

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124

¹Цюе У., ¹Рачков М.Ю., ²Гапоненко Е.В.¹Московский политехнический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: garonenkobel@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ РОБОТА МЕТОДОМ АКТИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ И СТРАТЕГИЕЙ НАСЫЩЕНИЯ

Аннотация. Объектом исследования выступает мобильный реконфигурируемый робот с гибридным колесно-гусеничным движителем, обладающий способностью трансформировать кинематическую структуру шасси для преодоления высоких вертикальных препятствий. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежного функционирования механизмов трансформации при использовании бюджетной компонентной базы. В работе решается задача синтеза системы управления, устойчивой к аппаратным ограничениям (зоны нечувствительности, люфты) и нелинейностям приводов. Предложен оригинальный метод активного вертикального сканирования («Stop-and-Scan»), который позволяет компенсировать физические ограничения стандартных ультразвуковых сенсоров, такие как широкая диаграмма направленности и зеркальное отражение. Метод базируется на анализе градиента дистанции при вертикальном перемещении датчика, что обеспечивает достоверное определение геометрических параметров препятствий. Особое внимание уделено управлению линейными актуаторами с червячной передачей, характеризующимися значительным сухим трением. Синтезирован закон управления с использованием высоких коэффициентов усиления в режиме насыщения, позволяющий компенсировать зону нечувствительности привода без потери устойчивости. Результаты математического моделирования и натурных испытаний подтверждают, что предложенный подход обеспечивает минимизацию статической ошибки позиционирования и способствует повышению общей проходимости робота.

Ключевые слова: гибридная кинематика, реконфигурируемый робот, активное сканирование, ультразвуковая локация, управление с насыщением, преодоление препятствий, Arduino Mega.

Введение. В настоящее время развитие мобильной робототехники смещается от создания узкоспециализированных машин к разработке многофункциональных адаптивных систем. Такие роботы востребованы в задачах поисково-спасательных операций, инспекции промышленных объектов и мониторинга труднодоступных территорий [1, 2]. Ключевой проблемой при этом остается обеспечение проходимости. Традиционные колесные платформы обладают высокой энергоэффективностью, но ограничены в преодолении вертикальных препятствий (порогов, ступеней, завалов). Гусеничные шасси обеспечивают высокое сцепление с грунтом, но проигрывают в скорости и маневренности на твердых покрытиях.

Традиционные колесные платформы обладают высоким КПД и скоростью на ровных поверхностях, но их проходимость ограничена диаметром колеса. Они не способны преодолевать вертикальные препятствия (пороги, ступени), высота которых превышает радиус движителя. Гусеничные шасси обеспечивают высокое сцепление с грунтом и проходимость, но проигрывают в скорости, маневренности на твердых покрытиях и энергопотреблении.

Решением данного противоречия является применение гибридных реконфигурируемых схем, сочетающих преимущества колесного и гусеничного хода [3]. Современные исследования [4, 5] подтверждают, что способность изменять геометрию шасси (клиренс, угол атаки гусениц, длину колесной базы) позволяет роботу адаптироваться под текущий рельеф. Однако реализация такой адаптивности сопряжена со сложными задачами управления. В отличие от жестких конструкций, реконфигурируемые системы требуют точной координации множества приводов. Динамика таких роботов на пересеченной местности осложняется нелинейными эффектами взаимодействия движителя с грунтом [6, 7].

Критически важным режимом для таких роботов является «геометрическое замыкание» — состояние, при котором робот фиксирует свою форму для механического зацепления за препятствие, снимая нагрузку с электроприводов [8]. Однако вход в такое состояние требует высокой точности позиционирования механических узлов, что сложно реализовать на практике из-за двух фундаментальных факторов.

Во-первых, это ограничения сенсорной системы бюджетного класса. Использование лида-

ров или стереокамер в массовых сервисных роботах часто экономически нецелесообразно. Стандартные ультразвуковые сенсоры являются доступной альтернативой, но имеют широкую диаграмму направленности (порядка 15–30°) и подвержены переотражениям сигнала [9]. Существующие методы комплексирования датчиков [10, 11] повышают качество восприятия, но для задач точной стыковки с препятствием требуется специализированный алгоритм, исключающий «слепые зоны».

Во-вторых, это ярко выраженная нелинейность исполнительных механизмов. Бюджетные актуаторы, особенно линейные приводы с червячной передачей, характеризуются существенным сухим трением и зоной нечувствительности [12]. Традиционные методы линейного ПИД-регулирования в таких условиях оказываются неэффективными: малые управляющие сигналы не могут преодолеть порог страгивания, что приводит к накоплению статической ошибки позиционирования [13]. Для компенсации нелинейностей наиболее перспективными выглядят стратегии управления с переменной структурой и насыщением [14, 15].

Целью данной работы является разработка и верификация комплексной системы управления мобильным роботом, объединяющей метод активного сканирования среды для точного детектирования препятствий и стратегию управления

с насыщением для компенсации нелинейностей приводов.

Аппаратная архитектура системы. Функциональная схема аппаратной реализации системы управления мобильного трансформируемого робота приведена на рис. 1. Центральным элементом является микроконтроллер Arduino Mega 2560, который выполняет сбор измерительной информации, формирование оценок состояния, а также генерацию управляющих ШИМ-сигналов для исполнительных приводов.

Система управления включает оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder, формирующие квадратурные импульсы, пропорциональные угловому перемещению валов приводов/механизма трансформации, а также ультразвуковой дальномер HC-SR04, установленный на направляющих и обеспечивающий измерение расстояния до препятствий/поверхности в направлении сканирования.

Сигналы энкодеров поступают на входы Arduino и обрабатываются с использованием аппаратных прерываний, что обеспечивает устойчивый подсчёт импульсов при параллельной работе нескольких датчиков. Дальномер HC-SR04 подключён к контроллеру по цифровым входам, измеренная дальность используется в контуре оценки внешней обстановки и при движении.

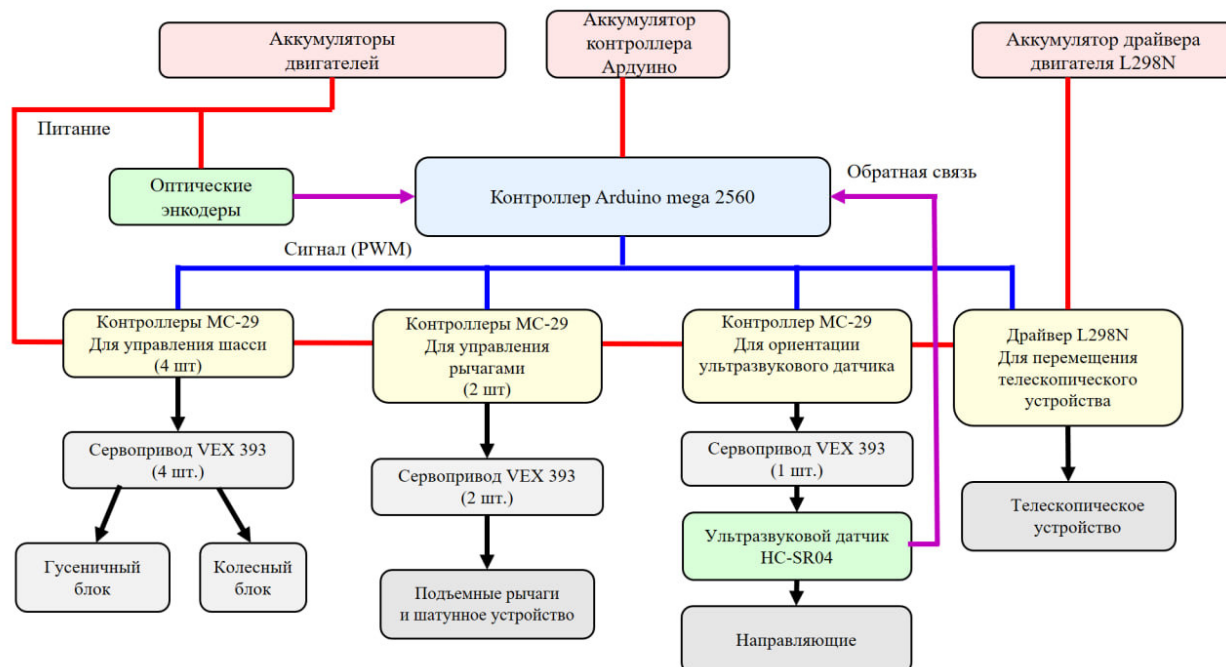


Рис. 1. Схема аппаратной реализации системы управления

Исполнительный уровень представлен двумя группами приводов:

1. Тяговые приводы на базе двигателей VEX 393, управляемые через драйверы Motor Controller 29. Arduino формирует ШИМ-сигналы,

задающие режимы скорости и направления вращения двигателей для колесного и гусеничного блоков, а также для приводов механизма подъёма и шатунного устройства.

2. Линейные актуаторы телескопического устройства, управляемые через двухканальные

драйверы L298N. Они обеспечивают реверс и динамическое торможение для позиционирования штока и фиксации заданного положения.

Обратная связь в системе реализована по измерениям энкодеров и по данным дальномера. Эти измерения используются в вычислительных алгоритмах на Arduino для замыкания дискретных контуров управления (PID-регуляторы) и логики режимов.

Питание организовано отдельно для снижения взаимных помех и просадок напряжения. На схеме отдельно обозначены линии питания, ШИМ-управления и механических связей.

Метод активного сканирования «Stop-and-Scan». Традиционные методы ультразвуковой локации [9, 16] предполагают измерение дистанции при движении робота или стационарном положении датчика. Однако из-за широкого конуса распространения волны ($\approx 15^\circ$) измерение высоты ступенчатого препятствия с одной точки дает большую погрешность.

Для решения этой проблемы разработан метод активного вертикального сканирования. Суть метода заключается в физическом перемещении сенсора вдоль вертикальной оси при неподвижном шасси. Алгоритм работы системы (рис. 2) включает следующие этапы:

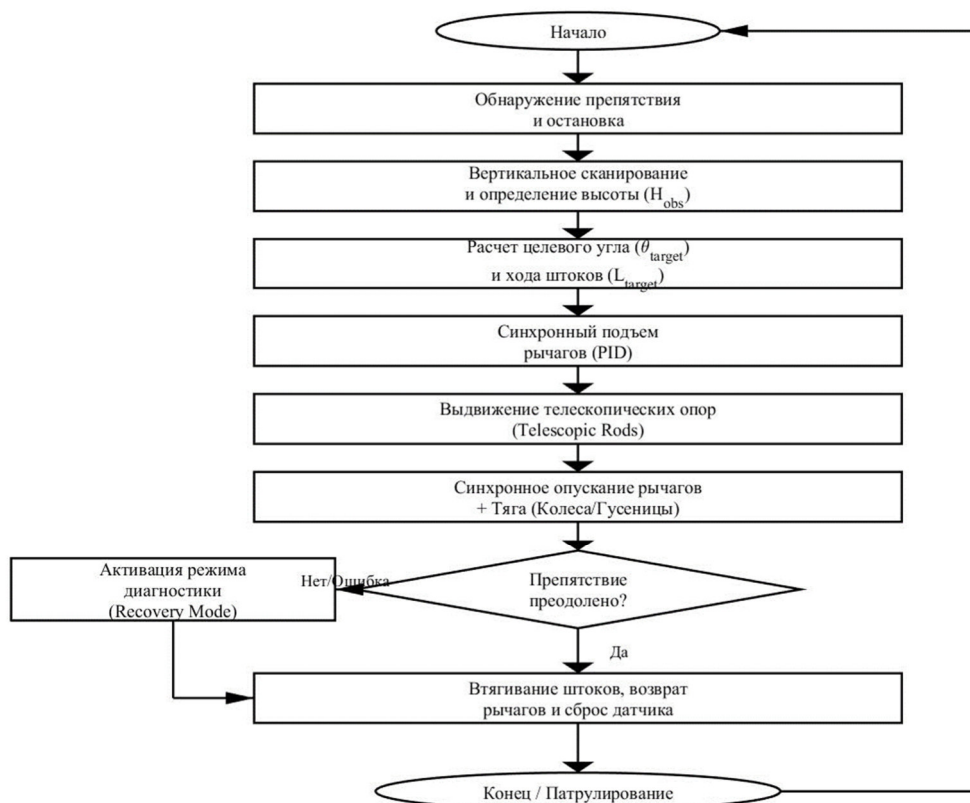


Рис. 2. Блок-схема алгоритма активного сканирования и реконфигурации

Алгоритм работы системы управления разделен на три последовательных этапа: восприятие среды, принятие решений и исполнение.

Этап 1. Восприятие и принятие решений.

1. Обнаружение препятствия и остановка.

Робот движется по заданному маршруту и непрерывно контролирует пространство впереди ультразвуковым дальномером. Когда датчик обнаруживает препятствие впереди, срабатывает прерывание, робот немедленно прекращает движение и переходит в режим «Stop-and-Scan».

2. Вертикальное сканирование и определение высоты H_{obs} .

Поскольку ультразвуковой дальномер обладает широким углом направленности ($\approx 15^\circ$), что приводит к неоднозначности отражений и снижению точности при фиксированном положении датчика, в системе реализовано активное управление вертикальным перемещением кронштейна с датчиком.

Текущая высота сенсора $h_{sens}(t)$ получается путем интегрирования вертикальной скорости v_z :

$$h_{sens}(t) = h_{init} + \int_0^t v_z(\tau) d\tau,$$

где h_{init} – начальная высота, v_z – скорость вертикального перемещения сенсора.

Система не использует показания дальности напрямую, а вычисляет пространственный градиент расстояния D относительно изменения высоты $\nabla D(h)$ для идентификации верхней кромки препятствия:

$$\nabla D(h) \approx \frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{v_z \cdot \Delta t}$$

Логика принятия решения: когда абсолютное значение градиента превышает адаптивный порог Δ_{thr} (т.е. $|\nabla D(h)| > \Delta_{thr}$), фиксируется обнаружение края препятствия, и текущая высота принимается за высоту препятствия H_{obs} . Этот метод позволяет удерживать ошибку измерения в пределах 1,5%.

3. Расчет целевых параметров (угла θ_{target} и хода штоков L_{target})

На основе измеренной высоты препятствия H_{obs} система решает уравнения обратной кинематики и рассчитывает целевую конфигурацию, в которую должен трансформироваться робот.

Управление реализуется по двум взаимосвязанным каналам: первый канал задаёт целевой угол наклона передних рычагов (соответствует θ_{target} на блок-схеме в тексте), второй канал задаёт целевую длину телескопических штоков L_{target} .

Этап 2. Реконфигурация и нелинейное управление.

4. Синхронный подъем рычагов.

Это ключевой этап алгоритма. Для обеспечения точного достижения расчетного угла наклона θ_{target} , необходимо компенсировать влияние существенных нелинейных факторов, таких как сухое трение и люфты в механических передачах. В качестве альтернативы классическому линейному ПИД-регулятору в работе предлагается закон управления с насыщением и высоким коэффициентом усиления. Использование режима насыщения позволяет временно разомкнуть контур обратной связи, фиксируя управляющее воздействие на предельном уровне (по знаку и величине).

Уравнение управления в дискретной форме имеет вид:

$$u_k = \text{sat} \left(K_p e_k + K_I \sum e_j + K_D \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right),$$

где e_k – текущая ошибка положения,

$\text{sat} \left(K_p e_k + K_I \sum e_j + K_D \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right)$ — функция насыщения, ограничивающая напряжение в допустимом для драйвера диапазоне.

Пропорциональный коэффициент K_p устанавливается большого значения (в работе принято $K_p = 45$). Это приводит к тому, что даже

при очень малой ошибке e_k контроллер выдает максимальное напряжение U_{max} . Такой высокий коэффициент усиления мгновенно создает момент, достаточный для преодоления силы трения покоя, устраняя «мертвую зону» и статическую ошибку, характерные для обычного управления (снижение с 8,0 мм до 0,2 мм).

5. Выдвижение телескопических опор.

Одновременно с подъемом передних рычагов, линейные приводы выдвигают телескопический механизм на целевую длину L_{target} . Здесь также применяется вышеописанная стратегия управления с насыщением для обеспечения точности.

6. Синхронное опускание и тяга.

Робот опирает передние рычаги на препятствие и, используя тяговое усилие гусениц и колес, поднимает все шасси.

Этап 3. Завершение и сброс.

7. Подтверждение преодоления и сброс.

На этом этапе производится проверка, полностью ли корпус робота преодолел препятствие.

Если условие выполнено, происходит втягивание штоков, возврат рычагов и сенсора в исходное положение, робот возвращается в исходную конфигурацию, завершает текущий цикл и продолжает движение. Если условие не выполнено или возникла ошибка, активизируется диагностическая программа для восстановления движения или формируется сообщение об ошибке.

Структура двухканальной системы управления. Для реализации точной реконфигурации на основе данных сканирования (H_{obs}) система управления была декомпозирована на два независимых канала.

На рисунке 3 представлена структурная схема системы, декомпозированная на два независимых контура управления. Элемент сравнения (обозначенный как «-») выполняет алгебраическое суммирование задающего воздействия $g(t)$ и сигнала отрицательной обратной связи, формируя сигнал ошибки $\epsilon(t)$. Регулятор $W_c(s)$, реализованный программно на микроконтроллере, преобразует ошибку в управляющее напряжение $u(t)$ в соответствии с синтезированным законом управления с насыщением. Объект управления $W_o(s)$ представляет собой динамическую модель электропривода и механической передачи, выходной величиной которой является кинематический параметр $y(t)$ (высота или скорость). Звено $W_{fb}(s)$ описывает передаточную функцию датчиков (энкодеров), замыкающих контур управления.

Таблица 1

Соответствия математических символов и их физического смысла в работе

Символ	Название (Теория управления)	Физический смысл в системе
$g(t)$	Задающее воздействие	Цель. Для Канала 1: Целевая высота подъема h_{ref} или угол рычагов. Для Канала 2: Целевая скорость V_{ref} или дистанция перемещения.
$\epsilon(t)$	Ошибка рассогласования	Разница. Отклонение текущего положения робота от заданного. Это значение поступает на вход ПИД-регулятора.
$W_c(s)$	Передаточная функция регулятора	Программа (Arduino). Алгоритм (ПИД + Насыщение), который вычисляет, какую мощность нужно подать на мотор, чтобы устранить ошибку ϵ .
$u(t)$	Управляющее воздействие	Напряжение/PWM. Сигнал широтно-импульсной модуляции (0–255), который микроконтроллер посылает на драйвер мотора (L298N или MC-29).
$W_o(s)$	Передаточная функция объекта	Железо. Совокупность драйвера, электродвигателя, редуктора и механической нагрузки (рычаги, колеса). Преобразует напряжение в движение.
$y(t)$	Выходная величина	Результат. Реальная текущая высота робота $h(t)$ или реальная скорость $V(t)$.
$W_{fb}(s)$	Передаточная функция обратной связи	Датчик. Энкодер или потенциометр. Он измеряет физический выходу $y(t)$ и преобразует его в цифровой сигнал для сравнения с целью $g(t)$.

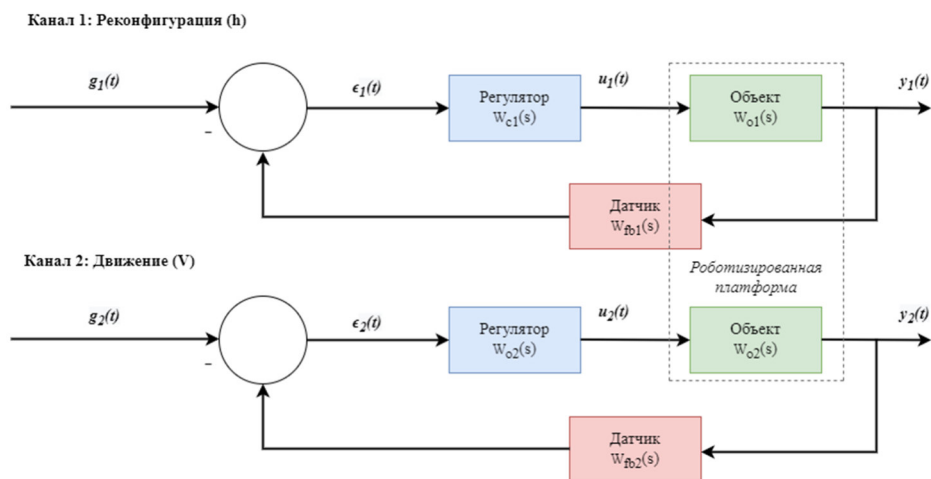


Рис. 3. Архитектура системы управления с вычислительными блоками

Синтез двухканальной системы управления реконфигурацией. Проектирование системы управления базируется на методах мехатронного подхода [17, 18]. Система декомпозирована на два канала: управление углом наклона

(α) и длиной вылета рычагов (L). Для исследования динамики разработана модель в MATLAB/Simulink (рис. 4), учитывающая ограничения напряжения драйверов (± 12 В).

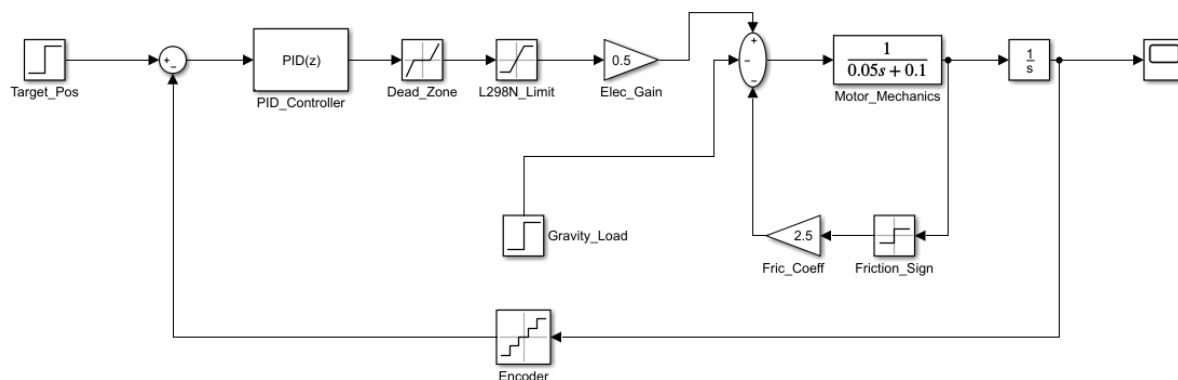


Рис. 4. Структурная схема нелинейной модели управления приводом

Схема состоит из следующих ключевых блоков:

1. ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие $u(t)$ на основе ошибки рассогласования $e(t) = q_{ref} - q_{actual}$. В рамках предложенного подхода реализован алгоритм с высоким коэффициентом пропорционального усиления ($K_p = 45$) для обеспечения быстродействия.

2. Блок насыщения моделирует аппаратные ограничения драйвера двигателя L298N. Этот блок ограничивает выходное напряжение регулятора диапазоном $[-12V, +12V]$, что соответствует напряжению бортовой сети робота. Это позволяет анализировать поведение системы в нелинейном режиме, когда регулятор «упирается» в потолок питания.

3. Динамика исполнительного механизма (актуатора) описывается передаточной функцией второго порядка $W(s) = \frac{K}{s(T_s+1)}$, отражающей электромеханические свойства ротора.

4. Блок сухого трения является критически важным элементом модели, имитирующим зону нечувствительности редуктора. Он вводит в систему возмущение, препятствующее началу движения при малых напряжениях ($U < U_{dead} \approx 3V$), что и вызывает появление статической ошибки в классических системах, которую устраняет предложенный метод высокого усиления.

Анализ переходных процессов в линейной зоне (без учета сухого трения) показывает, что система с подобранными коэффициентами ($K_p = 9$, $K_d = 3$) обладает аperiodическим характером переходного процесса без перерегулирования, как показано на рис. 5, что критически важно для предотвращения механических ударов.

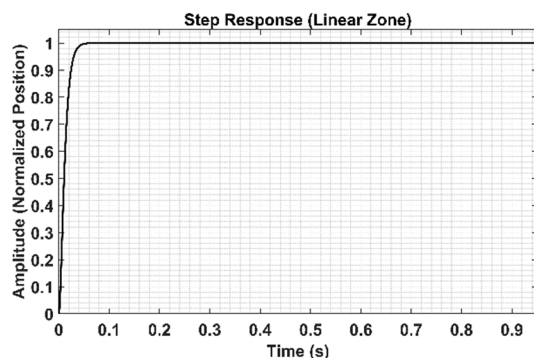


Рис. 5. Переходная характеристика системы позиционирования в линейной зоне

На рис. 5 представлена реакция системы на единичное ступенчатое воздействие в идеализированных условиях, когда моментом сухого трения можно пренебречь. Моделирование выполнено с настроечными коэффициентами ПИД-регулятора $K_p = 9$ и $K_d = 3$.

Анализ кривой на рис. 5 показывает, что процесс установления происходит монотонно, без колебаний и перерегулирования (выход за уровень 1.0 отсутствует). Это является критическим требованием для механизма реконфигурации, так как любое перерегулирование могло бы привести к жесткому механическому удару рычагов об ограничитель. Время нарастания (t_r) составляет менее 0.1 с, что свидетельствует о высокой динамике системы в линейной зоне.

Исследование нелинейной динамики и обоснование стратегии насыщения. В реальных условиях стандартные приводы обладают зоной нечувствительности, вызванной сухим трением. Применение линейного управления в таких системах ограничено физическими пределами привода [12]. Для оценки влияния нелинейностей проведено моделирование с консервативными настройками линейного регулятора ($K_p = 1$). Как видно из рис. 6, система останавливается с недопустимой статической ошибкой $\delta_{st} \approx 8,0$ мм, так как управляющее напряжение не может преодолеть порог страгивания.

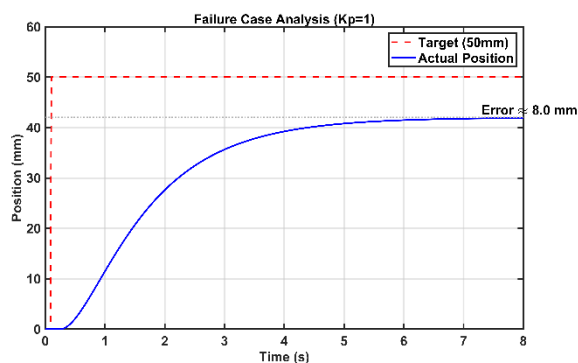


Рис. 6. Возникновение статической ошибки при линейном управлении с малым коэффициентом усиления

Следует отметить, что даже использование номинальных коэффициентов линейного регулятора ($K_p = 9$), хотя и уменьшает ошибку, не позволяет достичь требуемой субмиллиметровой точности из-за физической природы трения.

Для полного устранения ошибки применена стратегия управления с использованием высокого коэффициента усиления в условиях ограничений на управление.

Суть метода заключается в намеренном введении привода в режим отсечки. Насыщение сигнала — это состояние, когда обратная связь оказывается фактически разомкнутой, т.е. сигнал ошибки (в пределах зоны насыщения) не влияет на управляющее воздействие и остается неизменным по величине (максимальное напряжение U_{max}), меняясь лишь по знаку.

Увеличение коэффициента до $K_p = 45$ приводит к тому, что даже при минимальном рассогласовании регулятор выдает максимальное напряжение, мгновенно преодолевая момент трения покоя. Результаты моделирования (рис. 7)

показывают снижение расчетной статической ошибки до 0,2 мм, что гарантировало надежное геометрическое замыкание механизма в ходе натурных испытаний.

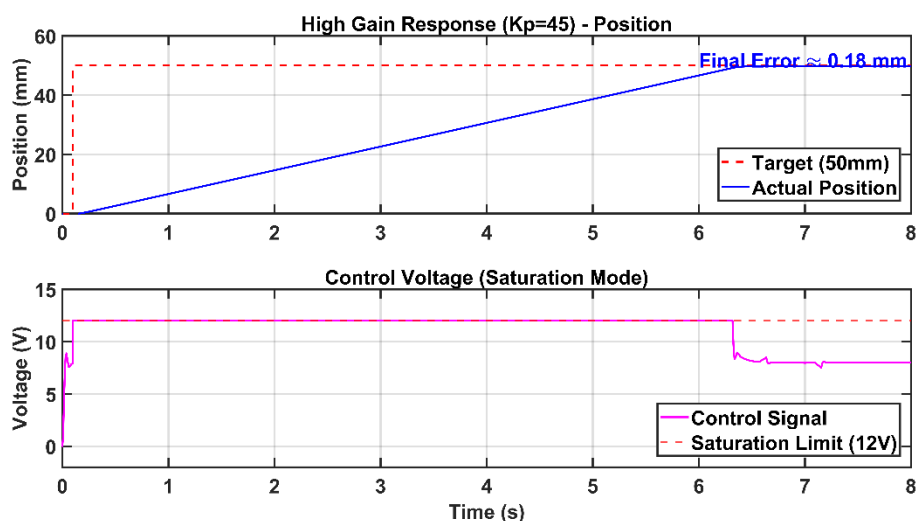


Рис. 7. Динамика системы с высоким коэффициентом усиления ($K_p = 45$) под нагрузкой.
(Сверху: позиция; снизу: управляющее напряжение)

Частотный анализ устойчивости. Для оценки динамических свойств синтезированной системы проведен частотный анализ. На рисунке 8 представлены логарифмические амплитудная

(верхний график) и фазовая (нижний график) частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) замкнутого контура управления.

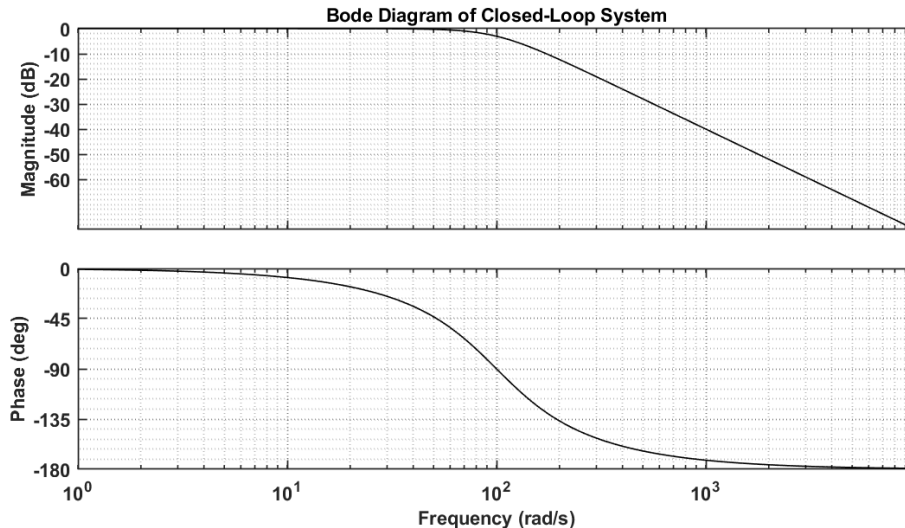


Рис. 8. Логарифмические частотные характеристики (диаграмма Бode) замкнутой системы реконфигурации

Из графиков видно, что полоса пропускания системы (частота, при которой амплитуда падает на -3 дБ) составляет порядка 60 рад/с (≈ 10 Гц). Это подтверждает, что привод способен своевременно обрабатывать команды реконфигурации без существенных задержек.

Фазовая характеристика в рабочем диапазоне частот не пересекает критическую отметку -

180°. Запас по фазе составляет более 45°, что гарантирует абсолютную устойчивость системы даже при наличии нелинейностей и вариации параметров нагрузки. Отсутствие резонансных пиков на ЛАЧХ свидетельствует об аperiodическом характере переходных процессов без перерегулирования.

Полоса пропускания системы составляет $\omega_b \approx 60$ рад/с (около 10 Гц), что обеспечивает

достаточное быстроедействие для задач реконфигурации.

Выводы.

1. Разработана архитектура системы управления, которая, в отличие от аналогов, использует иерархическую структуру с разделением на каналы реконфигурации и движения. Это упрощает масштабирование системы.

2. Предложен метод активного сканирования «Stop-and-Scan», который устраняет главный недостаток ультразвуковых сенсоров – диетного анализа при вертикальном перемещении датчика позволило снизить погрешность измерения высоты препятствий до 1,5 %.

3. Обоснована стратегия управления с насыщением. Доказано, что для электроприводов, характеризующихся существенными нелинейностями (высоким сухим трением, зоной нечувствительности), классические линейные законы управления неэффективны. Введение высокого коэффициента усиления в сочетании с ограничением сигнала позволило уменьшить ошибку позиционирования с 8 мм до 0,2 мм, что обеспечивает надежное геометрическое замыкание механизмов робота независимо от класса используемых приводов.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Li Lei, Ye Tao, Tan Min. Research Status and Future of Mobile Robot Technology // Robot. 2002. Vol. 24, No. 5. Pp. 475–480.
- Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable Autonomous Wheel-Tracked Robot // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE, 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742999.
- Cheah W., Lee T., Kim J., Li X., Chan S. MIRRAX: A Reconfigurable Robot for Limited Access Environments // IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, No. 5. Pp. 2942–2954. DOI: 10.1109/TRO.2021.3130455.
- Wang Y., Liu Z., Zhang H., Zhao J., Li Z., Zhang X. A Reconfigurable Wheel-Tracked Mobile Robot: Mechanism Design and Terrain Traversability Analysis // Autonomous Robots. 2024. Vol. 48. Pp. 112–125. DOI: 10.1007/s10514-023-10145-z.
- Kim J., Han K., Cho S., Lee S., Park J. Stair-Climbing Wheeled Robot Based on Rotating Locomotion of Curved-Spoke Legs // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 11. 4505 p. DOI: 10.3390/app14114505.
- Iagnemma K., Dubowsky S. Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain // The International Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23. Pp. 1029–1040. DOI: 10.1177/0278364904047610.
- Hirose S., Fukushima E.F. Design of Terrain Adaptive Versatile Crawler Vehicle Helios-VI // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 3. Pp. 1540–1545. DOI: 10.1109/IROS.2001.977202.
- Ben-Tzvi P., Givon L., Tzukrel D., Shomron A., Levanon A. Autonomous Alignment and Docking Control for a Self-Reconfigurable Modular Mobile Robotic System // Actuators. 2024. Vol. 13, No. 5. Art. 81. DOI: 10.3390/act13050181.
- Borenstein J., Koren Y. Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995. Vol. 11, No. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.1109/70.345941.
- Yuan Z., Li Z., Liu Z., Zhang Y., Wu J., Wang L. Obstacle Avoidance of Multi-Sensor Intelligent Robot Based on Road Sign Detection // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6777. DOI: 10.3390/s21206777.
- Almakhles D. Mobile Robot Obstacle Detection and Avoidance with NAV-YOLO // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2024. Vol. 13, No. 2. Pp. 219–225. DOI: 10.18178/ijmerr.13.2.219-225.
- Khalil H.K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 750 p. ISBN: 0-13-067389-7.
- Spong M.W., Hutchinson S. Robot Modeling and Control. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. 407 p.
- Rotondo D., Cacace J., Del Prete D., Salatino A., Rota M., Mancuso S. Real-Time Nonlinear Control Allocation Framework for Vehicles with Highly Nonlinear Effectors Subject to Saturation // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2023. Vol. 108. Art. 67. DOI: 10.1007/s10846-023-01860-2.
- Zhang X., Li M., Liu Y., Sun W., Chen Z. Nonlinear Adaptive Optimal Control Design and Implementation for Trajectory Tracking of Mobile Robots // Mathematics. 2024. Vol. 12, No. 24. 4013 p. DOI: 10.3390/math12244013.
- Kuc R. A Spatial Sampling Criterion for Sonar Obstacle Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12, No. 7. Pp. 686–690. DOI: 10.1109/34.56209.
- Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
- Рыбак Л.А., Малышев Д.И., Гапоненко Е.В., Перевузник В.С., Волошкин А.А. Имитационная модель системы управления динамической платформой подвижности на базе гексапода для

тренажерных комплексов // Вестник НИЯУ МИФИ. 2022. Т. 11, № 5. С. 358–365.
DOI: 10.26583/vestnik.2022.7.

Информация об авторах

Цюе У. Аспирант кафедры «Автоматики и управления». E-mail: gg1253366@gmail.com. Московский политехнический университет. Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38.

Рачков Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматики и управления». E-mail: michuor@gmail.com. Московский политехнический университет. Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38.

Гапоненко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.01.2026 г.

© Цюе У., Рачков М.Ю., Гапоненко Е.В., 2026

¹Que Wu, ¹Rachkov M.Yu., ²Gaponenko E.V.

¹Moscow Polytechnic University

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: gaponenkobel@gmail.com

CONTROL OF ROBOT RECONFIGURATION USING ACTIVE SCANNING METHOD AND SATURATION STRATEGY

Abstract. The object of this study is a mobile reconfigurable robot with a hybrid wheel-track locomotion system capable of transforming the kinematic structure of its chassis to overcome high vertical obstacles. The relevance of this work is driven by the need to ensure the reliable operation of transformation mechanisms while using low-cost components. This paper addresses the problem of synthesizing a control system that is robust to hardware limitations (dead zones, backlash) and actuator nonlinearities. A novel active vertical scanning method ("Stop-and-Scan") is proposed, which allows for compensating for the physical limitations of standard ultrasonic sensors, such as wide beam width and specular reflection. The method is based on analyzing the distance gradient during the vertical displacement of the sensor, ensuring the accurate determination of obstacle geometric parameters. Particular attention is paid to the control of linear actuators with worm drives, which are characterized by significant dry friction. A control law using high gains in saturation mode has been synthesized, allowing for the compensation of the actuator dead zone without compromising stability. The results of mathematical modeling and field tests confirm that the proposed approach minimizes steady-state positioning error and improves the overall trafficability of the robot.

Keywords: hybrid kinematics, reconfigurable robot, active scanning, ultrasonic localization, saturation control, obstacle negotiation, Arduino Mega.

REFERENCES

1. Li Lei, Ye Tao, Tan Min. Research Status and Future of Mobile Robot Technology. Robot. 2002. Vol. 24, No. 5. Pp. 475–480.
2. Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable Autonomous Wheel-Tracked Robot. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE, 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742999.
3. Cheah W., Lee T., Kim J., Li X., Chan S. MIRRAX: A Reconfigurable Robot for Limited Access Environments. IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, No. 5. Pp. 2942–2954. DOI: 10.1109/TRO.2021.3130455.
4. Wang Y., Liu Z., Zhang H., Zhao J., Li Z., Zhang X. A Reconfigurable Wheel-Tracked Mobile Robot: Mechanism Design and Terrain Traversability Analysis. Autonomous Robots. 2024. Vol. 48. Pp. 112–125. DOI: 10.1007/s10514-023-10145-z.
5. Kim J., Han K., Cho S., Lee S., Park J. Stair-Climbing Wheeled Robot Based on Rotating Locomotion of Curved-Spoke Legs. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 11. 4505 p. DOI: 10.3390/app14114505.
6. Iagnemma K., Dubowsky S. Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain. The International Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23. Pp. 1029–1040. DOI: 10.1177/0278364904047610.

7. Hirose S., Fukushima E.F. Design of Terrain Adaptive Versatile Crawler Vehicle Helios-VI. Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 3. Pp. 1540–1545. DOI: 10.1109/IROS.2001.977202.
8. Ben-Tzvi P., Givon L., Tzukrel D., Shomron A., Levanon A. Autonomous Alignment and Docking Control for a Self-Reconfigurable Modular Mobile Robotic System. *Actuators*. 2024. Vol. 13, No. 5. Art. 81. DOI: 10.3390/act13050181.
9. Borenstein J., Koren Y. Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1995. Vol. 11, No. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.1109/70.345941.
10. Yuan Z., Li Z., Liu Z., Zhang Y., Wu J., Wang L. Obstacle Avoidance of Multi-Sensor Intelligent Robot Based on Road Sign Detection. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6777. DOI: 10.3390/s21206777.
11. Almakhles D. Mobile Robot Obstacle Detection and Avoidance with NAV-YOLO. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2024. Vol. 13, No. 2. Pp. 219–225. DOI: 10.18178/ijmerr.13.2.219-225.
12. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 750 p. ISBN: 0-13-067389-7.
13. Spong M.W., Hutchinson S. *Robot Modeling and Control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. 407 p.
14. Rotondo D., Cacace J., Del Prete D., Salatino A., Rota M., Mancuso S. Real-Time Nonlinear Control Allocation Framework for Vehicles with Highly Nonlinear Effectors Subject to Saturation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2023. Vol. 108. Art. 67. DOI: 10.1007/s10846-023-01860-2.
15. Zhang X., Li M., Liu Y., Sun W., Chen Z. Nonlinear Adaptive Optimal Control Design and Implementation for Trajectory Tracking of Mobile Robots. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 24. 4013 p. DOI: 10.3390/math12244013.
16. Kuc R. A Spatial Sampling Criterion for Sonar Obstacle Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1990. Vol. 12, No. 7. Pp. 686–690. DOI: 10.1109/34.56209.
17. Poduraev Yu.V. *Mechatronics: Fundamentals, Methods, Application*. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 256 p. (rus)
19. Rybak L.A., Malyshev D.I., Gaponenko E.V., Perevuznik V.S., Voloshkin A.A. Optimization of PID Controller Parameters for the Control System of a Hexapod-Based Dynamic Motion Platform for Training Simulators. *Bulletin of the National Research Nuclear University “MEPhI”*. 2022. Vol. 11, No. 3. Pp. 254–259. DOI: 10.26583/vestnik.2022.7. (rus)

Information about the authors

Wu Que. Postgraduate student. E-mail: gg1253366@gmail.com. Moscow Polytechnic University. Russia, 107023, Moscow Bolshaya Semyonovskaya str., 38.

Rachkov, Michael Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control. E-mail: michyur@gmail.com. Moscow Polytechnic University. Russia, 107023, Moscow Bolshaya Semyonovskaya str., 38.

Gaponenko, Elena V. PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 28.01.2026

Для цитирования:

Цюе У., Рачков М.Ю., Гапоненко Е.В. Управление реконфигурацией робота методом активного сканирования и стратегией насыщения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124

For citation:

Wu Que, Rachkov M.Yu., Gaponenko E.V. Control of robot reconfiguration using active scanning method and saturation strategy. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 5. Pp. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124