

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128

^{1,*}Альвардат М.Я., ²Ал-Аражди Х.М.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого²Технологический университет, Багдад, Ирак

*E-mail: moh.alwardat@yahoo.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА С ПРЕДОТВРАЩЕНИЕМ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ

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 рассматривается 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 близости к сингулярностям, что улучшает способность манипулятора выполнять задачи с высокой точностью и надежностью. Результаты моделирования и сравнительного анализа показывают, что при использовании НЛУ-ПИД средние ошибки отслеживания снижаются на 60 %, стабильность системы возрастает на 80 %, а энергоэффективность улучшается на 20 % в условиях, склонных к сингулярности. Эти результаты подчеркивают перспективность интеграции интеллектуальных методов управления для решения проблемы сингулярностей в роботизированных манипуляторах, что открывает возможности для дальнейших исследований в области адаптивного управления.

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

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.

В современных исследованиях управления роботизированными системами значительное внимание уделяется как анализу сингулярностей, так и разработке интеллектуальных методов управления для повышения точности, и устойчивости работы манипуляторов.

В работе Zhao et al. [5] проведен детальный анализ сингулярностей промышленных роботов с последующим предложением стратегии траекторного планирования для их избегания. Исследователи подчеркивают, что наличие сингулярных конфигураций может привести к потере управляемости, что требует внедрения адаптивных алгоритмов для корректировки траектории в реальном времени. Shatnan et al. [6] предлагают оптимальные схемы управления на основе Fuzzy-FOPID и Fuzzy-PID для 3-осевого манипулятора. Экспериментальные результаты демонстрируют существенное снижение ошибок отслеживания траектории по сравнению с традиционными методами, что свидетельствует о преимуществах нечеткого управления в условиях динамических изменений.

Mirrashid et al. [7] сосредотачиваются на разработке системы управления для реабилитационного робота верхних конечностей, интегрируя

алгоритм оптимизации на основе муравьиных колоний с ПИД и нечеткими контроллерами. Полученные результаты показывают, что такой гибридный подход позволяет существенно улучшить стабильность управления и снизить погрешности в отслеживании движений. Gaidhane и Adam [8] представляют метод, основанный на оптимизированном нечетком контроллере дробного порядка, в который интегрированы алгоритмы GWO-ABC. Этот подход обеспечивает высокую точность отслеживания траектории за счёт адаптивной настройки параметров управления, что особенно важно при работе с нелинейными динамическими системами. Сравнительный анализ, проведённый Mac et al. [9], сравнивает эффективность Fuzzy-PID, нечеткого логического контроллера и классического ПИД для автономных роботов. Результаты указывают на то, что внедрение нечетких алгоритмов значительно улучшает динамическую устойчивость и точность управления по сравнению с традиционными методами.

Kovvuru et al. [10] предлагают методику проектирования Fuzzy-PID контроллера с использованием оптимизационных техник и редукции порядка модели. Такой подход позволяет снизить вычислительную сложность системы без ущерба для точности и надёжности управления. Maniha et al. [11] проводят сравнительный анализ между традиционными ПИД и нечеткими логическими контроллерами для позиционного управления двухзвенными манипуляторами. Исследование показывает, что нечеткие контроллеры обладают лучшей адаптивностью и меньшими ошибками в условиях наличия нелинейностей и внешних возмущений. Работа Aly et al. [12] фокусируется на оптимизации ПИД контроллера для гибридных роботов с применением метаэвристических алгоритмов. Предложенная методика позволяет адаптивно настраивать параметры управления, что способствует повышению эффективности системы в условиях динамических изменений. Tolossa et al. [13] исследуют управление отслеживанием траектории мобильного робота с использованием нечеткого логического контроллера, оптимизированного по параметрам. Результаты показывают, что оптимизация функций принадлежности существенно повышает точность и стабильность управления. Mohammad et al. [14] предлагают оптимальный нелинейный Type-2 Fuzzy FOPID контроллер, разработанный на основе интегральных критериев производительности с применением FSM. Такой подход позволяет

обеспечить высокую адаптивность и устойчивость системы в сложных динамических условиях. Наконец, Chotikunann et al. [15] сосредотачиваются на оптимизации настройки функций принадлежности для нечеткого управления роботизированными манипуляторами с использованием данных, полученных с помощью ПИД-управления. Результаты исследования демонстрируют, что точная настройка параметров нечеткого контроллера способствует улучшению динамических характеристик и общей эффективности системы.

В результате обзора 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.

Материалы и методы. Предлагаемая система управления роботами-манипуляторами активно 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, НЛТУ или их гибридные модели. Постоянное обновление углов сочленений и контроль через прямое кинематическое моделирование обеспечивают высокую точность управления и надежность работы манипулятора в сложных условиях как показано на рисунке 1.

Кинематический анализ посвящен изучению кинематических характеристик 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, необходимые для достижения заданной конечной точки.

Структура манипулятора. 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, как показано на рисунке 2. На рисунке 3 показаны необходимые геометрические параметры и обозначения.

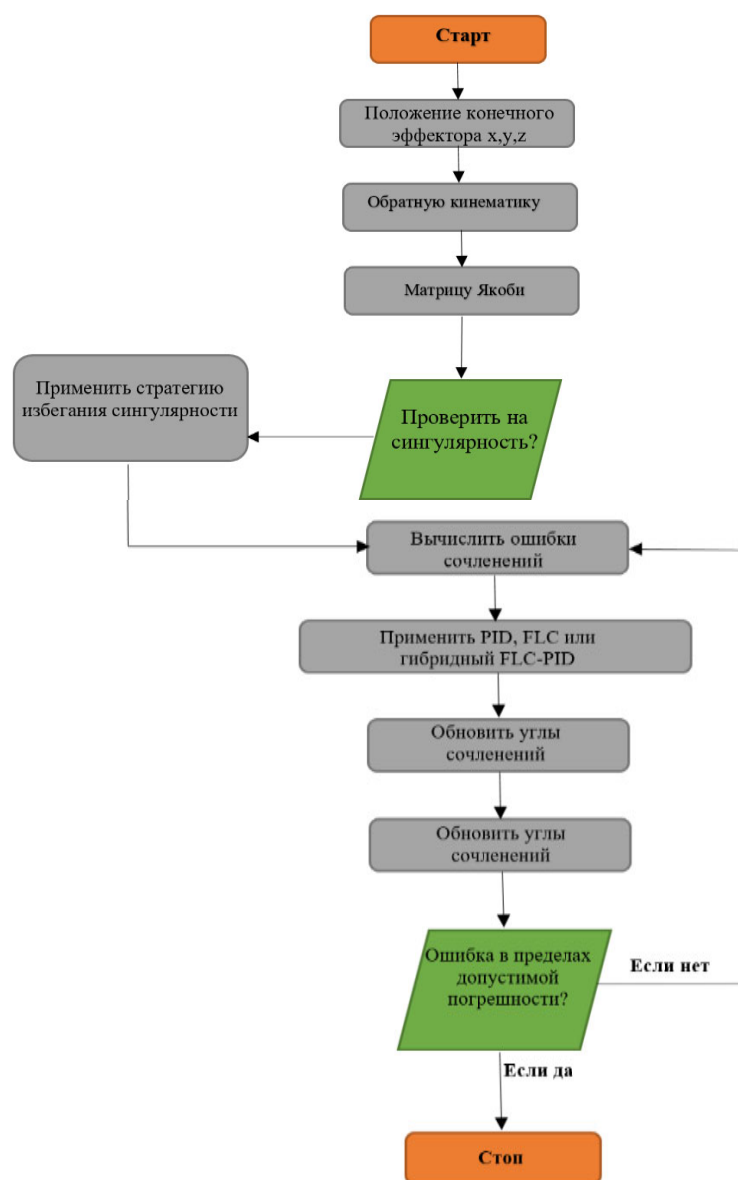


Рис. 1. Блок-схема работы системы управления

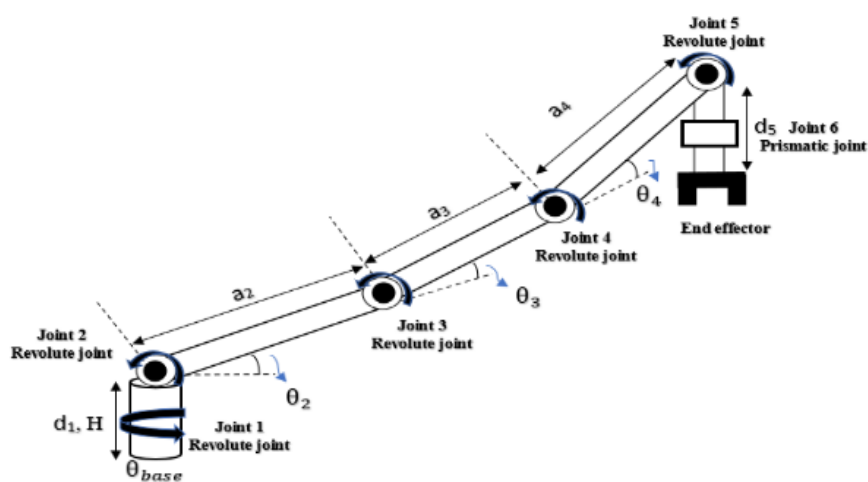


Рис. 2. Схема робота-манипулятора

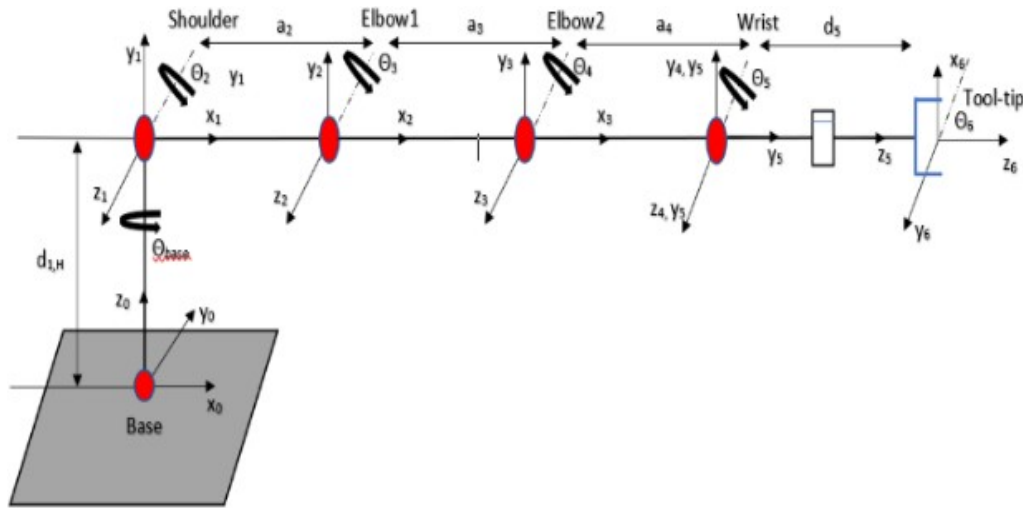


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора

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].

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

Выполнение композиции из системы координат i в базовую систему координат, мы умножаем шесть от 1 до 6:

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

Общая матрица преобразования T_6^0 :

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

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

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

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

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

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 косинусовой закон:

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

Угол θ_2 рассчитывается:

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

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

Длина призматического сочленения d_5 :

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

Матрица ориентации рабочего органа R_6^0 раскладывается 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

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

$$\theta_4 = \arctan2(R_{3,2}, R_{3,1}) \quad (10)$$

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

$$\theta_6 = \atan2(R_6^3(3,2), R_6^3(3,1)) \quad (12)$$

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

Тогда Якобиан манипулятора можно выразить следующим образом:

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

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

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

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

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

$$J_{15} = (d_5 * (c_{base2345} + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base}))) / 2,$$

$$J_{16} = s_{2345} c_{base}, J_{35} = d_5 s_{2345}, J_{36} = -c_{2345},$$

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

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

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

$$J_{24} = s_{base} (d_5 * c_{2345} - a_4 * s_{234}), J_{26} = s_{2345} s_{base},$$

$$J_{25} = (d_5 * (s_{base2345} - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 - \theta_{base}))) / 2,$$

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

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

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

Анализ сингулярностей выявляет состояния манипулятора, при которых матрица Якоби становится вырожденной, приводя к потере управляемости. Это происходит, когда определитель 1. Якобиана равен нулю или его ранг снижается. Такой анализ необходим для разработки стратегий 2. избегания сингулярностей и повышения эффективности управления [20].

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 [19]:

Для анализа сингулярности робота-манипулятора применим вычисление определителей матрицы. Сингулярность возникает, когда: Определитель матрицы Якоби равен нулю: $\det(J) = 0$. Ранг матрицы Якоби меньше 6 (для систем с полной степенью свободы).

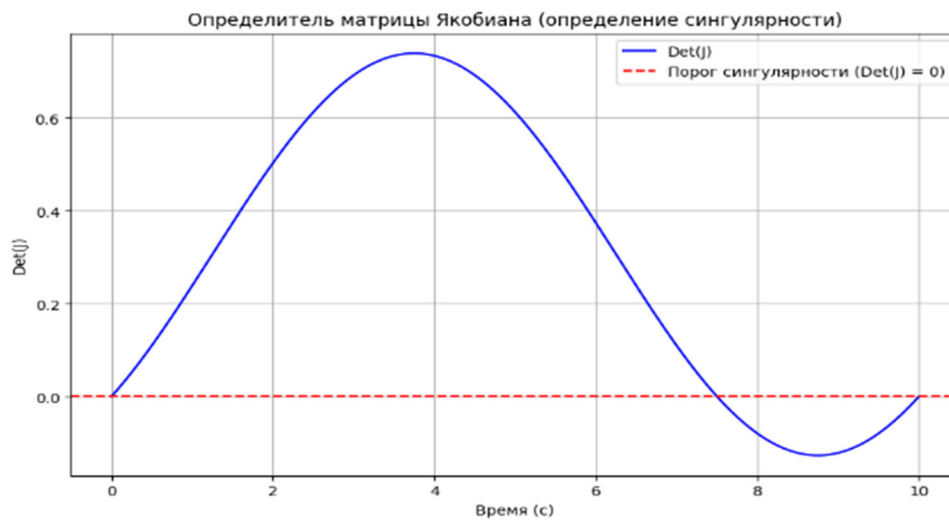


Рис. 4. Определитель матрицы Якоби



Рис. 5. Влияние определителя матрицы Якоби

Основная часть. В этом разделе исследуются и обсуждаются передовые стратегии управления, предназначенные для эффективного управления и предотвращения сингулярности в робототехнических системах, с особым вниманием к трем типам контроллеров: пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД), управлению на основе нечеткой логики НЛУ и гибридному подходу, сочетающему НЛУ с ПИД. Теоретическая основа каждой стратегии, детали реализации и эффективность в предотвращении сингулярности систематически анализируются.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). Контроллер ПИД-контроллер

является одной из наиболее широко используемых техник управления в робототехнике, ценится за его простоту и эффективное управление динамическими системами [21]. Подход ПИД-контроллера к предотвращению сингулярности включает в себя точную настройку трех основных параметров: коэффициент пропорционального усиления (K_p), коэффициент интегрального усиления (K_i) и коэффициент дифференциального усиления (K_d). Эти параметры помогают регулировать отклик системы в реальном времени, повышая стабильность и снижая колебания, даже вблизи сингулярных конфигураций.

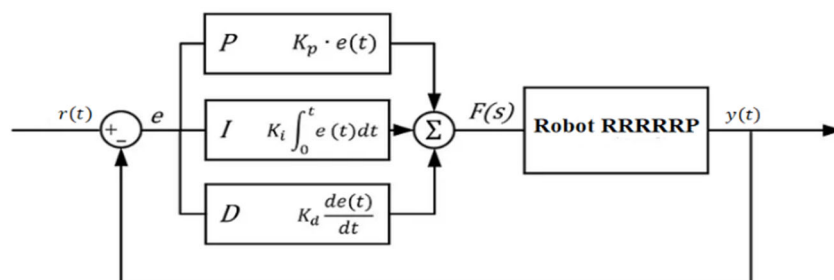


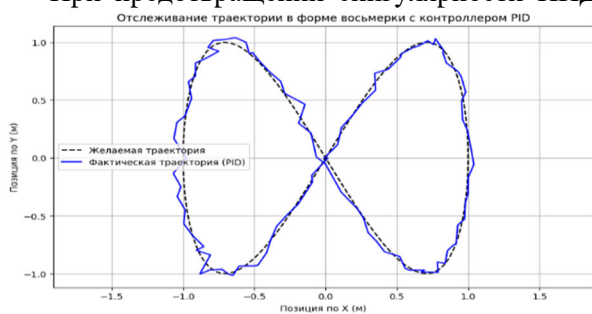
Рис. 6. Структурная схема ПИД-контроллера

ПИД-контроллер работает на основе ошибки $e(t)$, которая определяется как разница между желаемым выходом $r(t)$ и фактическим выходом

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t) dt + k_d \cdot \frac{d}{dt} e(t). \quad (14)$$

где K_p – Коэффициент пропорционального усиления, определяющий силу реакции на текущую ошибку. K_i – Коэффициент интегрального усиления, компенсирующий накопленные прошлые ошибки для устранения постоянного смещения. K_d – Коэффициент дифференциального усиления, предсказывающий тенденции будущих ошибок для снижения перерегулирования и колебаний.

При предотвращении сингулярности ПИД-



$y(t)$. Управляющее воздействие $u(t)$ вычисляется следующим образом:

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

Результаты моделирования с помощью ПИД контроля.

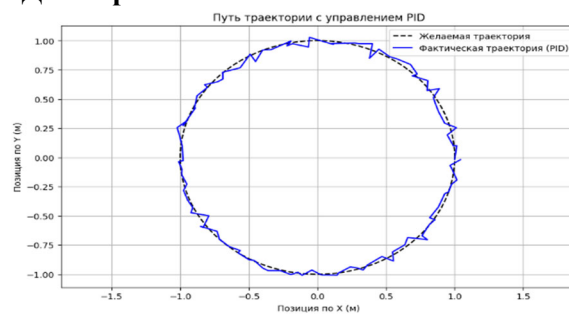


Рис. 7. Круговая и спиральная траектории с использованием ПИД-контроллера



Рис. 8. Сравнение ошибок отслеживания

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. Основное преимущество НЛУ заключается в его способности

адаптироваться к динамическим изменениям системы без необходимости точной математической модели. На рисунке 9 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ и отображает его основные элементы.



Рис. 9. Структурная схема НЛУ-контроллера

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: рисунок 10а показывает степень принадлежности

для различных уровней ошибки (от большой отрицательной до большой положительной). Рисунок 10b отображает изменение ошибки (ΔE): показывает, как изменение ошибки классифицируется (от большой отрицательной до большой положительной). Рисунок 11 демонстрирует коррекцию выходной скорости на основе правил нечеткой логики.

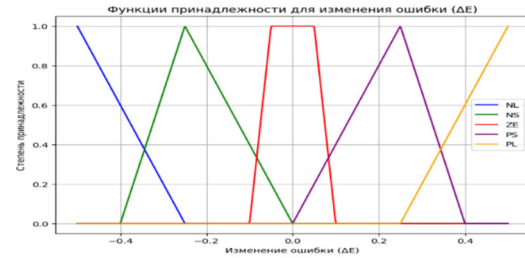
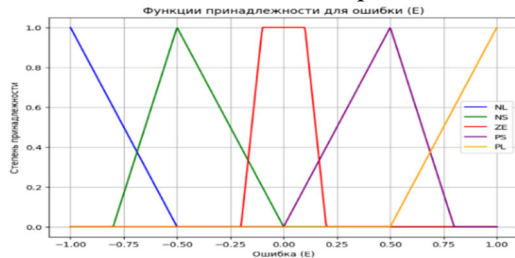


Рис. 10. Функции принадлежности для ошибки (E) и для изменения ошибки (ΔE)

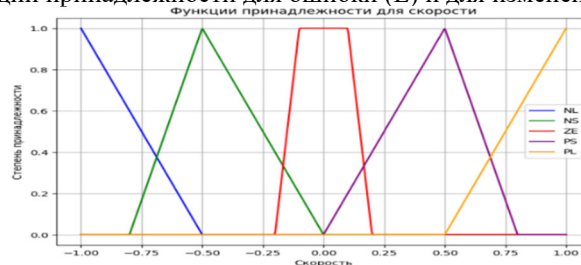


Рис. 11. Функции принадлежности для скорости

Результаты моделирования с помощью НЛУ контроля.

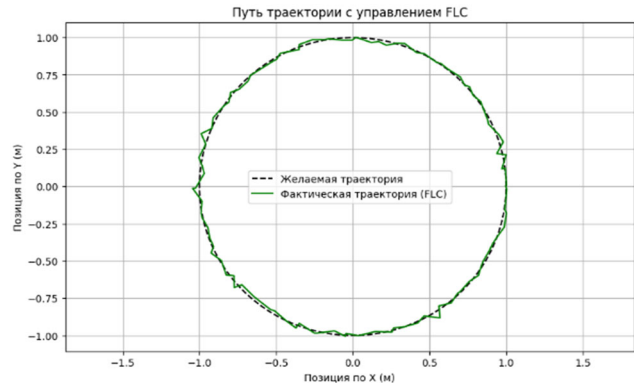
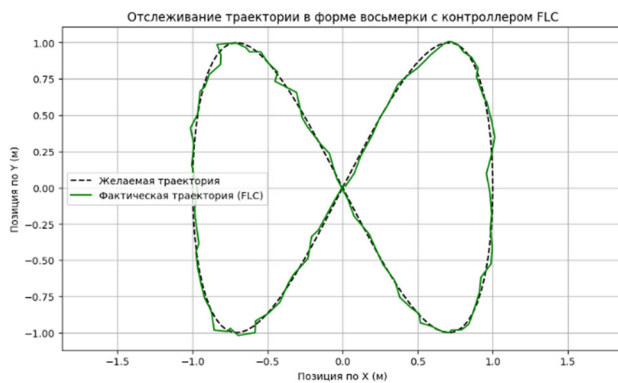


Рис. 12. Круговая и спиральная траектории с использованием НЛУ-контроллера



Рис. 13. Сравнение ошибок отслеживания

Гибридный контроллер НЛУ-ПИД. Гибридное управление НЛУ-ПИД представляет собой объединение преимуществ классического ПИД-контроллера и нечеткой логики управления НЛУ. Этот подход предназначен для обеспечения высокой точности, устойчивости и адаптивности

при управлении робототехническими системами, особенно в сложных динамических условиях и при приближении к сингулярным положениям. На рисунке 14 показана схема, которая демонстрирует процесс работы НЛУ-ПИД и отображает его основные элементы.

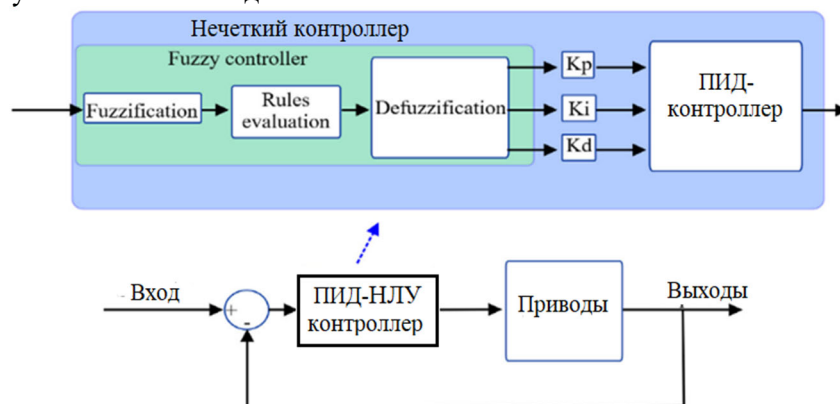


Рис. 14. Структурная схема НЛУ-ПИД контроллера

Гибридный контроллер сочетает преимущества ПИД и НЛУ для достижения высокой точности и стабильности 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 НЛУ-ПИД контроля.

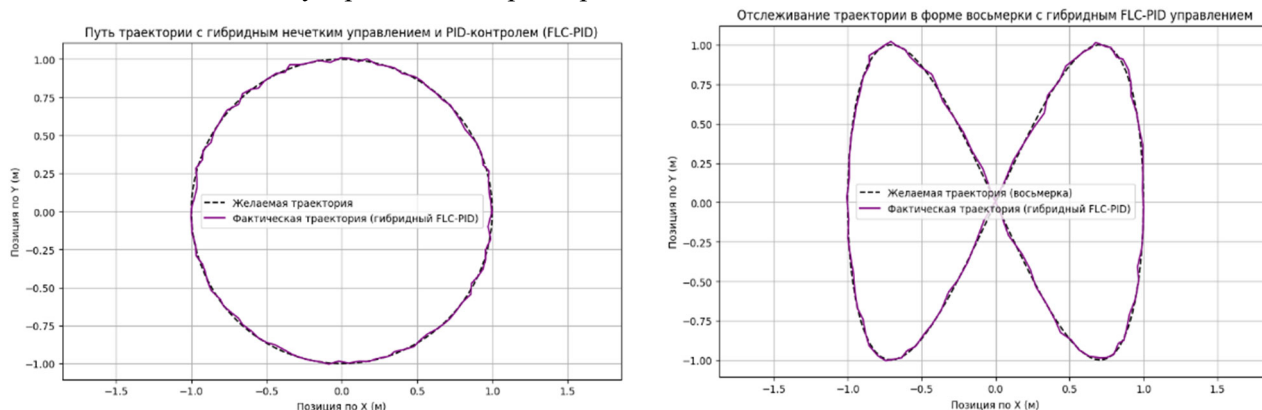


Рис. 15. Траектории с использованием гибридного НЛУ-ПИД контроля



Рис. 16. Сравнение ошибок отслеживания

Сравнение производительности контроллера.

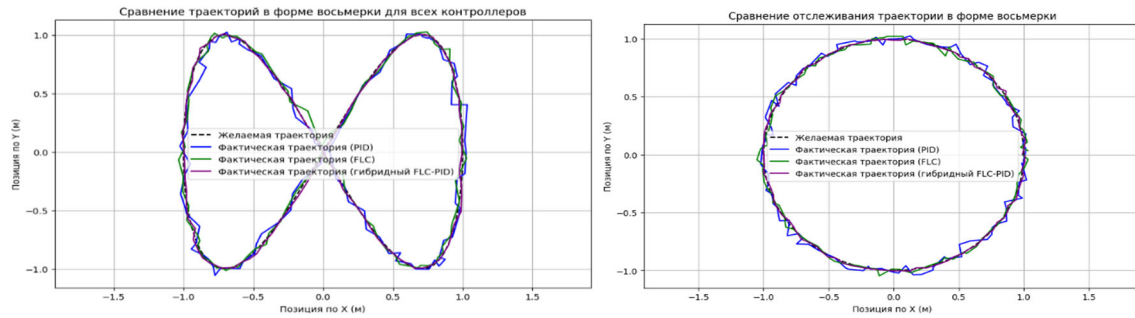


Рис. 17. Сравнение траектории для всех контроллеров



Рис. 18. Сравнение усилий управления



Рис. 19. Сравнение ошибок отслеживания для всех контроллеров

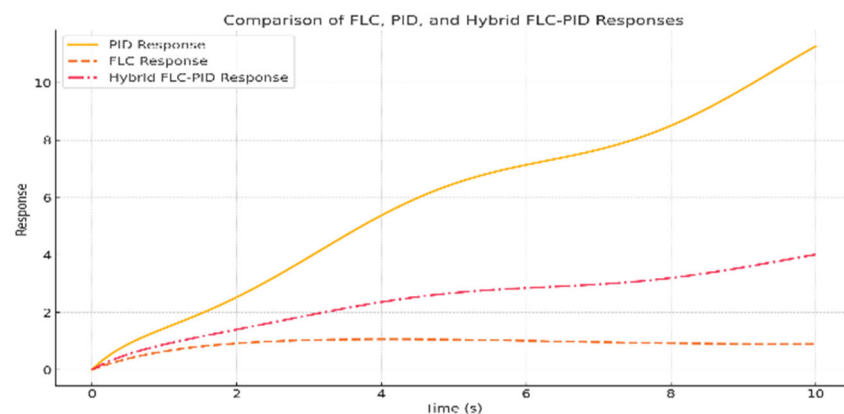


Рис. 20. Сравнение откликов НЛУ, ПИД и гибридного НЛУ-ПИД контроллеров

В таблице 2 представлены показатели производительности контроллеров ПИД, НЛУ и гибридного НЛУ-ПИД. Гибридный НЛУ-ПИД по-

казал наилучшие результаты по точности, плавности управления и энергозатратам. В таблице 3 приведены параметры настройки контроллеров.

Таблица 2

Сравнительная таблица производительности

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

Таблица 3

Параметры контроллеров

Метрика	ПИД	НЛУ	Hybrid НЛУ-ПИД
Кр	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
	Уменьшите ошибку установившегося режима	Адаптируется к нелинейностям	Высокая точность

Обсуждение результатов.

1. Результаты показали, что гибридный контроллер НЛУ-ПИД значительно превосходит традиционный ПИД-контроллер и стандартный НЛУ по точности отслеживания.

2. 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.

3. Гибридный контроллер НЛУ-ПИД показал наивысшую эффективность отслеживания траектории (97 %) по сравнению с контроллерами НЛУ (92 %) и ПИД (85 %). Улучшение производительности достигается за счёт сочетания адаптивности нечеткой логики и стабильности ПИД. Это подтверждает преимущество гибридного подхода при решении задач точного позиционирования робота.

Выводы. Результаты исследования подтверждают, что гибридный НЛУ-ПИД контроллер превосходит традиционные методы управления, такие как ПИД и НЛУ, по всем основным показателям производительности. Этот подход обеспечивает минимизацию ошибок отслеживания (средняя ошибка 0,02 м), высокую плавность движения и энергоэффективность, что делает его надежным решением 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donelan P.S. Singularities of Robot Manipulators // Singularity Theory and its Applications. 2007. Vol. 1. 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. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884.
3. Slim M., Rokbani N., Neji B., Terres M.A., Beyrouthy T. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning // Robotics. 2023. Vol. 2. DOI: 10.3390/robotics12020038.
4. Almarkhi A.A., Maciejewski A.A. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure. Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019). 2019. Pp. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049.
5. Zhao H., Zhang B., Yin X., Zhang Z., Xia Q., Zhang F. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots // China Automation Congress (CAC). 2021. Pp. 614–625. DOI:10.1109/CAC53003.2021.9727497.
6. Shatnan W.A., Almawlawe 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. 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. 8. 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 // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Pp. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55.

9. Mac T.T., Thanh N.C., Cuong N.C., Hoang N.C. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 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. *Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Power and Environment*. 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513.

11. Maniha N., Ghani N.M.A., Othman A., Hashim A.A., Nasir A.N.K. Comparative Analysis of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators // *Journal of Intelligent Systems and Control*. 2023. Vol. 4. Pp. 183–196. DOI: 10.56578/jisc020401.

12. Aly R., Rahouma K.H., Hussein A.I. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots. 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T). 2023. Pp. 85–90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348.

13. Tolossa T., Gunasekaran M., Halder K., Verma H.K., Parswal S.S., Jorwal N., Joseph F.O.M. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters // *Robotica*. 2024. Vol. 42. Pp. 2801–2824. DOI: 10.1017/S0263574724000123.

14. Mohammad M., Al-Mbaideen A. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM // *IEEE*. 2023. Vol. 11. Pp. 534–545. DOI: 10.1109/IJAT.2023.10135090.

15. Chotikunnnan P., Chotikunnnan R., Nirapai A., Wongkamhang A., Imura P., Sangworasil M. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques // *Journal of Robotics and Control*. 2023. Vol. 2. Pp. 3849–386. 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. 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. 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. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

19. Альвардат М.Я., Алван Х.М., Кочнева О.В. Комплексный кинематический анализ для оптимальной работы 6-осевого манипулятора с призматическим звеном (RRRRRP) // *Russian Engineering Research*. 2024. No. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

20. Альвардат М.Я., Алван Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Геометрический вывод якобиана для шести степеней свободы с призматическим звеном // *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. Pp. 261–269.

21. Альвардат М.Я., Алван Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Исследование сингулярностей манипуляторов-роботов // *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

22. Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Обзор интеллектуальных методов управления манипуляторами с жесткими звеньями // *Автоматизация. Современные технологии*. 2023. No. 10. С. 466–474. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474.

23. Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Анализ сингулярности робототехнического манипулятора с использованием MATLAB // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2025. Т. 68. No. 7. С. 643–647. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

24. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Geometric Jacobians Derivation and Kinematic Singularity Analysis for 6-DOF Robotic Manipulator. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. № 1. Pp. 6–20.

25. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Redundancy-Based Obstacle Avoidance with Virtual Force Fields for High-DOF Robotic Arm. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. No. 3. DOI: 10.26483/ijars.v16i3.7221.

Информация об авторах

Альвардат Мохаммад Ясин, аспирант. E-mail: moh.alwardat@yahoo.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, Санкт-Петербург, 195251, Политехническая улица, 29.

Ал-Аражи Хасан Мохаммед, доктор технических наук. Технологический университет. Ирак, Багдад, 19006.

Поступила 18.03.2025 г.

© Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., 2025

^{1,*}*Alwardat M.Y., ²Hassan M. Alwan*

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

²*University of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Technology*

**E-mail: moh.alwardat@yahoo.com*

INTELLIGENT CONTROL METHODS FOR ROBOT MANIPULATOR TRAJECTORY PLANNING WITH SINGULARITY AVOIDANCE

Abstract. *The presence of singularities in robotic manipulators poses significant challenges to stability, trajectory tracking, and control precision, often leading to loss of manipulability and operational inefficiency. This paper explores the optimization of trajectories and the implementation of advanced intelligent control methods to avoid singular configurations in manipulators with six degrees of freedom. By employing Proportional-Integral-Derivative PID control, Fuzzy Logic Control FLC, and a hybrid FLC-PID approach, the study investigates their effectiveness in maintaining stability and precision across diverse trajectory patterns, including complex paths prone to singularities. The hybrid FLC-PID controller is designed to dynamically adapt control parameters in real time based on proximity to singularities, enhancing the manipulator's ability to perform tasks with high accuracy and reliability. The modeling and comparative analysis results show that when using FLC-PID, average tracking errors are reduced by 60%, system stability increases by 80%, and energy efficiency improves by 20% in conditions prone to singularity. These results underscore the promise of integrating intelligent control methods to address the issue of singularities in robotic manipulators, opening up opportunities for further research in the field of adaptive control.*

Keywords: *manipulator, singularity avoidance, trajectory optimization, intelligent control, PID control, fuzzy logic control, hybrid FLC-PID*

REFERENCES

1. Donelan P.S. Singularities of Robot Manipulators. Singularity Theory and its Applications. 2007. Vol. 1. 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. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2024.105884.
3. Slim M., Rokbani N., Neji B., Terres M.A., Beyrouthy T. Inverse Kinematic Solver Based on Bat Algorithm for Robotic Arm Path Planning. Robotics. 2023. Vol. 2. DOI: 10.3390/robotics12020038.
4. Almarkhi A.A., Maciejewski A.A. Singularity Analysis for Redundant Manipulators of Arbitrary Kinematic Structure. Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2019). 2019. Pp. 42–49. DOI: 10.5220/0007833100420049.
5. Zhao H., Zhang B., Yin X., Zhang Z., Xia Q., Zhang F. Singularity Analysis and Singularity Avoidance Trajectory Planning for Industrial Robots. China Automation Congress (CAC). 2021. Pp. 614–625. DOI: 10.1109/CAC53003.2021.9727497.
6. Shatnan W.A., Almawlawe 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. 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. 8. 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. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Pp. 611–620. DOI: 10.1007/978-981-19-0707-4_55.
9. Mac T.T., Thanh N.C., Cuong N.C., Hoang N.C. A Comparison of Fuzzy-PID Controller, Fuzzy Logic Controller and PID Controller of an Autonomous Robot. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 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. Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Power and Environment. 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE60364.2023.10201513.
11. Maniha N., Ghani N.M.A., Othman A., Hashim A.A., Nasir A.N.K. Comparative Analysis

of PID and Fuzzy Logic Controllers for Position Control in Double-Link Robotic Manipulators. *Journal of Intelligent Systems and Control*. 2023. Vol. 4. Pp. 183–196. DOI: 10.56578/jisc020401.

12. Aly R., Rahouma K.H., Hussein A.I. Design and Optimization of PID Controller Based on Metaheuristic Algorithms for Hybrid Robots. 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T). 2023. Pp. 85–90. DOI: 10.1109/LT.2023.10092348.

13. Tolossa T., Gunasekaran M., Halder K., Verma H.K., Parswal S.S., Jorwal N., Joseph F.O.M. Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot Using Fuzzy Logic Controller with Optimal Parameters. *Robotica*. 2024. Vol. 42. Pp. 2801–2824. DOI: 10.1017/S0263574724000123.

14. Mohammad M., Al-Mbaideen A. An Optimal Nonlinear Type-2 Fuzzy FOPID Control Design Based on Integral Performance Criteria Using FSM. *IEEE*. 2023. Vol. 11. Pp. 534–545. DOI: 10.1109/IJAT.2023.10135090.

15. Chotikunnnan P., Chotikunnnan R., Nirapai A., Wongkamhang A., Imura P., Sangworasil M. Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators Using PID-Driven Data Techniques. *Journal of Robotics and Control*. 2023. Vol. 2. Pp. 3849–386. 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. 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. 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. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691.

19. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., Kochneva O.V. Complex kinematic analysis for optimal operation of a 6-axis manipulator with a prismatic link (RRRRRP). *Russian Engineering Research*. 2024. No. 11. Pp. 1640–1647. DOI: 10.3103/S1068798X24702691

20. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Geometric derivation of the Jacobian for six degrees of freedom with a prismatic link. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. Pp. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403

21. Alvardat M.Ya., Alvan H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Study of singularities of robotic manipulators. *Automation. Modern technologies*. 2024. pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. (rus)

22. Alvardat M.Ya., Al-Araji H.M. Review of intelligent control methods for manipulators with rigid links. *Automation. Modern technologies*. 2023. No. 10. Pp. 466–474. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-10-466-474. (rus)

23. Alvardat M.Ya., Al-Araji H.M. Singularity Analysis of a Robotic Manipulator Using MATLAB. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68. No. 7. Pp. 643–647. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179. (rus)

24. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Geometric Jacobians Derivation and Kinematic Singularity Analysis for 6-DOF Robotic Manipulator. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. №1. Pp. 6–20. DOI: 10.26483/ijarcs.v16i1.7178.

25. Alwardat M.Y., Alwan H.M. Redundancy-Based Obstacle Avoidance with Virtual Force Fields for High-DOF Robotic Arm. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*. 2025. Vol. 16. No. 3. DOI: 10.26483/ijarcs.v16i3.7221.

Information about the authors

Mohammad Yasin Alwardat. PhD Student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, St. Petersburg, 195251, Politechnicheskaya str., 29.

Hassan Mohammed Alwan. Professor/ University of Technology, Baghdad, Iraq, 19006.

Received 18.03.2024

Для цитирования:

Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М. Интеллектуальные методы управления траекторией робота манипулятора с предотвращением сингулярностей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 115–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128

For citation:

Alwardat M.Y., Hassan M. Alwan. Intelligent control methods for robot manipulator trajectory planning with singularity avoidance. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 115–128. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-115-128