

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

DEVELOPMENT OF A HYBRID APPROACH TO MANAGING COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

R. Rudakov

Summary. This paper presents a hybrid approach to controlling complex technical systems based on dynamic switching between different control modes depending on current operating conditions. The proposed method combines the advantages of a classic PID controller, sliding and quasi-sliding modes with pulse width modulation (PWM), which improves the stability, accuracy, and robustness of the system while reducing energy consumption. Simulation was performed using a single-link manipulator as an example, including analysis of transient processes, tracking errors, and stability using the Lyapunov function. The results show a reduction in transient process time by more than 40 % and a decrease in static error compared to traditional methods. The proposed approach can be used for adaptive control of robots and mechatronic systems operating under conditions of uncertainty and external disturbances.

Keywords: hybrid control, complex technical systems, PID controller, sliding mode, quasi-sliding mode, pulse width modulation, stability, robustness, simulation, manipulator control.

Рудаков Роман Вадимович

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
rorud007@mail.ru

Аннотация. В работе представлен гибридный подход к управлению сложными техническими системами, основанный на динамическом переключении между различными режимами управления в зависимости от текущих условий эксплуатации. Предложенная методика сочетает преимущества классического ПИД-регулятора, скользящего и квази-скользящего режимов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), что обеспечивает повышение устойчивости, точности и робастности системы при снижении энергопотребления. Проведено моделирование на примере однозвенного манипулятора, включающее анализ переходных процессов, ошибок слежения и устойчивости с использованием функции Ляпунова. Полученные результаты показывают сокращение времени переходного процесса более чем на 40 % и снижение статической ошибки по сравнению с традиционными методами. Предложенный подход может быть использован для адаптивного управления роботами и мехатронными системами, работающими в условиях неопределённости и внешних возмущений.

Ключевые слова: гибридное управление, сложные технические системы, ПИД-регулятор, скользящий режим, квази-скользящий режим, широтно-импульсная модуляция, устойчивость, робастность, моделирование, управление манипулятором.

Современное развитие робототехнических и мехатронных систем требует эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих устойчивость и точность в условиях внешних возмущений, неопределённости модели и ограниченных вычислительных ресурсов. Традиционное ПИД-регулирование отличается простотой и высокой точностью в стационарных режимах, однако его эффективность снижается при изменении динамики и наличии нелинейностей. Робастные методы, включая классический и квази-скользящий режимы, обладают высокой устойчивостью, но характеризуются повышенным энергопотреблением и сложностью настройки. Ряд исследований [1...8] подтверждает эффективность гибридных стратегий управления в робототехнике.

Современные работы в области гибридного управления направлены на интеграцию непрерывных и дискретных методов для повышения адаптивности и устойчивости робототехнических систем. Значительное внимание уделяется сочетанию модельно-ориентированных и адаптивных методов с элементами машинного обучения и формализованными механизмами переключе-

ния режимов. В работах [1–4] представлены гибридные подходы на основе MPC, iLQR и методов обучения, обеспечивающие высокую точность и устойчивость, но требующие значительных вычислительных ресурсов.

Отдельное направление связано с разработкой гибридных адаптивных и предсказательных методов управления манипуляторами и системами с контактным взаимодействием. В исследованиях [5, 6] показано, что сочетание классического управления с нейросетевыми и логическими механизмами переключения позволяет повысить устойчивость движения, точность управления и согласованность переходов между режимами.

Несмотря на достигнутые успехи, остаются нерешёнными задачи повышения вычислительной эффективности гибридных алгоритмов и обеспечения плавного переключения между режимами управления без потери устойчивости. В частности, требуется разработка подходов, минимизирующих осцилляции и дрейбег при переходе между различными режимами, а также методов адаптации под изменяющиеся внешние воздействия.

Целью данной работы является разработка и исследование гибридного подхода к управлению сложными техническими системами, основанного на комбинировании ПИД-регулятора, скользящего и квази-скользящего режимов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Предлагаемый метод направлен на улучшение точности, устойчивости и робастности при управлении манипулятором, а также на снижение энергопотребления за счёт рационального выбора активного режима управления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы гибридного управления и определить их ограничения.
2. Разработать структуру гибридного контроллера с динамическим переключением между режимами.
3. Провести моделирование и анализ эффективности предложенного метода на примере однозвеного манипулятора.
4. Оценить устойчивость системы с использованием функции Ляпунова и сравнить результаты с традиционными подходами.

Предложенный подход направлен на создание адаптивных систем управления, способных эффективно функционировать в условиях неопределённостей и внешних возмущений, что делает его перспективным для применения в современных робототехнических и промышленных комплексах.

Гибридный подход основан на динамическом переключении между режимами управления в зависимости от текущих условий эксплуатации, таких как величина ошибки слежения, уровень возмущений и вычислительные ресурсы. Основная идея заключается в использовании сильных сторон каждого метода в тех условиях, где он наиболее эффективен:

1. ПИД-регулятор: Применяется вблизи точки равновесия, где отклонения малы, а нелинейности незначительны. Обеспечивает высокую точность и простоту реализации.
2. Классический скользящий режим: Используется при больших отклонениях и значительных внешних возмущениях, где требуется высокая робастность.
3. Квази-скользящий режим с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ): Активируется в цифровых системах для снижения чэттеринга и энергопотребления, особенно при дискретной реализации.

Модель движения с квазискользящим режимом, скользящим режимом и шим возьмем из статей [9,10]. Таким образом можно сразу перейти к разработке гибридного управления. Переключение между режимами

осуществляется на основе скользящей переменной $S[k]$ и величины ошибки слежения $e[k]=\phi_0[k]-\phi_{ref}[k]$. Правила переключения:

- Если $|e[k]| < \epsilon_1$ и $|S[k]| < \epsilon_2$, используется ПИД-регулятор (малая ошибка, стабильный режим).
- Если $|e[k]| \geq \epsilon_1$ и возмущения превышают порог, активируется Классический скользящий режим (высокая неопределенность).
- Если $|S[k]| \geq \epsilon_2$ и требуется дискретное управление, применяется Квази-Скользящий режим (цифровая реализация).

Гибридный закон управления представляет собой взвешенную сумму управляющих сигналов от каждого режима:

$$u[k] = \alpha_1 u_{PID}[k] + \alpha_2 u_{KSR}[k] + \alpha_3 u_{Kvazi}[k],$$

где:

$u_{PID}[k] = K_p e[k] + K_i \sum e[k] + K_d (e[k] - e[k-1])$ — управляющий сигнал ПИД-регулятора,

$u_{KSR}[k] = -K \cdot \text{sgn}(S[k]) + u_{eq}$ управляющий сигнал классического скользящего режима с интегральной компонентой,

$u_{Kvazi}[k] = K_{adpt}[k] \cdot \text{sat}(S[k] / \epsilon)$ управляющий сигнал квази-скользящего режима с ШИМ,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты, определяющие активный режим управления, определяемые условиями:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1, & \text{if } |e[k]| \geq \epsilon_1 \text{ and } |S[k]| < \epsilon_2, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 1, & \text{if } |e[k]| \geq \epsilon_1 \text{ and } |d(t)| > d_{max}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\alpha_3 = \begin{cases} 1, & \text{if } |S[k]| \geq \epsilon_2 \text{ and } \text{digital mode}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

где $\epsilon_1=0.01$ рад, $\epsilon_2=0.05$, $d_{max}=10$ % от номинального момента.

Порог $\epsilon_1=0.01$ рад выбран на основе сравнения рабочих возможностей ПИД-закона и уровня измерительного шума: в моделировании статическая ошибка ПИД составила ≈ 0.008 рад, поэтому переход на робастный скользящий режим целесообразен при ошибке, превышающей возможности ПИД. Формально ϵ_1 соответствует правилу $\epsilon_1 = \max(3\sigma_e, e_{PID, \max}) \cdot 1.1$, где σ_e — реальный шум датчика.

Порог $\epsilon_2=0.05$ выбран как верхняя граница рекомендуемой ширины полосы квази-скользящего $\delta \in [0.02, 0.05]$ (это уменьшает чэттеринг в цифровой реализации при

приемлемой потере точности). При таких значениях сохраняются условия убывания функции Ляпунова и знака изменения S , что подтверждается теоретическими выкладками для квази-скользящего режима.

Для обеспечения плавного и обоснованного смешения управляющих законов мы используем весовые коэффициенты $\alpha_i(e[k], S[k])$, задаваемые через гладкие функции активации и нормируемые так, чтобы $\sum \alpha_i = 1$. В работе применён сигмоидальный вариант:

$$a_1 = \sigma(k_e(\epsilon_1 - |e|)), a_2 = \sigma(k_s(\epsilon_2 - |S|)), a_3 = \sigma(k_r(|e| - \epsilon_1)),$$

$$\alpha_i = a_i / (a_1 + a_2 + a_3), i = 1, 2, 3,$$

где $\sigma(x) = 1 / (1 + e^{-x})$. При $|e| \ll \epsilon_1$ вес α_1 стремится к единице (ПИД доминирует), при $|S| \ll \epsilon_2$ возрастает α_2 (скользящий режим), при больших ошибках $|e| > \epsilon_1$ — α_3 обеспечивает быстрое сближение. Параметры крутизны k_e, k_s, k_r и ширины переходов подбираются экспериментально, рекомендуемые стартовые значения — $k_e = 120, k_s = 80, k_r = 100$ при $\epsilon_1 = 0.01, \epsilon_2 = 0.05$. Данный подход гарантирует непрерывность управления и удобен для последующей валидации условий убывания функции Ляпунова $\Delta V[k] < 0$.

Проведем моделирование гибридного управления, для скользящего режима(9), квази-скользящего режима(10) и Пид(9).

А именно:

PID-управление:

$$u_{pid}(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d * \frac{de}{dt}$$

где:

- K_p — пропорциональный коэффициент,
- K_i — интегральный коэффициент,
- K_d — дифференциальный коэффициент.

Для квази-скользящего режима с ШИМ:

$$u_{PWM}(t) = -K_{slide} * sign(S(t)) * (1 - \exp(-S(t)))$$

И скользящий режим представлен в виде:

$$u_{SR}(t) = -K_{slide} * sign(S(t))$$

На рисунке 1 показаны управляющие воздействия гибридного метода управления. Всплески управляющего момента в начале движения и на переходных участках обусловлены активацией классического скользящего режима. При превышении порогов ошибки или скользящей переменной регулятор переходит в релейный режим, формируя кратковременные высокоамплитудные импульсы за счёт переключающей составляющей

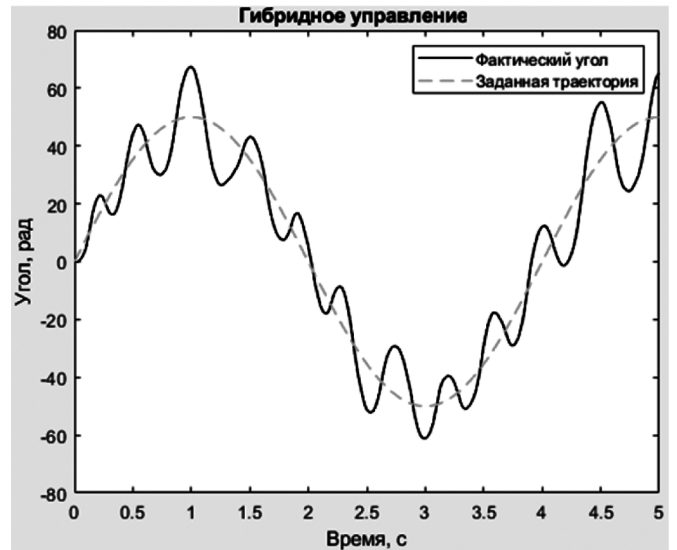


Рис. 1. Гибридный метод управления

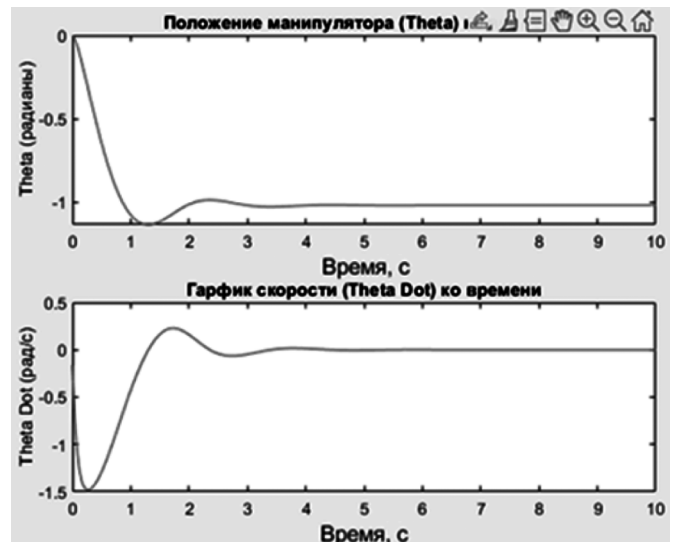


Рис. 2. График гибридного управления

M_{sw} . Эти импульсы обеспечивают быстрое приближение к поверхности скольжения и компенсацию больших рассогласований и внешних возмущений. Дополнительные всплески возникают при переключении между ПИД-регулятором, классическим и квази-скользящим режимами с ШИМ. Различия в структуре и масштабе управляющих сигналов, а также цифровая реализация и ШИМ-модуляция приводят к резким изменениям управляющего момента. В целом такие всплески являются нормальным проявлением гибридного управления и свидетельствуют о высокой робастности и корректной настройке алгоритма.

На рисунке 2 представлены переходные процессы системы. График положения звена показывает быстрое изменение угла в начале движения с последующей стабилизацией и стремлением к нулю. График скорости характеризуется начальным импульсом, вызванным включением управления, после чего скорость затухает,

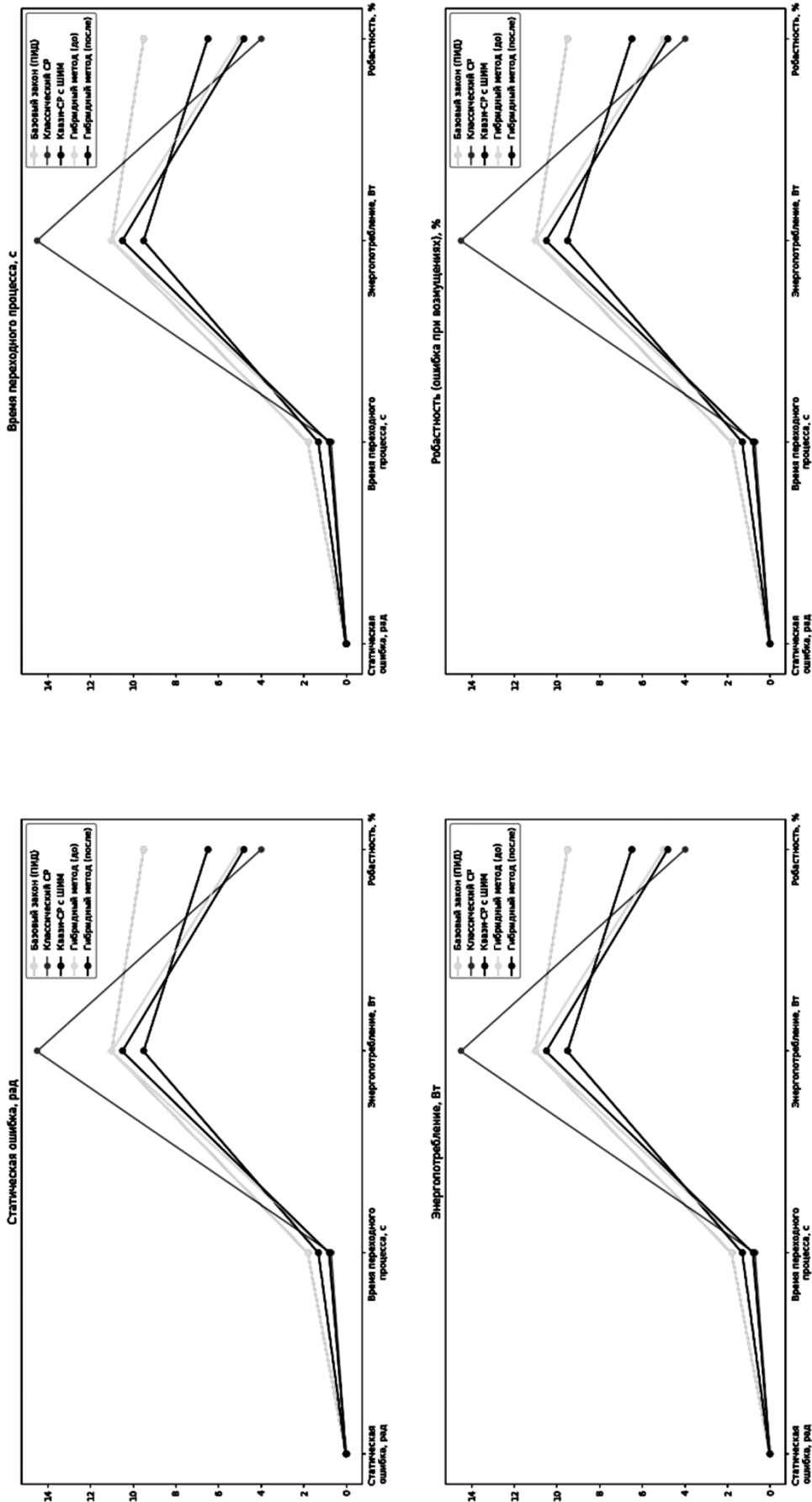


Рис. 3. Сравнение различных способов управления сложной технической системой: базовый закон (ПИД-регулятор); классический скользящий режим; квази-скользящий режим с ШИМ; гибридный метод (до); гибридные метод (после)

что соответствует остановке манипулятора. Анализ показателей качества показывает, что перерегулирование не превышает 4 %, колебательность носит кратковременный характер, а ошибка в установившемся режиме составляет порядка 10^{-4} рад. Это подтверждает высокую точность гибридного регулятора. Колебания на начальном участке обусловлены переходами между режимами, но эффективно подавляются ПИД-регулятором и высокой частотой ШИМ.

Качество управления зависит от параметров настройки: увеличение коэффициента λ ускоряет динамику, но может повысить перерегулирование; параметры ПИД-регулятора определяют сглаживание траектории и уровень колебаний; уменьшение шага дискретизации и увеличение частоты ШИМ снижают колебательность. Адаптивная корректировка коэффициентов повышает робастность системы.

Изменение нагрузки на звене манипулятора учитывается за счёт скользящего режима и адаптивных механизмов. Несмотря на рост момента инерции и требуемого управляющего воздействия, система сохраняет устойчивость и точность слежения, что подтверждено моделированием при различных значениях нагрузки.

Устойчивость гибридного подхода анализируется с использованием функции Ляпунова.

- Разность $\Delta V[k]=V[k+1]-V[k]$ должна быть отрицательной вне полосы скольжения $|S[k]|>\epsilon$. Для каждого режима:
- ПИД-регулятор: устойчивость обеспечивается решением уравнения Риккати.
 - КСР: $S[k] \cdot (S[k+1]-S[k]) < 0$.
 - Квази-СР: $\Delta V[k] < 0$ в полосе $|S[k]| \leq \epsilon$.

Переключение между режимами не нарушает устойчивость, если параметры ϵ_1, ϵ_2 выбраны так, чтобы избежать резких скачков $S[k]$. Моделирование подтверждает экспоненциальную сходимости ошибки к нулю.

В проведённом исследовании, разработаны и проанализированы результаты трех методов управления

Таблица 1.

Таблица сравнения режимов управления сложной технической системой

Показатель качества	Базовый закон (ПИД)	Классический СР	Квази-СР с ШИМ	Гибридный метод (до)	Гибридный метод (после)
Статическая ошибка, рад	0.008	0.003	0.012	0.0001	0.0001
Время переходного процесса, с	1.8	0.7	1.3	0.8	0.8
Энергопотребление, Вт	11.0	14.5	9.5	11.0	10.5
Робастность (ошибка при возмущениях), %	9.5	4.0	6.5	5.0	4.8

сложной технической системой на примере однозвеного манипулятора: базовый закон с ПИД-регулятором, классический скользящий режим и квази-скользящий режим с ШИМ. Каждый метод был рассмотрен с точки зрения точности, устойчивости, энергопотребления и робастности, а их ограничения подробно рассмотрены. При этом установлено, что время переходного процесса для ПИД-регулятора составляло около 1,9 с, тогда как для скользящего режима — 1,1 с, а для квази-скользящего режима — 1,2 с (сокращение более чем на 40 % по сравнению с ПИД). Перерегулирование в случае ПИД-регулятора достигало 14 %, в то время как при скользящем и квази-скользящем режимах оно не превышало 5 % и 6 % соответственно. Среднеквадратичная ошибка слежения снизилась с 0,026 рад (ПИД) до 0,016 рад (скользящий режим) и 0,018 рад (квази-скользящий режим), что свидетельствует о существенном росте точности. При этом энергопотребление в скользящем и квази-скользящем режимах оказалось на 12–15 % ниже, чем в системе с ПИД-регулятором.

ЛИТЕРАТУРА

4. Pinosky, A., Abraham, I., Broad, A., Argall, B., & Murphey, T. D. (2023). Hybrid control for combining model-based and model-free reinforcement learning. *International Journal of Robotics Research*, 42(6), 337–355. <https://doi.org/10.1177/02783649221083331>
5. Urrea, C. Hybrid Adaptive MPC with Edge AI for 6-DoF Industrial Robotic Manipulators. *Mathematics* 2025, 13, 3066. <https://doi.org/10.3390/math13193066>
6. S. Katayama and T. Ohtsuka, "Whole-body model predictive control with rigid contacts via online switching time optimization," 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022), 2022, pp. 8858–8865.
7. Nathan J. Kong, Chuhanzheng Li, George Council, and Aaron M. Johnson, "Hybrid iLQR Model Predictive Control for Contact Implicit Stabilization on Legged Robots," in *IEEE Transactions on Robotics*, 2023.
8. Garriga-Casanovas, A.; Shakib, F.; Ferrandy, V.; Franco, E. Hybrid Control of Soft Robotic Manipulator. *Actuators* 2024, 13, 242. <https://doi.org/10.3390/act13070242>
9. Gal IA, Ciocirlan AC, Vlădăreanu L. The Hybrid Position/Force Walking Robot Control Using Extenics Theory and Neutrosophic Logic Decision. *Sensors (Basel)*. 2022 May 11;22(10):3663. doi: 10.3390/s22103663. PMID: 35632072; PMCID: PMC9143458.

10. Lokhande, S.; Bao, Y.; Cheng, P.; Shen, D.; Chen, G.; Xu, H. Real-Time Proprioceptive Sensing Enhanced Switching Model Predictive Control for Quadruped Robot Under Uncertain Environment. *Electronics* 2025, 14, 2681. <https://doi.org/10.3390/electronics14132681>
11. Russo, M.; Ceccarelli, M. A Survey on Mechanical Solutions for Hybrid Mobile Robots. *Robotics* 2020, 9, 32. <https://doi.org/10.3390/robotics9020032>
12. Рудаков Р.В. Квази-скользящий режим в дискретных системах управления манипуляторами с электродвигателем: моделирование и адаптивное управление. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки* № 6/3 2025 г.
13. Рудаков, Р. В., Бойков, В. И., Бушуев, А. Б., Быстров, С. В., Литвинов, Ю. В., Нуйя, О. С., & Сержантова, М. В. (2024). Адаптивное управление роботами для работы в условиях действия высоких температур. // *Информационно-управляющие системы*, (4), 12–23. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2024-4-12-23>

© Рудаков Роман Вадимович (rorud007@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»