

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 621.865.8:62-236.58:676.84.02

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-47-59

EDN: GSZOXR

**Универсальная мобильная платформа для обслуживания станков
с числовым программным управлением**

С. А. Исаков¹, Р. А. Мунасыпов², О. В. Целищев³

¹Уфимское моторостроительное производственное объединение
450039, Россия, г. Уфа, ул. Ферина, 2

²Уфимский университет науки и технологий
450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

³ООО «Айтилук»
450076, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 3Б, офис 114

Аннотация. В условиях развития Индустрии 4.0 и цифрового производства ключевым фактором повышения эффективности является минимизация времени простоя технологического оборудования. Актуальность разработки универсальной мобильной платформы (МРП) обусловлена растущей потребностью в роботизации межоперационного обслуживания станков с ЧПУ, которое до сих пор в значительной степени зависит от ручного труда, что приводит к потерям времени и снижению общей производительности. Существующие стационарные и мобильные решения не обеспечивают необходимого сочетания точности, адаптивности и быстрого развертывания в динамической производственной среде.

Цель исследования – разработка универсальной мобильной платформы для обслуживания станков с числовым программным управлением (ЧПУ) с повышенными показателями адаптивности, точности и надежности.

Материалы и методы исследования. Методика научного исследования включала системный анализ, математическое моделирование и прочностные расчеты, подтвердившие надежность конструкции (запас прочности 36,4–52,3 %).

Результаты. В данной работе представлена мобильная роботизированная платформа, предназначенная для оперативного обслуживания станков с ЧПУ в условиях динамической производственной среды. Научная новизна заключается в синтезе трех инновационных элементов: модульной архитектуры, адаптивной пневматической подвески и высокоскоростной системы стабилизации, что обеспечивает повышенную проходимость за счет адаптации к неровностям поверхности в отличие от существующих аналогов.

Выводы. Результаты демонстрируют возможность интеграции платформы в производственный цикл на основе прогнозных уведомлений от оборудования, что обеспечивает точность позиционирования $\pm 1,5$ мм и автономность работы. Важным практическим результатом является доказанная надежность выбранных пневмоамортизаторов, обеспечивающая безопасную эксплуатацию даже в нештатных ситуациях. Перспективы работы видятся в развитии алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) для системы автоматического управления (САУ), позволяющих осуществлять более сложное прогнозное планирование и адаптацию к непредвиденным ситуациям без вмешательства оператора. Практическая значимость работы подтверждается расчетным сокращением времени простоя оборудования на 15–20 %.

Ключевые слова: мобильная роботизированная платформа, ЧПУ, модульная архитектура, адаптивная пневмоподвеска, прецизионная стабилизация, автономность, позиционирование, сокращение простоев, производственная среда, интеграция

Поступила 20.08.2025, одобрена после рецензирования 30.10.2025, принята к публикации 01.11.2025

Для цитирования. Искаков С. А., Мунасыпов Р. А., Целищев О. В. Универсальная мобильная платформа для обслуживания станков с числовым программным управлением // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 6. С. 47–59. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-47-59

MSC: 68-XX

Original article

Universal mobile platform for servicing computer numerical control machines

S.A. Iskakov¹, R.A. Munasypov², O.V. Tselischev³

¹Ufa Engine Industrial Association

2, Ferina street, Ufa, 450039, Russia

²Ufa University of Science and Technology

32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia

Department LLC "Aytiluk"

3B, Karl Marx street, office 114, Ufa, 450076, Russia

Abstract. In the context of the development of Industry 4.0 and digital manufacturing, minimizing downtime of process equipment is a key factor in increasing efficiency. The development of a universal mobile platform (UMP) is driven by the growing need for robotic automation of CNC machine tool interoperability, which still relies heavily on manual labor, resulting in lost time and reduced overall productivity. Existing stationary and mobile solutions do not provide the necessary combination of precision, adaptability, and rapid deployment in a dynamic production environment.

Aim. The study is to develop a universal mobile platform for servicing numerically controlled (CNC) machines with improved adaptability, accuracy, and reliability.

Research materials and methods. The research methodology includes systems analysis, mathematical modeling, and strength calculations, which confirm the structural reliability (safety factor of 36.4–52.3%).

Results. This paper presents a mobile robotic platform designed for the rapid maintenance of CNC machine tools in a dynamic production environment. The scientific novelty lies in the synthesis of three innovative elements: a modular architecture, an adaptive air suspension, and a high-speed stabilization system, which provides improved off-road capability by adapting to surface irregularities, unlike existing solutions.

Conclusions. The results demonstrate the feasibility of integrating the platform into the production cycle based on predictive notifications from equipment, ensuring positioning accuracy of ± 1.5 mm and autonomous operation. An important practical result is the proven reliability of the selected air springs, ensuring safe operation even in emergency situations. The work offers potential in the development of artificial intelligence (AI) algorithms for automatic control systems (ACS), enabling more complex predictive planning and adaptation to unforeseen situations without operator intervention. The practical significance of the work is confirmed by the estimated reduction in equipment downtime by 15–20%.

Keywords: mobile robotic platform, CNC, modular architecture, adaptive pneumatic suspension, precision stabilization, autonomy, positioning, downtime reduction, production environment, integration

Submitted 20.08.2025, approved after reviewing 30.10.2025, accepted for publication 01.11.2025

For citation. Iskakov S.A., Munasypov R.A., Tselischev O.V. Universal mobile platform for servicing computer numerical control machines. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 6. Pp. 47–59. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-47-59

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение характеризуется растущими требованиями к эффективности производственных процессов и сокращению простоев оборудования. Одним из ключевых препятствий на пути к полной автоматизации является проблема оператив-

ного межоперационного обслуживания станков с ЧПУ, которое до сих пор требует значительного участия человеческого труда. Это приводит к потерям времени на перемещения оператора, «окнам» в работе оборудования и, как следствие, к снижению общей производительности участка.

Существующие стационарные роботы-манипуляторы и мобильные платформы не в полной мере решают эту проблему. Стационарные роботы обладают ограниченной зоной обслуживания, а большинство мобильных решений не обеспечивает необходимой точности позиционирования и стабильности в условиях динамической производственной среды, характеризующейся вибрациями, неровностями пола и необходимостью частой перепланировки задач.

Проблема, решаемая в данном исследовании, заключается в отсутствии универсального, точного и быстро развертываемого роботизированного решения для оперативного обслуживания станков с ЧПУ, способного интегрироваться в гибкие производственные ячейки и минимизировать время простоя оборудования.

В данной работе предлагается комплексное решение – модульная универсальная мобильная роботизированная платформа (МРП), – призванное преодолеть ограничения существующих решений. Ключевой акцент сделан на сокращение простоев и повышение производительности. Платформа проектировалась с учетом требований устойчивости, точности, автономности и модульности.

Проблемам проектирования МРП посвящены работы многих исследователей. В работе [1] рассмотрены вопросы точного позиционирования промышленных роботов в условиях неопределенности производственной среды. В монографии [2] подробно описаны методы SLAM-навигации для мобильных робототехнических комплексов. Особого внимания заслуживают вопросы проектирования пневматических систем стабилизации [3]. Методики расчета параметров движения мобильных платформ подробно изложены в работе [4]. Несмотря на значительное количество исследований в области мобильной робототехники, научная новизна представленной работы заключается в комплексном синтезе модульной архитектуры, адаптивной пневмоподвески с амортизаторами диаметром 80 мм и прецизионной системы стабилизации с временем развертывания менее 2 с, специально оптимизированных для задач обслуживания парка станков с ЧПУ в режиме, инициируемом прогнозными уведомлениями.

Цель исследования – разработка универсальной мобильной платформы для обслуживания станков с ЧПУ с повышенными показателями адаптивности, точности и надежности.

Задачи исследования:

1. Разработка модульной архитектуры платформы.
2. Создание системы адаптивной пневмоподвески.
3. Разработка прецизионной системы стабилизации.
4. Создание интеллектуальной системы управления.

Актуальность проводимых исследований подтверждается тем, что необходимость роботизации определена в Национальном проекте «Средства производства и автоматизации».

Методы исследования

В работе применялись методы системного анализа, математического моделирования, экспериментальные исследования и расчеты на прочность. Использовались стандартные методики оценки механических характеристик [4, 5].

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ МРП

Требования к конструкции МРП разработаны с учетом недостатков существующих мобильных роботов за счет модульности и адаптивных систем.

1. Модульность (быстрая адаптация под задачи):
 - Сменные компоненты (приводы, инструменты, датчики, колесные базы), замена привода занимает менее 15 мин.
 - Компактность (ширина платформы не более 800 мм) – выбрана исходя из анализа типовых производственных помещений для перемещения в узких зонах (например, дверные проемы).
 - Конструкция корпуса – обеспечивает легкий монтаж/демонтаж оборудования для быстрого ремонта и замены.
2. Адаптивная пневмоподвеска (стабильность и виброзащита):
 - Амортизаторы – диаметром 80 мм.
 - Управление – регулировка давления воздуха (рабочее: 0.6–0.8 МПа) для изменения упругости и демпфирования.
 - Надежность – минимальный запас прочности 36,4 % (при $P = 0.6$ МПа).
 - Функции:
 - гашение вибраций (защита груза/оборудования);
 - поддержание строго горизонтального положения платформы на неровностях.

Выбор диаметра 80 мм является результатом компромисса между компактностью и запасом прочности, что подробно обосновано в разделе расчетов.
3. Прецизионная стабилизация:
 - Гироскопические датчики – точность удержания углов наклона $\pm 0,05^\circ$.
 - Система стабилизирующих опор:
 - время разворачивания менее 2 секунд;
 - фиксация платформы при работе манипулятора (исключение вибраций/проседания).

Для достижения времени разворачивания менее 2 секунд была разработана алгоритмическая оптимизация управления пневмоцилиндрами, что критически важно для минимизации общего времени цикла обслуживания.
4. Гибкое энергоснабжение:
 - Автономный источник – аккумуляторная батарея (АКБ) 48В, 250 А·ч.
 - Стационарная работа – возможность зарядки/питания от промышленной сети 380В.

Преимущества конструкции МРП:

 - Универсальность – легкая адаптация к различным задачам и средам за счет модульности.
 - Устойчивость и защита – адаптивная подвеска и прецизионная стабилизация обеспечивают безопасность груза и точность работы оборудования на ходу и стоянке.
 - Оперативность – быстрая замена модулей и разворачивание опор.
 - Автономность и долговременная работа – мощная АКБ с возможностью сетевого питания.

СТРУКТУРА МРП

МРП состоит из следующих подсистем:

- Энергообеспечение – АКБ 48В, 250 А·ч.
- Пневмосистема – компрессор, распределители, ресивер.
- Исполнительные механизмы – пневмоцилиндры и сервоприводы.
- Система стабилизации – активные опоры с временем разворачивания не менее 2 с.
- Сенсорная система – гироскопы, акселерометры, лидары, камеры.
- Рабочий орган – промышленный манипулятор Fanuc M-20iA.

Методика расчетов параметров движения и нагрузок основывалась на классических подходах теории механизмов и машин с учетом современных требований к точности позиционирования [4].

Структурная схема системы управления мобильного роботизированного комплекса представлена на рис. 1.

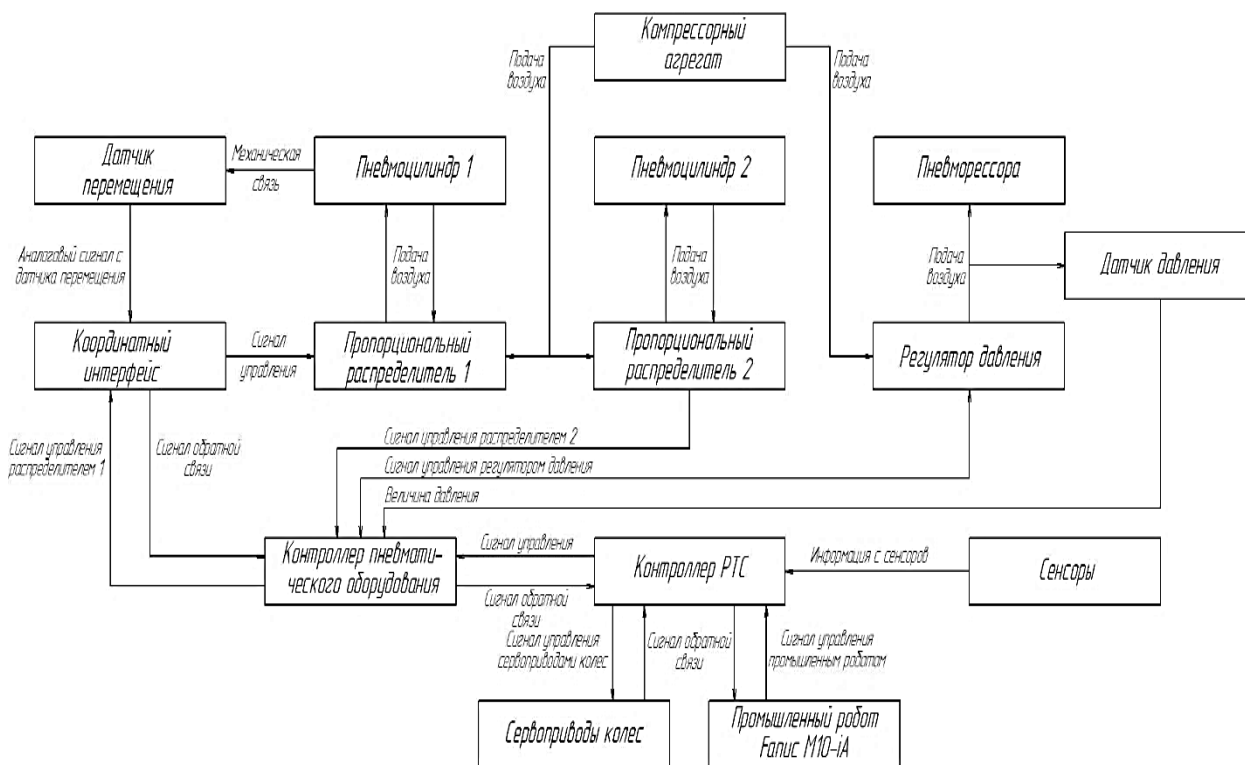


Рис. 1. Структурная схема системы управления мобильного роботизированного комплекса

Fig. 1. Structural diagram of the control system for the mobile robotic complex

Компрессорный агрегат создает рабочее давление в пневмосистеме, он включается автоматически при понижении давления в ресивере до 0,8 МПа.

За выдачу управляющих сигналов на контроллер пневматического оборудования, промышленного робота и сервоприводы колес платформы отвечает контроллер платформы, в который поступает цифровой сигнал отклонения платформы от горизонтального положения с двухосевого гироскопа и в котором записаны программа или алгоритм работы универсальной мобильной платформы. Цифровые сигналы управления контроллера платформы преобразуются в аналоговые и подаются на соответствующее оборудование контроллером пневматического оборудования.

Контроллер пневматического оборудования обладает функциями контроллера положения (замкнутый контур) и управления позиционированием (открытый контур).

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МРП

Параметры МРП:

- Сервоприводы – 4 шт. Fanuc β iS 22HV ($P = 1,5$ кВт, $n_{\max} = 4500$ об/мин.) [5].
- Радиус колес – $R = 0,1$ м.

Масса платформы с нагрузкой – 765 кг.

Масса платформы включает все компоненты комплекса и полезную нагрузку. Для достижения этой скорости при выбранной мощности серводвигателей потребовалось передаточное число открытой зубчатой передачи $u_{\text{озп}} = \frac{1}{25}$.

Расчет скорости движения:

$$v = \frac{n_{\max}}{60} \cdot 2\pi \cdot R \cdot u_{\text{озп}} = \frac{4500}{60} \cdot 2\pi \cdot 0,1 \cdot \frac{1}{25} = 6,786 \text{ км/ч},$$

где n_{\max} – максимальное число оборотов серводвигателей;

R – радиус колеса.

Данная скорость удовлетворяет заданным требованиям. Примечание: для обеспечения безопасности, точности позиционирования и минимизации вибраций эксплуатационная скорость ограничена значением 5 км/ч.

Поворот вала сервомотора на один угловой шаг определяет теоретически минимальное смещение платформы МРП:

$$s = \frac{\pi \cdot \alpha_{\text{ш}}}{180^\circ} \cdot R \cdot u_{\text{озп}} = \frac{\pi \cdot 0,12^\circ}{180^\circ} \cdot 0,1 \cdot \frac{1}{25} = 0,0084 \text{ мм},$$

где R – радиус колеса,

$\alpha_{\text{ш}}$ – угловой шаг сервопривода, $\alpha_{\text{ш}} = 0,12^\circ$;

$u_{\text{озп}}$ – передаточное число открытой зубчатой передачи, $u_{\text{озп}} = \frac{1}{25}$.

Примечание: теоретическая точность 0,0084 мм недостижима на практике из-за эластичной деформации шин, люфтов в зубчатой передаче и проскальзывания колес. Точность позиционирования: МРП – $\pm 1,5$ мм; манипулятор – $\pm 0,5$ мм.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МРП

Нагрузка на критический амортизатор:

- Суммарная сила – $F_{\Sigma} = 3835,5$ Н.
- Допустимая нагрузка $[F]$ – при $P = 0,8$ Мпа $\approx 8042,5$ Н, при $P = 0,6$ Мпа $\approx 6031,9$ Н.

Управляемые амортизаторы МРП должны выдерживать нагрузку при максимально вытянутой руке промышленного робота с максимальной нагрузкой на схвате. На рис. 2 показаны векторы сил, действующих на платформу при работе манипулятора в максимально нагруженной конфигурации (силы нагрузки (F_2, F_4, F_3, F_2) создают крутящий момент; силы F_n и F_l – статическую нагрузку).

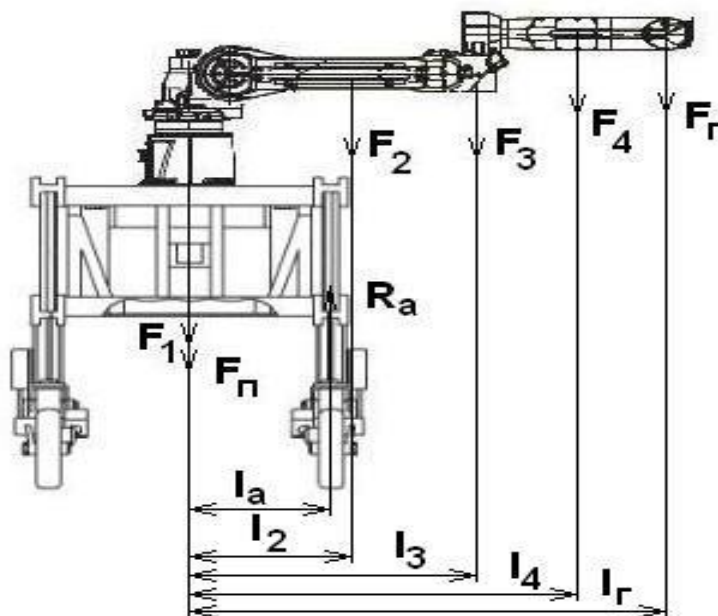


Рис. 2. Схема нагружения МРП / Fig. 2. MRP loading diagram

Здесь указаны силы: F_2 – полезная нагрузка и вес пятого звена промышленного робота 250 Н; F_4 – вес четвертого звена робота 300 Н; F_3 – вес третьего звена робота 450 Н; F_2 – вес второго звена робота 650 Н; F_1 – вес первого звена робота 1100 Н; F_n – вес подпрессоренной части платформы без учета манипулятора приблизительно 7500 Н; R_a – реакция опоры управляемого амортизатора, она не должна превышать допустимую нагрузку управляемого амортизатора. Веса звеньев соответствуют промышленному роботу Fanuc M-20iA. Силы F_2 , F_4 , F_3 , F_2 создают крутящий момент относительно оси, проходящей через центр платформы, а силы F_n и F_1 создают своей массой нагрузку, равномерно распределенную на все четыре управляемых амортизатора. Расстояния от центра платформы до центров масс: $l_2 = 1811$ мм, $l_4 = 1054$ мм, $l_3 = 924$ мм, $l_2 = 286$ мм, $l_a = 575$ мм.

Максимально допустимая нагрузка на пневматический цилиндр управляемого амортизатора (Festo DSBG-80-500-PPVA-N3) составляет:

при $P = 0,8$ МПа

$$F = S \cdot P = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P = \frac{\pi \cdot 80^2}{4} \cdot 0,8 = 8038,4 \text{ Н};$$

при $P = 0,6$ МПа

$$F = S \cdot P = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P = \frac{\pi \cdot 80^2}{4} \cdot 0,6 = 6028,8 \text{ Н}.$$

Расчет нагрузки осуществляется для двух наиболее нагруженных амортизаторов МРП для данной схемы.

Силы F_n и F_1 создают нагрузку на все четыре управляемых амортизатора, равную:

$$F_{\Sigma 1} = \frac{F_n + F_1}{4} = \frac{7500 + 1100}{4} = 2150 \text{ Н (на амортизатор)}.$$

Силы F_2 , F_4 , F_3 , F_2 создают крутящий момент относительно оси, проходящей через центр платформы:

$$M_{\Sigma} = F_1 \cdot l_1 + F_4 \cdot l_4 + F_3 \cdot l_3 + F_2 \cdot l_2 = 250 \cdot 1,811 + 300 \cdot 1,054 + 450 \cdot 0,924 + 650 \cdot 0,286 = 1370,65 \text{ Нм}.$$

Диагональное расстояние между амортизаторами:

$$L_{\text{diag}} = 2 \cdot l_a \cdot \cos(45^\circ) = 2 \cdot 0,575 \cdot 0,707 \approx 0,813 \text{ м}.$$

Соответственно сила, действующая на рассчитываемые амортизаторы, равна:

$$F_{\Sigma 2} = \frac{M_{\Sigma}}{L_{\text{diag}}} = \frac{1370,65}{0,813} = 1685,5 \text{ Н}.$$

Общая нагрузка на один из наиболее нагруженных управляемых амортизаторов равна:

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2} = 2150 + 1685,5 \text{ Н} = 3835,5 \text{ Н}.$$

В таблице 1 представлены результаты расчета и оценки прочности для двух типов диаметров (80 мм и 70 мм) при различных значениях давления. Для каждого случая указаны:

Диаметр 80 мм:

- Гарантированный запас прочности при рабочих давлениях (36,4–52,3 %).
- Безопасная работа даже при аварийном падении давления до 0,6 МПа.
- Полное соответствие ГОСТ Р 57751-2017 и требованиям безопасности.

Таблица 1. Расчет и оценки прочности для двух типов диаметров (80 мм и 70 мм)**Table 1.** Strength calculation and evaluation for two diameter types (80 mm and 70 mm)

| Диаметр | Давление | Допустимая нагрузка, Н | Фактическая нагрузка, Н | Запас прочности, % | Оценка рисков |
|---------|----------|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------|
| 80 мм | 0,8 МПа | 8038,4 | 3835,5 | 52,3 | соответствует требованиям |
| | 0,6 МПа | 6028,8 | 3835,5 | 36,4 | соответствует требованиям |
| 70 мм | 0,8 МПа | 6157,52 | 3835,5 | 37,7 | приемлемо |
| | 0,6 МПа | 4618,14 | 3835,5 | 17 | требует постоянного контроля |
| | 0,55 МПа | 2116,5 | 3835,5 | 9,4 | не рекомендуется |

В результате проведенного анализа был обоснован и внедрен в конструкцию выбор амортизаторов диаметром 80 мм. Это решение, увеличив массогабариты, позволило добиться значительного эксплуатационного запаса, что подтверждено строгими расчетами на прочность, показавшими запас в 36,4 % даже в аварийном режиме.

Диаметр 70 мм:

- Минимально допустим при стабильном давлении $\geq 0,8$ МПа (запас 37,7 %).
- Критичные риски:
 - при $P = 0,6$ МПа запас всего 17,0 % – требует постоянного контроля;
 - при $P = 0,55$ МПа запас 9,4% – высокий риск отказа при динамических нагрузках.

Рекомендации

На основе проведенных расчетов сформулированы следующие инженерные рекомендации:

1. В качестве базового должен быть принят вариант с амортизаторами диаметром 80 мм.
2. Для диаметра 70 мм требуется:
 - Система постоянного мониторинга давления.
 - Автоматическая блокировка работа при падении давления ниже 0,65 МПа.
 - Дополнительные расчеты на динамические нагрузки (удары, вибрации).
3. Дополнительные меры безопасности:
 - Установка ресивера с запасом сжатого воздуха.
 - Датчики контроля нагрузки на амортизаторы в реальном времени.
 - Регулярные проверки герметичности пневмосистемы.

Условия эксплуатации

1. Температурный диапазон работы: -10° до $+40^{\circ}\text{C}$.
2. Требования к покрытию: перепады высот ≤ 3 мм/м.
3. Интервал технического обслуживания (ТО): 250 моточасов.
4. Калибровка системы автоматического управления (CAU): раз в 72 часа работы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ МРП ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ.

ПОДГОТОВКА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ МРП

Автоматизация любого процесса практически всегда требует предварительной подготовки рабочего места, например, расположения всех необходимых рабочих объектов в определенных местах рабочего пространства, обеспечения соответствующего освещения рабочей зоны в случае использования систем технического зрения, подготовки поверхности передвижения мобильных робототехнических комплексов и т.д.

Для обеспечения проезда МРП необходимо очистить поверхность от посторонних предметов. Перед началом погрузочно-разгрузочных работ необходимо подготовить рабочую зону. В первую очередь следует очистить оснастку от загрязнений и стружки.

Манипулятор МРП захватывает заготовку со стола, предназначенного для установки заготовок, и устанавливает ее в оснастку станка с ЧПУ. После завершения механической обработки МРП снимает деталь с оснастки станка и помещает ее на другой стол, предназначенный для готовой продукции.

Для обслуживания станков и обрабатывающих центров с ЧПУ подготовка рабочей зоны предполагает SLAM (англ. Simultaneous Localization and Mapping – одновременная локализация и построение карты) на основе одометрии, лидара и/или камер, что обеспечивает ориентацию МРП в пространстве. Точность SLAM ± 10 мм при перемещении на расстояние до 20 м.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Перед началом обслуживания станков с ЧПУ МРП занимает расчетную позицию. Программно определяются точки возле стола с заготовками. Рабочий орган МРП останавливается для определения координат заготовки с помощью системы технического зрения, затем захватывает ее. После этого орган перемещается к точке установки следующей заготовки, адаптируя координаты под ее габариты. Процесс повторяется до завершения работ в текущем месте, после чего МРП переходит к следующей позиции. Когда станок с ЧПУ завершает обработку, он отправляет сигнал в контроллер МРП (через Wi-Fi, Bluetooth или Industrial Ethernet). МРП направляется к станку, учитывая маршруты, приоритеты и программы обслуживания из базы данных. После обслуживания МРП может перейти к следующему станку, вернуться на док-станцию или выполнить другие операции. Станки должны отправлять прогнозное уведомление (например, за 5–10 мин до окончания обработки) через систему мониторинга состояния. Критически важным элементом повышения эффективности всей системы является использование прогнозных уведомлений от станков. Внедрение работы по прогнозному сигналу стало ключевым организационным нововведением, позволившим на 15–20 % сократить время простоя оборудования по сравнению с классической реактивной моделью. Алгоритм обслуживания представлен на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм обслуживания станков с ЧПУ

Fig. 3. CNC Machine Servicing Algorithm

Для эффективного выполнения вышеуказанных задач в неопределенной среде необходимо в дальнейшем разработать верхние уровни интеллектуальной САУ МРП, решающей задачи от стратегического планирования до точного исполнительного контроля. Структуру иерархической трехуровневой интеллектуальной системы управления (стратегический, тактический и исполнительный) роботизированным комплексом для станков с ЧПУ укрупненно можно представить в виде, изображенном на рис. 4.

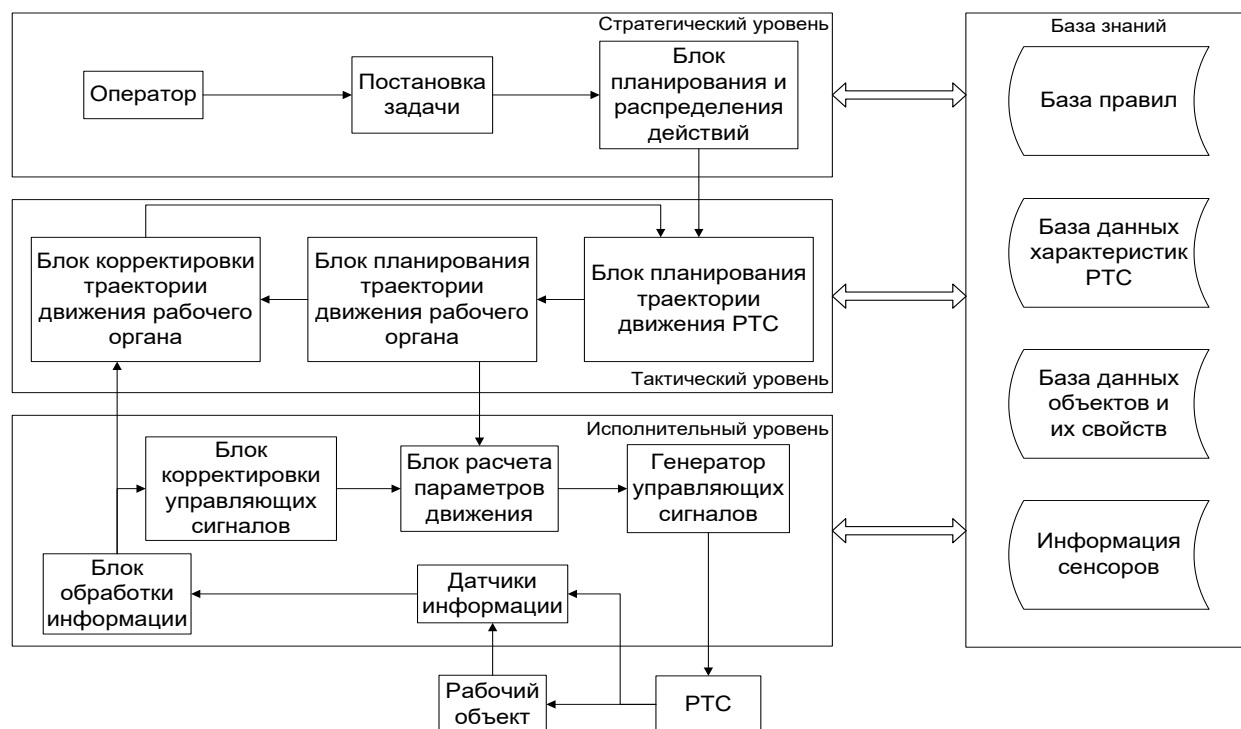


Рис. 4. Обобщенная структура САУ

Fig. 4. Generalized structure of the ACS (Automatic Control System)

Общую модель функционирования такой САУ можно представить в виде множества взаимодействующих процессов:

$$S_{ACS} = (L_{strat}, L_{tast}, L_{exec}, KB, \Theta, \Lambda),$$

где:

L_{strat} – стратегический уровень; L_{tast} – тактический уровень; L_{exec} – исполнительный уровень; KB – база знаний; Θ – множество сенсорных данных; Λ – множество управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

1. Стратегический уровень: модель планирования обслуживания.

Задача уровня – динамическое назначение заданий МРП на основе приоритетов. Используется модель, основанная на минимизации общего времени простоя станков:

$$J = \sum_{i=1}^N (t_{ready_i} - t_{avail_i}) \cdot c_i \rightarrow \min,$$

где N – количество станков, требующих обслуживания, t_{ready_i} – время готовности i -го станка, t_{avail_i} – время начала обслуживания i -го станка МРП, c_i – стоимостной коэффициент простоя i -го станка.

Модель и алгоритм работы системы прогнозного уведомления

Критическим элементом является работа по прогнозному уведомлению от станков. Пусть T_{proc} – полное время обработки детали на станке, t_{curr} – текущее время выполнения операции. Станок генерирует прогнозный сигнал в момент

$$t_{alert} = T_{proc} - \Delta t_{reserve} - \Delta t_{MRP},$$

где $\Delta t_{reserve}$ – временной резерв на возможные задержки (≈ 2 мин), Δt_{MRP} – среднее время, необходимое МРП для подхода и подготовки к обслуживанию ($\approx 3-8$ мин). Это позволяет МРП начать перемещение до фактического останова станка, сокращая время простоя на 15–20 %.

2. **Тактический уровень:** модели навигации и планирования траектории.

Навигация: используется алгоритм SLAM на основе расширенного фильтра Калмана (ЕКФ). Модель состояния робота в момент k : $x_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T$. Модель движения:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k,$$

где u_k – управляющее воздействие (скорости колес), w_k – гауссов шум процесса. Модель измерений лидара и одометрии: $z_k = h(x_k) + v_k$, где v_k – шум измерений.

Планирование пути: для глобального планирования используется модифицированный алгоритм D* Lite. Стоимость перехода между узлами графа определяется как взвешенная сумма: $C = \alpha L + \beta D + \gamma R$, где L – длина пути, D – оценка сложности участка (неровности), R – фактор риска столкновения.

3. **Исполнительный уровень:** модель позиционного и силового контроля.

Для управления приводами используется нелинейный ПИД-регулятор с компенсацией:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} + f_{comp}(\dot{q}, \ddot{q}),$$

где $e(t)$ – ошибка позиционирования, f_{comp} – слагаемое компенсации динамических эффектов.

Для обеспечения силового контакта при захвате/установке детали используется гибридный позиционно-силовой контроль на основе модели упругого контакта:

$$F = K(X_d - X),$$

где F – вектор усилий, K – матрица коэффициентов жесткости, X_d и X – желаемая и текущая позиции схвата.

Структура базы знаний (КВ)

База знаний представляет собой онтологию, формализованную в виде

$$KB = (O, R, A),$$

где: O – множество объектов (станки, МРП, инструменты, детали);

R – множество отношений между объектами (например, `расположен_в`, `обслуживается_МРП`, `требует_инструмент`).

A – множество атрибутов объектов (например, `точность_позиционирования`: $\pm 1,5$ мм, `время_развертывания`: не менее 2 с, `шаблоны_операций`).

База знаний включает:

1. Производственную онтологию: модель цеха, типы станков, операции.

2. Технические характеристики МРП и манипулятора.
3. Библиотеку шаблонов операций (более 50) для различных сценариев обслуживания.
4. Карты цехов и исторические данные о выполнении задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Продемонстрирована возможность интеграции платформы в производственный цикл на основе прогнозных уведомлений от оборудования, что обеспечивает точность позиционирования $\pm 1,5$ мм и автономность работы, а также сокращение простоя оборудования на 15–20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная универсальная мобильная платформа представляет собой законченное инженерное решение, готовое к внедрению на современных производственных линиях. Комплексный подход, включающий продуманную модульную архитектуру, надежную систему стабилизации с математически обоснованным запасом прочности и интеллектуальную систему управления, позволяет достичь заявленных показателей. Разработанная модульная архитектура не только обеспечивает гибкость и быстроту переналадки под различные производственные задачи, но и закладывает основу для дальнейшей модернизации. Комплексный подход к проектированию, интегрирующий надежную пневматическую систему стабилизации, энергоэффективную силовую установку и интеллектуальную систему управления, обеспечил достижение заданных показателей точности позиционирования, устойчивости и автономности. Важным практическим результатом является доказанная надежность выбранных пневмоамортизаторов, обеспечивающая безопасную эксплуатацию даже в нештатных ситуациях. Перспективы работы видятся в развитии алгоритмов ИИ для САУ, позволяющих осуществлять более сложное прогнозное планирование и адаптацию к непредвиденным ситуациям без вмешательства оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 667 p.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2011. 465 p.
3. Решетов Д. Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 2019. 367 с.
Reshetov D.N. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2019. 367 p. (In Russian)
4. International Standard ISO 9283:2021. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. Geneva: ISO, 2021. 42 p.
5. Fanuc Corp. Technical manual: Fanuc M-20iA Series. Oshino, Japan, 2023. 215 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Искаков Салават Адильбекович, инженер-конструктор, Уфимское моторостроительное производственное объединение;

450039, Россия, г. Уфа, ул. Фери́на, 2;

nice.romantic@mail.ru.

Мунасыпов Рустэм Анварович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов (АТП), Уфимский университет науки и технологий;

450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32;

rust40@mail.ru, SPIN-код: 1949-7757

Целищев Олег Владимирович, ведущий инженер-разработчик электронных устройств департамента НИОКР ООО «Айтилук»;

450076, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 3Б, офис 114;

noir-phoenix@mail.ru

Information about the authors

Salavat A. Iskakov, Design Engineer, Ufa Engine Industrial Association;

2, Ferina street, Ufa, 450039, Russia;

nice.romantic@mail.ru

Rustem A. Munasypov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head, Department of Process Automation, Ufa University of Science and Technology;

32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia;

rust40@mail.ru, SPIN-code: 1949-7757

Oleg V. Tselischev, Leading Electronics Development Engineer, R&D Department LLC “Aytiluk”;

3B, Karl Marx street, office 114, Ufa, 450076, Russia;

noir-phoenix@mail.ru