

УДК 629.05

Разработка и исследование многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ23 для автоматизации производственной инспекции

Морозов Егор Павлович

Комаров Дмитрий Алексеевич

Мурашов Михаил Владимирович (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено современное состояние робототехники и автоматизация производственных процессов с особым вниманием к многоцелевым мобильным робототехническим комплексам (ММРК). Представлен оригинальный подход к проектированию и созданию инновационного комплекса КДМЕ23, способного эффективно справляться с широким спектром задач в различных отраслях промышленности, обороне и чрезвычайных ситуациях. Особый акцент делается на повышении адаптивности, управляемости и надежности робототехнических систем, обеспечивающих надежное функционирование в сложных условиях окружающей среды. Комплекс оснащен уникальной цифровой платформой, способствующей быстрому проектированию, изготовлению и настройке систем, а также предоставлению пользователям исчерпывающих проектных документов, смет и конструкторских чертежей.

Ключевые слова: робототехника, автоматизация производства, многоцелевой робототехнический комплекс, адаптация и надежность, проходимость и универсальность, инновационные инженерные решения, цифровая платформа

Введение. Робототехника играет ключевую роль в модернизации и автоматизации современных производственных процессов. Многокомпонентные робототехнические комплексы стали неотъемлемым инструментом повышения эффективности, безопасности и конкурентоспособности предприятий. Одной из значимых тенденций является стремление к созданию высокофункциональных и надежных систем, способных работать в жестких условиях и оперативно реагировать на меняющиеся потребности производства [1]. Многоцелевой мобильный робототехнический комплекс КДМЕ23 воплощает эти тенденции, предлагая инновационное решение для задач транспортной логистики, диагностики, инспекций и аварийно-спасательных мероприятий. Касательно данных областей важным аспектом транспортной логистики остается преодоление сложных и овражных поверхностей, таких как неровные полы в цехах, на предприятиях, городская местность с бордюрами, переездами и т. п.

Рассмотрим показательный пример, наглядно иллюстрирующий особенности представленного многоцелевого мобильного робототехнического комплекса (ММРК). Сегодняшний уровень автоматизации производства стремительно растет, однако техническое обслуживание сложных устройств и линий требует регулярного контроля и диагностики. Инженеры, несущие ответ-

ственность за проведение осмотров, зачастую сталкиваются с нехваткой времени для осуществления качественного планового ремонта либо даже простой визуальной инспекции оборудования. Более того, выполнение такой процедуры иногда сопряжено с риском для здоровья и жизни специалистов.

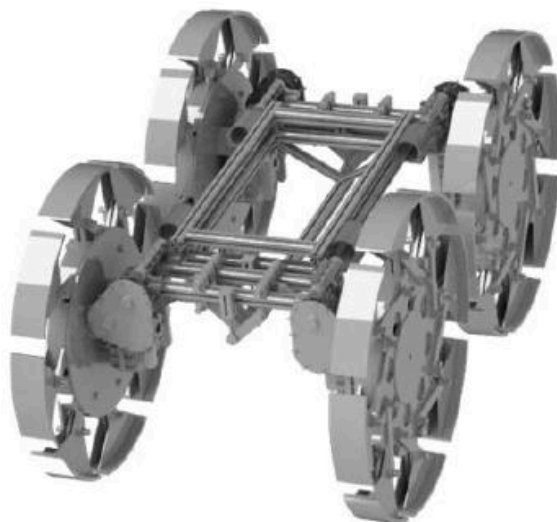
Изучив современный опыт применения робототехники, мы выявили недостатки существующих решений, а также получили общие требования к данному типу задач, и, исходя из последних, был разработан новый мобильный многофункциональный роботизированный комплекс, технические характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики КДМЕ23

Параметр	Значение
Максимальная скорость движения	60 км/ч
Подвеска	Активная подвеска Кристи
Грузоподъемность	До 100 кг
Аккумуляторная батарея	2 штуки емкостью 66Ач
Время непрерывной работы	Более 8 часов
Тип привода	Бесколлекторный электродвигатель постоянного тока
Колесная база	Регулируемая от 0,5 до 1,5 м
Управление	Автономное и ручное
Проходимость	Включает способность подъема по лестницам и передвижение по неровным поверхностям

В ходе проектирования и реализации цифровых моделей и последующей реализации прототипов была создана следующая 3D-модель комплекса с интеграцией математической модели на рис. 1.

**Рис. 1.** 3D-модель многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ23

В результате анализа существующих решений на российском рынке, а также рассмотрения существующих патентов и инновационных разработок, доступных в открытом доступе, были выделены следующие робототехнические комплексы.

СТР-1 — первый специализированный транспортный робот, который был создан для ликвидации катастрофы на ЧАЭС (Чернобыльской атомной электростанции), в том числе данный робот лег в основу современных луноходов [2].

Робот серии Т от компании «СМП» Роботикс — серия мобильных роботов, направленная на видеонаблюдение, как в охранном направлении, так и в диагностическом [3].

Ровер Яндексa — автономное устройство компании «Яндекс» для доставки грузов, посылок, почты. Работает с 2019 года [4].

Мобильный робот «Инженер» компании Сервосила — многоцелевой мобильный робот, предназначенный для применения в следующих областях: пожарные службы, опасные производства, инженерные и эксплуатационные службы, эксплуатация туннелей и шахт [5].

Российский патент RU2580779C2 (Мобильный роботизированный комплекс пожаротушения) — малогабаритный, автономный робот для пожаротушения [6].

Американский патент US11565759B2 (Robotic platform)– специализированная робототехническая платформа для преодоления лестниц [7].

Американский патент US20130231814A1 (Stair-climbing surveillance vehicle) — Автономный мобильный робот для преодоления лестниц [8].

Робот «Снежинка», разработанный в технологическом институте Кюсю — робот способный передвигаться по лестницам, используя свои гибкие «ноги» [9].

Все эти решения имеют как свои плюсы, так и недостатки, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные недостатки аналогов КДМЕ23

Название	Недостатки
СТР-1	Непригоден для повсеместного использования, ограничен возможностями космических технологий
Робот серии Т от «СМП» Роботикс	Крайне узкоспециализирован, маленький запас хода, высокая чувствительность к низким температурам
Ровер от «Яндекс»	Проблемы с проходимостью, невозможен ручной контроль
Мобильный робот «Инженер» от Сервосилы	Малая грузоподъемность, низкая скорость, невозможность работы при низких температурах
Российский патент RU2580779C2	Низкая скорость, узкая колесная база, ориентирован на конкретные системы пожаротушения

Окончание табл. 2

Название	Недостатки
Американский патент US11565759B2	Нет возможности перевозить грузы, предназначен исключительно для разведывательных целей
Американский патент US20130231814A1	Очень неустойчив при подъеме, пригоден лишь для складских условий
Робот «Снежинка» от Китайского технологического института Кюсю	Невозможность преодоления лестниц с меняющейся высотой ступеней

Таким образом, делая общий вывод из приведенных аналогов, мы можем выделить следующие преимущества КДМЕ23 — табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительная таблица преимуществ КДМЕ23
относительно существующих аналогов**

Преимущества КДМЕ23	Подобные системы
Универсальность	Узконаправленность и специализированность
Быстрое проектирование и настройка	Длительная подготовка и отсутствие платформ для настройки
Возможность регулировки габаритов	Жесткие размеры и неизменяемые параметры
Поддержка адаптивных колес и подвески	Ограниченные возможности подъема по лестницам и неровностям
Интеграция цифровой платформы	Отсутствие интегрированных систем проектирования и документации
Широкий диапазон эксплуатационных условий	Ограниченные рабочие условия и климатические пределы
Автоматический подбор компонентов	Необходимость ручного подбора комплектующих
Надежность и выносливость	Медленное передвижение и низкие показатели груза
Автономность	Зависимость от постоянного вмешательства оператора

Проведенный аналитический обзор позволяет заключить, что разработанный ММРК представляет собой эффективное решение для задач технического осмотра и инспекции производственных помещений, обладая значительными преимуществами перед имеющимися аналогами.

Следует отметить, что при исследовании возможных конструкций акцент был сделан исключительно на классах колесных и гусеничных мобильных

платформ, поскольку сравнение с антропоморфными роботами («собаками») признано нецелесообразным ввиду присущих последним ограничений: недостаточной устойчивости, неспособности передвигаться по гладким наклонным поверхностям и иных факторов, оказывающих существенное влияние на процесс обследования и качество визуального контроля. Основные механические компоненты предложенной системы включают следующие элементы:

- модифицированная подвеска Кристи;
- специализированная система адаптивных колес;
- механизм регулировки угла наклона осей («развала»), интегрированный с использованием модульных редукторов.

Эти конструктивные решения обеспечивают высокий уровень маневренности и проходимости, позволяя эффективно перемещаться по лестничным маршам и сложным рельефам поверхности.

Инновационные компоненты. Практически каждая конструкция мобильного колесного комплекса базируется на наличии подвески, выполняющей функции необходимой амортизации колебаний. Особенностью представленных разработок является использование активной модификации классической подвески Кристи, которая обеспечивает регулировку жесткости демпфирующих элементов. Это позволяет обеспечить устойчивое перемещение по сложному рельефу местности, а также динамически изменять угол наклона корпуса относительно горизонта, обеспечивая надежность движения по наклонным поверхностям. Помимо этого подвеска зачастую является одной из самых не стандартных и сложных, со стороны расчета комплекса, деталью. 3D-модель разработанной подвески представлена на рис. 2.

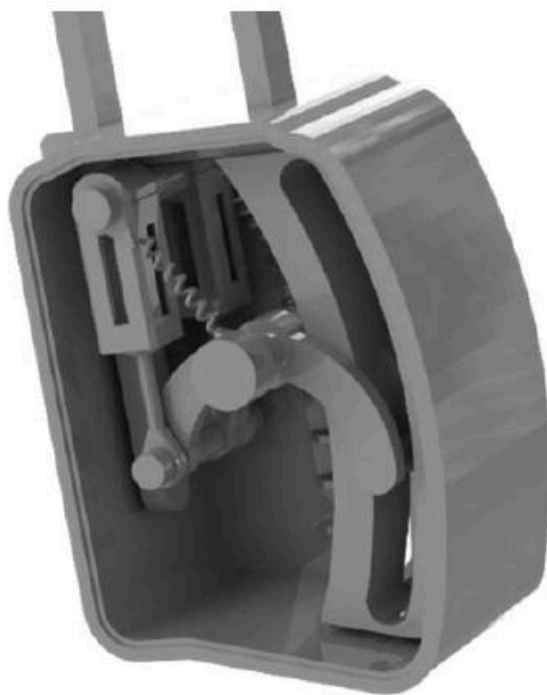


Рис. 2. 3D-модель модифицированной подвески Кристи

Полноценный расчет математической данного компонента представлен в статьях [10, 11]. В данной статье дополняя существующий расчет аналитическими зависимостями с прочностного расчета и испытаний, получим ограничения, задаваемые системой неравенств

$$\begin{cases} \frac{M_{\Sigma}\Omega_{\omega}R^2\left(\frac{\Omega_{\omega}}{\Phi_{\omega}+\Psi_{\omega}-3(\Omega_{\omega}-0,58)}\right)^2}{2(\Phi_F+\Psi_F-\Omega_F)} \leq 0,1, \\ \frac{N}{\sigma_T Sh} + \frac{\alpha_{\sigma}-\beta_{\sigma}-\gamma_{\sigma}}{\sigma_T Sh^2 N} \geq 2,5, \end{cases}$$

где Ω_F — параметр, зависящий только от характеристик подвески при динамическом нагружении; Φ_F — параметр характера движения при динамическом нагружении; Ψ_F — конкретизирующий параметр движения при динамическом нагружении; M_{Σ} — суммарная динамическая нагрузка; R — радиус дугового звена подвески; α_{σ} , β_{σ} , γ_{σ} — силовые параметры. Все параметры вычисляются по формулам

$$\Omega_F = 2293,64 - 779,26b + 0,005a,$$

$$\Phi_F = (|\Delta\varphi| + 2\pi)e^{|\Delta\varphi|+2\pi} - 2e^{|\Delta\varphi|+2\pi} - \frac{2}{3}(|\Delta\varphi| + 2\pi),$$

$$\Psi_F = \frac{a}{2}(|\Delta\varphi| + 2\pi)^3 - b\frac{(|\Delta\varphi| + 2\pi)^4}{4} - 3(\Omega_{\omega} - 0,58)(|\Delta\varphi| + 2\pi),$$

$$\alpha_{\sigma} = 6R(G - F_{\text{сопр.}} \sin \psi)(G - G_{\Sigma} + F_{\text{аморт.}} - F_{\text{сопр.}} \sin \psi),$$

$$\beta_{\sigma} = 6R(\Phi_s - F_{\text{сопр.}} \cos \psi)(N - \Phi_s + F_{\text{сопр.}} \cos \psi),$$

$$\gamma_{\sigma} = 6R(G_{\Sigma} - F_{\text{аморт.}})(N + G - G_{\Sigma} + F_{\text{аморт.}} - F_{\text{сопр.}} \sin \psi),$$

где $N = \sqrt{(\Phi_s - F_{\text{сопр.}} \cos \psi)^2 + (G + F_{\text{аморт.}} - G_{\Sigma} - F_{\text{сопр.}} \sin \psi)^2}$ — сила растяжения; R — радиус звена; G — вес звена; $F_{\text{сопр.}}$ — сила возникающая в пружине; ψ — угол наклона пружины к горизонтальной оси; G_{Σ} — вес приходящийся на одно колесо робота; $F_{\text{аморт.}}$ — демпфирующая сила в поршне; Φ_s — сила инерции звена; S — высота звена; h — толщина звена;

$a = \frac{4R(2(G_{\Sigma}-F_{\text{сопр.}})+G-F_{\text{аморт.}})}{m\left(\left(R+\frac{S}{2}\right)^2+\left(R-\frac{S}{2}\right)^2\right)}$ — коэффициент демпфирования; $b = \frac{4Rg}{\left(\left(R+\frac{S}{2}\right)^2+\left(R-\frac{S}{2}\right)^2\right)}$ — коэффициент формы подвески; m — масса звена.

На основе данных ограничений мы можем проектировать в автоматическом режиме нашу подвеску и рассчитывать ее математическую модель, не опасаясь, что она не будет иметь необходимое нам применение. Не мало важным и интересным со стороны работы являются также адаптивные колеса

данной ММРК, ведь именно благодаря им он может передвигаться по лестницам, под которые распространяется ГОСТ 23120–2016 и аналогичные ему. На рис. 3 представлено не только само колесо, но и суммарные перемещения при всех приложенных нагрузках на него, включая динамические.

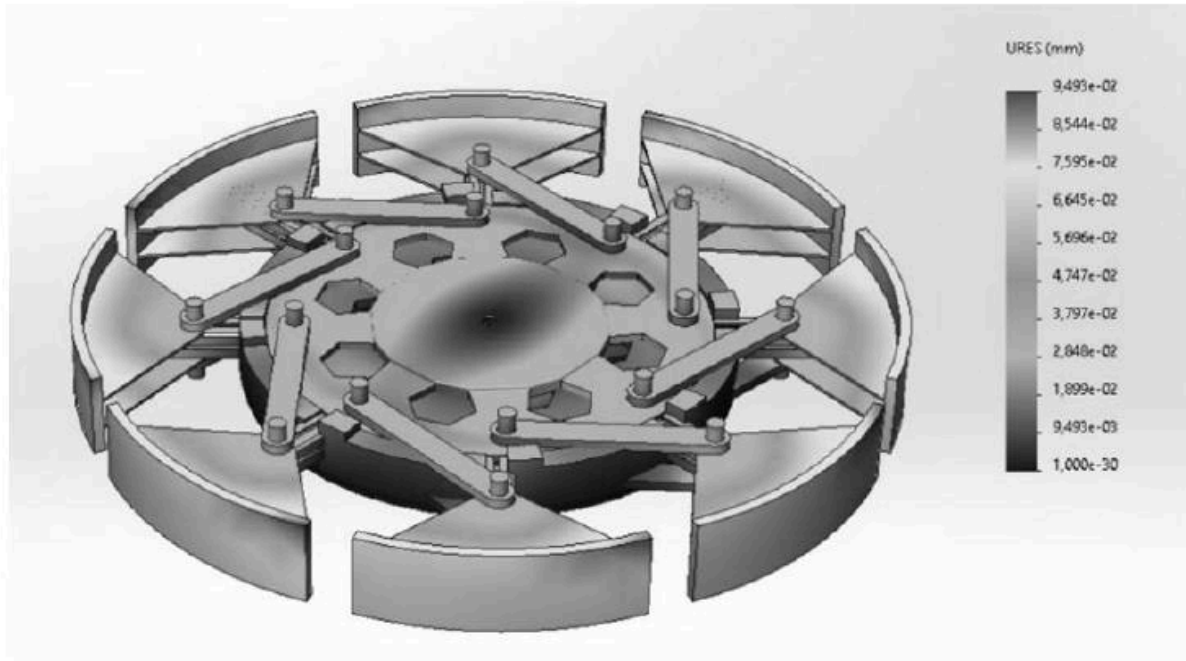


Рис. 3. Суммарные перемещения в адаптивном колесе при приложении максимальных нагрузок

Полноценный расчет, а также схематическое представление колес представлено в статье [12]. Проводя испытания данных колес в том числе, были наложены следующие прочностные ограничения на них, а также выведен управляющий момент на ведущих колесах.

Ограничения связаны в первую очередь с прочностью дуговых элементов, которые согласно рис. 3 будут иметь на них максимальные перемещения, а соответственно и напряжения, вычисляемые согласно формуле

$$\frac{15N}{2R_{\text{кол}}S\sigma_T} + \frac{45\left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4}g\right)^2}{S^2N\sigma_T} - \frac{69.3m_j g(N - 1.54m_j g)}{S^2N\sigma_T} \geq 2.5,$$

где $N = \sqrt{(1.45m_j g)^2 + \left(m_j g - \frac{M_{\text{пол}} + m_{\text{роб}}}{4}g\right)^2}$; $R_{\text{кол}}$ — радиус колеса; S — толщина колеса; m_j — масса специфических ползунов в раздвижных элементах колеса, которые можно вычислить по формуле

$$m_j = \rho \left(\frac{4\pi R_{\text{кол}}^2 S}{75} - \frac{\pi S^2 R_{\text{кол}}}{120} + \frac{8}{3} S^2 R_{\text{кол}} + \frac{81\pi}{500} S^3 \right);$$

σ_T — предел текучести для определенного материала; ρ — плотность материала.

Автоматика и электроника. Электроника и автоматика определяют работоспособность робототехнических комплексов, влияя на точность исполнения задач, долговечность и производительность. Рассматриваются принципы разработки электронных и программных систем многофункционального робота КДМЕ23 были выявлены следующие ключевые аспекты проектирования: надежность, энергоэффективность, интеграция датчиков и приводов, поддержка дистанционного управления и диагностики. При реализации системы было принято решение, что данная система управления робототехническим комплексом будет разделена на три уровня:

- верхний уровень управления (сервер и сенсорики);
- средний уровень управления физическими системами (моторами, пневматикой, охлаждающими системами);
- нижний уровень управления питанием (зарядные устройства, аккумуляторные батареи).

Отсюда была реализована интегрированная система верхнего уровня управления, объединяющая сервер с контроллером Raspberry PI 4B и сенсорную сеть. Сенсорная сеть состоит из камер, энкодеров, гироскопов, акселерометров, спидометров, одометров и лидаров. Используется пропорциональный регулятор ПИД-типа для поддержания стабильности скорости вращения моторов. Датчики предоставляют обратную связь, позволяя диагностировать неисправности и регулировать движение робота в зависимости от внешних воздействий.

Физические системы управляются через драйверы, программируемые через стандартные шины (USB, I²C, SPI). Используются драйверы для управления моторами и шаговыми двигателями. Электропитание осуществляется от аккумуляторных батарей, спроектированных для продолжительной работы и эффективной подачи энергии в пиковых нагрузках.

Если система управления роботом по сути является его «мозгами», то систему питания можно назвать сердцем любого робота или автоматизированной системы, ведь неправильное подключение питания будет влиять как на мощность, что приведет к некорректной работе устройства, так и к возможной поломке. Поэтому начнем проектирование с расчета потребляемой мощности. Будем отталкиваться от вольтажа того или иного оборудования, а также значение максимальной силы тока, тогда для системы управления колесами получим уравнение

$$P_{\text{драйверов}} = 4U_{\text{шаг}} \max I_{\text{потр}} + 2U_{\text{БДПТ}} \max I_{\text{потр}},$$

где $P_{\text{драйверов}}$ — расчетная мощность драйверов двигателей; $U_{\text{шаг}}$ — постоянное напряжение питания шагового драйвера; $I_{\text{потр}}$ — потребляемая сила тока, которая зависит от нагрузки на двигатель, для оценки максимальной мощности будем брать максимальное допустимое значение для устройств; $U_{\text{БДПТ}}$ — постоянное напряжение питания бесколлекторного двигателя постоянного тока (БДПТ).

Согласно архитектуре системы, нам лучше всего использовать два аккумулятора, каждый из которых выдает напряжение 12 В. Тогда получаем, что потребляемый ток равен $800 / (2 \times 12) \approx 33$ А. Исходя из того, что средняя емкость аккумуляторов для внедорожников составляет около 66 Ач, таких аккумуляторов хватит примерно на два часа непрерывной работы. Потребление же 4,2 А и 5,5 А для драйверов двигателей возможно лишь при использовании наиболее мощных двигателей, которые при таком значении силы тока обеспечат требуемый крутящий момент согласно формуле

$$M = \frac{\mu P * 9549}{n_{max}} = \frac{\mu U_{потр} I_{потр} * 9,549}{n_{max}},$$

где μ — передаточное число редуктора; $U_{потр}$ — потребляемое напряжение системы; $I_{потр}$ — потребляемый ток системы; n_{max} — максимальное число оборотов двигателя.

Введем коэффициент $\theta = \frac{\mu}{n_{max}}$, показывающий конструкционные особенности редуктора. Для данного робота $\theta = \frac{300}{15000} = 0.02$, следовательно, для БДПТ $M(I_{потр}) = 0.02 * 24 * 9,549 * I_{потр} \approx 4.6 I_{потр}$. Для шаговых двигателей $\theta = \frac{4}{30} = 0.13$, тогда $M(I_{потр}) \approx 30 I_{потр}$. Исходя из вышеизложенного, максимально, мы можем использовать двигатели с моментом в 25 Нм и 120 Нм, что соответствует роботу с максимальной грузоподъемностью.

Таким образом, в зависимости от нагрузки на робота, будет изменяться только число аккумуляторов, причем возможны две конфигурации: облегченная с двумя аккумуляторами и высоконагруженная с двумя основными аккумуляторами и двумя резервными.

Заключение. Разработанный многоцелевой мобильный робототехнический комплекс КДМЕ23 демонстрирует значительный потенциал для эффективного выполнения задач технической инспекции производственных помещений. Проведенный анализ показал, что данный комплекс обладает рядом ключевых преимуществ перед существующими аналогами, такими как универсальность, быстрое проектирование и настройку, возможность регулировки габаритов, поддержку адаптивных колес и подвески, а также интеграцию цифровой платформы.

Использование активного типа подвески Кристи позволило достичь высокой степени адаптации к различным условиям эксплуатации, обеспечивая надежное прохождение сложных участков рельефа и сохранение стабильного положения корпуса на наклонных поверхностях.

Особое внимание уделялось разработке электронных и автоматизированных систем управления, обеспечивающих точность и стабильность функционирования комплекса. Использование интеллектуальных алгоритмов управления, интеграции датчиков и модулей обратной связи позволило создать высокоэффективную платформу, способную решать широкий спектр задач в различных отраслях промышленности.

Таким образом, предлагаемый комплекс КДМЕ23 представляет собой перспективное решение для оптимизации процесса технического обслуживания и инспекции производственных объектов, демонстрируя значительные преимущества в плане функциональности, удобства эксплуатации и экономичности. Полученные результаты открывают новые горизонты для дальнейшего совершенствования и внедрения инновационных робототехнических решений в промышленность и смежные отрасли.

Литература

- [1] Yadrovskaya M.V., Gurin I.V. Study on the relevance of robotics technology. *Advanced Engineering Research*, 2023, vol. 22 (4), pp. 353–364.
- [2] Овчинников В.В., Батанов А.Ф., Мингалеев С.Г. Роботы в Чернобыле. *Технологии гражданской безопасности*, 2019, т. 16 (4), с. 70–78.
- [3] *СМП Роботикс/продукция*. URL: <https://www.smprobotics.ru/produksiya> (дата обращения 10.05.2025).
- [4] Пономарев Д.А., Королева А.Г., Шамаева И.И. Колесные роботы в сфере доставки. *Наука и образование в условиях мировой нестабильности: проблемы, новые этапы развития. II Междунар. науч.-практ. конф.: материалы*. Калуга, Манускрипт, 2022, с. 262–264.
- [5] *Мобильные роботы Сервосила «Инженер»*. URL: <https://www.servosila.com/ru/mobile-robots> (дата обращения 10.05.2025).
- [6] Некрасов Е.В., Шеломов С.Б. *Мобильный роботизированный комплекс пожаротушения*. Патент № 2580779C2 РФ, 2016, бюл. № 14, 6 с.
- [7] Robotic platform. Patent no. US8763732B2 USA, 2019, 12 p.
- [8] Stair-climbing surveillance vehicle. Patent no. US20130231814A1 USA, 2009, 18 p.
- [9] Hanazawa Y., Uchino Y., Sagara S. Development of a rimless wheel robot with telescopic legs for step adaptability. *Artificial Life and Robotics*, 2024, vol. 29 (2), pp. 349–357.
- [10] Морозов Е.П. Проектирование амортизационной подвески для мобильного робота с составлением подробной математической модели и ее оптимизацией. *Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи. Юбилейная 5-я межрегион. науч. сессии молодых исследователей: тез. докл.* Тула, ТГУ, 2024, с. 147–148.
- [11] Морозов Е.П. Проектирование и первичный расчет многоцелевого мобильного робототехнического комплекса КДМЕ-23 — подвеска Кристи. *Виттевские чтения-2024. XXIV Междунар. Конгресса молодой науки: материалы*. Москва, Московский университет им. С.Ю. Витте, 2024, с. 1707–1720.
- [12] Морозов Е.П., Комаров Д.А. Проектирование многоцелевого робототехнического комплекса КДМЕ23. II *Весенняя науч. сессия СНО НИЯУ МИФИ: сб. тез. докл.* Москва, 2024, с. 13–14.

The development and research of the KDME23 multipurpose mobile robotic complex for automation of production inspection

Morozov Egor Pavlovich

Komarov Dmitry Alexeevich

Murashov Mikhail Vladimirovich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

The article explores modern robotics and automation trends, focusing on versatile mobile robotic systems like MMRS. It introduces an innovative KDME23 complex designed for diverse industrial, defense, and emergency applications. Emphasis lies on enhancing system adaptability, control, and reliability under challenging environments. A distinctive feature includes its advanced digital platform enabling swift development, manufacturing, and customization alongside detailed documentation support.

Keywords: robotics, production automation, multi-purpose robotics complex, adaptation and reliability, cross-country capability and versatility, innovative engineering solutions, digital platform