1017/S0263574724001140
14. Al-Momani MM, Al-Mbaideen A, Al-Odienat AI, et al. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM. *IEEE Access*. 2023;11:53439–53467. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3279862
15. Chotikunnan P, Chotikunnan R, Nirapai A, et al. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques. *Journal of Robotics and Control*. 2023;4(2):128–140. DOI: 10.18196/jrc.v4i2.18108
16. Kreutz-Delgado K, Long M, Seraji H. Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators. *International Journal of Robotics Research*. 1992;11(5):469–481. DOI: 10.1177/027836499201100504
17. Alwardat MY, Alwan HM. Forward and Inverse Kinematics of a 6-DOF Robotic Manipulator with a Prismatic Joint Using MATLAB Robotics Toolbox. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2024;11(117):1097–1111. DOI: 10.19101/ijatee.2024.111100210
18. Alwardat MY, Alwan HM, Kochneva OV. Comprehensive Kinematic Analysis for Optimal Performance of a 6-DOF Robotic Manipulator with Prismatic Joint (RRRRRP). *Russian Engineering Research*. 2024;44(11):1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691
19. Alwardat MYa, Alwan HM, M'bolo OE-L. Geometric Derivation of the Jacobian for Six Degrees of Freedom with Prismatic Joint. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024;12(4):261–269. (In Russ.). DOI: 10.31776/rtcj.12403
20. Alwardat MYa, M'bolo OE-L, Kochneva OV, et al. Research of the Robot-Manipulators Singularity. *Automation. Modern Technologies*. 2024(4):173–179. (In Russ.). DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179
21. Alwardat MYa, M'bolo OE-L, Chernenkaya L. Review of intelligent control methods for manipulators with rigid links. *Automation. Modern Technologies*. 2023;77(10):466–474. (In Russ.). DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474

Статья поступила в редакцию / Received 18.03.2025
 Одобрена после рецензирования / Revised 24.03.2025
 Принята к публикации / Accepted 09.04.2025