

## **ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ**

***Воробьев П.С., Волков Д.И.***

*Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия*

**Ключевые слова:** промышленный робот, механическая обработка, динамическая жесткость, качество обработки, управление роботом, металлорежущие станки.

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность использования промышленных роботов для выполнения операций механической обработки и описываются основные преимущества и недостатки промышленных роботов по сравнению с металлорежущими станками с ЧПУ. Для наглядности все преимущества и недостатки сведены в общую таблицу. В качестве основного недостатка промышленных роботов была определена их низкая жесткость, в заключении статьи кратко приводятся способы борьбы с этим недостатком и выдвинуты предположения о дальнейшем развитии промышленных роботов для механической обработки.

## **INDUSTRIAL ROBOTS FOR MACHINING: CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS**

***Vorobyev P.S., Volkov D.I.***

*Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov,  
Rybinsk, Russia*

**Keywords:** industrial robot, machining, dynamic stiffness, machining quality, robot control, metal-cutting equipment.

**Abstract.** The article describes the possibility of using industrial robots in machining and describes advantages and disadvantages of industrial robots compared to CNC machines. These advantages and disadvantages are summarized in one table. The main disadvantage of industrial robots is their low stiffness, and ways to deal with this drawback are briefly described in the conclusion along with prediction about future developments of industrial robots for machining.

В последние годы активно растет количество используемых в промышленности роботов. Начиная с 2013 года количество ежегодно вводимых в эксплуатацию промышленных роботов выросло более чем в 3 раза [1]. Наибольшее распространение роботы получили в автомобильной и электротехнической промышленности, где они применяются для выполнения таких технологических операций как сварка, пайка, лазерная резка и лазерная маркировка [2]. Роботизация не обошла стороной и область механической обработки.

В настоящее время механическая обработка в большинстве случаев выполняется с помощью металлорежущих станков, в частности, широкое распространение получили станки с ЧПУ, однако промышленные роботы могут быть вполне неплохой альтернативой, а в будущем и вовсе способны полностью заменить традиционные станки [3]. Так, например, известны исследования, в которых роботы показали свою эффективность при выполнении операций фрезерования, сверления, черновой обработки, резки, шлифования, зачистки, полирования и снятия заусенцев [4-8].

К основным преимуществам роботов можно отнести их гораздо большее по сравнению с традиционными станками рабочее пространство и их большую гибкость, то есть возможность адаптироваться к меняющимся требованиям производства и способность выполнять большее количество задач в производстве. Например, операции фрезерования, сверления и шлифования могут выполняться одним роботом, и при этом теряется необходимость в перемещении заготовки между станками.

Благодаря большому рабочему пространству роботы начинают активно применяться в энергетической, авиационной и космической промышленности [9], где зачастую требуется обрабатывать и собирать крупные объекты: турбины, двигатели и крылья, и традиционные станки не всегда могут эффективно справиться с обработкой заготовок деталей столь габаритных объектов. При этом стоит отметить, что у робота зачастую есть возможность к дальнейшему увеличению его рабочего пространства с помощью модификации его конструкции, а именно добавления дополнительных осей. У традиционных же станков эта возможность, как правило, отсутствует.

Еще одним преимуществом промышленных роботов является их более низкая стоимость по сравнению с металлорежущими станками с ЧПУ, которая вызвана конструктивными особенностями роботов. При этом не стоит забывать и про экономический эффект внедрения роботов: при замене станков с ЧПУ на промышленных роботов можно добиться снижения себестоимости механической обработки на 30% [10].

Несмотря на описанные выше преимущества, промышленные роботы все еще не получили повсеместного распространения. Это связано с рядом их недостатков. В частности, одним из основных недостатков является сложность их программирования – у каждого производителя роботов как правило используется свой уникальный язык программирования и обучение этим языкам требует большой затраты времени и создания специальных условия для обучения [11].

Но все же основные недостатки промышленных роботов для механической обработки – это их низкая точность и повторяемость обработки. Они вызваны конструктивными особенностями роботов [12]: последовательная кинематическая схема роботов приводит к тому, что каждое отдельное звено несет на себе вес последующих, что повышает требования к жесткости и ведет к увеличению массы, особенно заметным этот эффект становится при выполнении высокоскоростных операций обработки [13]. То есть, другими словами, основным недостатком промышленных роботов для механической обработки является их низкая жесткость [14], которая приводит к существенным отклонениям траектории движения инструмента от желаемой запрограммированной траектории.

Подробное сравнение металлорежущих станков с ЧПУ и промышленных роботов для механической обработки представлено в таблице 1. Числовые значения, представленные в таблице, взяты из работ [3, 6], в которых проводилось экспериментальное сравнение работы станка с ЧПУ и

промышленного робота при выполнении высокоскоростных операций обработки.

Табл. 1. Сравнение промышленных роботов и станков с ЧПУ

Характеристика	Станок с ЧПУ	Промышленный робот
Точность обработки, мм	-0,005	-0,1 – 1,0
Повторяемость, мм	-0,002	-0,03 – 0,3
Рабочее пространство	Ограниченное	Большое
Кинематическая схема	Картезианская	Последовательная
Количество управляемых осей	Как правило, не больше пяти	Более шести
Кинематическая избыточность	Отсутствует	Как минимум одна избыточная степень свободы
Траектория движения инструмента	Зависит от количества управляемых осей	Возможна любая сложная траектория
Механическая податливость	Относительно низкая	Относительно высокая
Компенсация ошибок податливости	Не требуется	Механическая или программная
Язык программирования	Стандартизированный G-code	Определяется производителем
Гибкость	Применим для одной или нескольких операций	Применим для большого количества операций

Таким образом, промышленные роботы на данном этапе развития могут служить неплохой альтернативой металлорежущим станкам. Особенно, в условиях, когда обработка заготовок больших размеров не требует высокой точности, но при этом важна высокая гибкость, мобильность и способность робота адаптироваться к различным задачам.

При этом промышленные роботы активно развиваются. В настоящее время проводится большое количество исследований, направленных на устранение описанных выше недостатков и количество проводимых каждый год исследований растет: более 80% научных статей по данной теме были опубликованы за последние девять лет [13].

Наиболее популярным решением для повышения точности работы робота для механической обработки является использование алгоритма управления и компенсации динамической жесткости в режиме реального времени. Например, подобные алгоритмы за последние два года были предложены в [15-17]. И хотя в этих исследованиях удалось добиться повышения точности обработки, добиться показателей станков с ЧПУ все еще не удалось.

В целом, все предлагаемые в современных исследованиях решения по повышению точности и повторяемости механической обработки промышленными роботами можно разделить на четыре категории:

- повышение жесткости за счет использования нового материала при изготовлении робота;
- снижение ошибок податливости за счет использования гравитационных механических компенсаторов;
- увеличение количества датчиков на рабочем органе для построения более точного алгоритма компенсации ошибок;
- непосредственно разработка новых алгоритмов компенсаций ошибок.

Подводя итог, стоит отметить, что, несмотря на большое количество современных исследований и открытий в области промышленных роботов, предстоит пройти еще длинный путь, прежде чем роботы для механической обработки смогут полноценно заменить традиционные металлорежущие станки. Однако можно предположить, что количество исследований, направленных на устранение проблемы низкой жесткости промышленных роботов в ближайшие годы будет расти, и постепенно, по мере появления новых более эффективных алгоритмов управления их жесткостью, роботы будут становиться все более и более подходящей альтернативой традиционным станкам. При этом не стоит забывать, что одним из основных трендов будущей промышленности будет высокая кастомизация [18], и именно промышленные роботы с их высокой гибкостью и адаптивностью будут играть важную роль в достижении кастомизации производства.

### Список литературы

1. Бахман В.А., Королева А.Н., Царегородцев Е.Л. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 2(128). – С. 1-7. doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.26.
2. Колисниченко Р.В. Повышение точности технологических роботов на основе применения прецизионных двухдвигательных следящих приводов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2022. – 22 с.
3. Perez-Ubeda R., Gutiérrez S., Zotovic S.R. A Study on Robot Arm Machining: Advance and Future Challenges // 29th International DAAAM Symposium. Zadar. 2018, pp. 0931-0940, doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.134.
4. Chen Y., Dong F. Robot machining: Recent development and future research issues // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, no. 66, pp. 1489-1497. doi.org/ 10.1007/s00170-012-4433-4.
5. Iglesias S.I., Sebastián M., Enrique A. Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential // Procedia Engineering. 2015, no. 132, pp. 911-917. doi.org/911-917. 10.1016/j.proeng.2015.12.577.
6. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Paskevich A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017, no. 48, pp. 12-29. doi.org/48.12-29.10.1016/j.rcim.2016.12.005.
7. Gao Y., Gao H., Bai K., Li M., Dong W. A Robotic Milling System Based on 3D Point Cloud // Machines. 2021, vol. 9, no. 355, pp. 1-20. doi.org/10.3390/machines9120355.

8. Евгеньев Г.Б., Крюков С.С., Частухин А.В. Обработывающие робототехнологические комплексы в машиностроении // Известия вузов. Машиностроение. – 2017. – №5 (686). – С. 60-71. – doi.org/10.18698/0536-1044-2017-5-60-71.
9. Barsan A.A. Brief Review of Robotic Machining // Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series. 2019, no. 71, pp. 9-13. doi.org/10.2478/aucts-2019-0003.
10. Caro S., Dumas C., Garnier S., Furet B. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, 2013, pp. 2921-2926.
11. Пять причин почему программировать промышленных роботов по-прежнему сложно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://murnik.ru/pjat-prichin-rochetu-programmirovat-promyshlennyh-robotov-po-prezhnemu-slozhno.html>.
12. Баланев Н.В., Янов Р.А. Анализ факторов, влияющих на точность позиционирования промышленного робота и методы обеспечения заданной точности // Достижения науки и образования. – 2016. – №1 (2). – С. 11-14.
13. Ji W., Wang L. Industrial Robotic Machining: A Review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, no. 103, pp. 1239-1255. doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z.
14. Wu K., Kuhlenkötter B. Experimental Analysis of the Dynamic Stiffness in Industrial Robots // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no 8332, pp. 1-14. doi.org/10.3390/app10238332.
15. de Almeida S., Mo J., Bil C., Ding S. Accurate vibration-free robotic milling electric discharge machining // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, no. 122, pp. 343-363. doi.org/10.1007/s00170-022-09526-0.
16. Liu Y., Tang D., Ju J. Electromechanical Coupling Dynamic and Vibration Control of Robotic Grinding System for Thin-Walled Workpiece // Actuators. 2023, vol. 12, no. 37, pp. 1-17, doi.org/10.3390/act12010037.
17. Zhang Y., Guo K., Sun J., Sun Y. Method of Postures Selection for Industrial Robot Joint Stiffness Identification // IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 62583-62592. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073671.
18. Медведева О.А., Рыкова Е.С. Кастомизация как основной вектор развития предприятий легкой промышленности в новых условиях развития рынка // Научный журнал «Костюмология». – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 1-11. doi.org/10.15862/21IVKL121.

### References

1. Bakhman V.A., Koroleva A.N., Tsaregorodtsev Y.L. An overview and analysis of the current state of the market for industrial robot manipulators // International Research Journal. 2023, vol. 128, no. 2, pp. 1-7. doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.26.
2. Kolesnichenko R.V. Improving the accuracy of technological robots based on the use of precision twin-motor servo drives: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Moscow: Moscow State Technical University: «STANKIN», 2022. – 22 p.
3. Perez-Ubeda R., Gutiérrez S., Zotovic S.R. A Study on Robot Arm Machining: Advance and Future Challenges // 29th International DAAAM Symposium. Zadar. 2018, pp. 0931-0940, doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.134.
4. Chen Y., Dong F. Robot machining: Recent development and future research issues // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, no. 66, pp. 1489-1497. doi.org/10.1007/s00170-012-4433-4.

5. Iglesias S.I., Sebastián M., Enrique A. Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential // *Procedia Engineering*. 2015, no. 132, pp. 911-917. doi.org/911-917. 10.1016/j.proeng.2015.12.577.
6. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Paskevich A. Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017, no. 48, pp. 12-29. doi.org/48.12-29.10.1016/j.rcim.2016.12.005.
7. Gao Y., Gao H., Bai K., Li M., Dong W. A Robotic Milling System Based on 3D Point Cloud // *Machines*. 2021, vol. 9, no. 355, pp. 1-20. doi.org/10.3390/machines9120355.
8. Evgenev B.G., Kryukov S.S., Chastukhin A.V. Machining Robotic Technology Systems in Mechanical Engineering // *Universities news: mechanical engineering*. 2017, №5 (686), pp. 60-71. doi.org/10.18698/0536-1044-2017-5-60-71.
9. Barsan A.A. Brief Review of Robotic Machining // *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*. 2019, no. 71, pp. 9-13. doi.org/10.2478/aucts-2019-0003.
10. Caro S., Dumas C., Garnier S., Furet B. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot // *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe, 2013, pp. 2921-2926.
11. Five Reasons Why Industrial Robot Programming Is Still Difficult [Electronic resource]. – Access mode: <https://murnik.ru/pjat-prichin-pochemu-programmirovat-promyshlennyh-robotov-po-prezhnemu-slozhno.html>.
12. Balanev N.V., Yanov R.A. Analysis of the factors affecting the positioning accuracy of an industrial robot and methods for ensuring the specified accuracy // *Achievements of Science and Education*. 2016, no. 1 (2), pp. 11-14.
13. Ji W., Wang L. Industrial Robotic Machining: A Review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, no. 103, pp. 1239-1255. doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z.
14. Wu K., Kuhlenkötter B. Experimental Analysis of the Dynamic Stiffness in Industrial Robots // *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 8332, pp. 1-14. doi.org/10.3390/app10238332.
15. de Almeida S., Mo J., Bil C., Ding S. Accurate vibration-free robotic milling electric discharge machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, no. 122, pp. 343-363. doi.org/10.1007/s00170-022-09526-0.
16. Liu Y., Tang D., Ju J. Electromechanical Coupling Dynamic and Vibration Control of Robotic Grinding System for Thin-Walled Workpiece // *Actuators*. 2023, vol. 12, no. 37, pp. 1-17, doi.org/10.3390/act12010037.
17. Zhang Y., Guo K., Sun J., Sun Y. Method of Postures Selection for Industrial Robot Joint Stiffness Identification // *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 62583-62592. doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073671.
18. Medvedeva O.A., Rykova E.S. The main directions of development for light industry enterprises in the context of a pandemic // *Journal of Clothing Science*. 2021, no. 1(6), pp. 1-11. doi.org/10.15862/21IVKL121.

<b>Воробьев Павел Сергеевич</b> – аспирант	<b>Vorobyev Pavel Sergeevich</b> – graduate student
<b>Волков Дмитрий Иванович</b> – доктор технических наук, профессор vorobps@gmail.com	<b>Volkov Dmitry Ivanovich</b> – doctor of technical sciences, professor

*Received 12.06.2023*