

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.914.1  
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54



## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ИНСТРУМЕНТАМИ

Гузев В.И., Сергеев С.В., Нуркенов А.Х., Батуев В.В., Сергеев Ю.С., Нестерюк Е.В.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** В настоящее время в промышленности применяются промышленные роботы в составе роботизированных комплексов для обработки крупногабаритных деталей, изготовляемых из композитных материалов и металлов. Например, приборные панели электровозов, корпуса пространственно-сложной формы и т.д. Существующие методы проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами на базе роботизированных комплексов основаны на эмпирическом подборе режимов резания для каждого конкретного изделия и ограничены в универсальности применения. Отсутствие методик обоснованного назначения режимов резания и выбора режущего инструмента, учитывающих оценку колебательно-го процесса в технологической системе в процессе обработки на базе роботизированных комплексов негативно сказывается как на производительности обработки (занижение режимов обработки с целью обеспечения точности и качества), так и на время внедрения детали в производство. **Используемые методы.** В работе произведены исследования колебательных процессов в технологической системе и возможности их учета при разработке методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами на базе роботизированного комплекса. **Новизна.** Произведено исследование колебаний роботизированного комплекса в процессе обработки крупногабаритных нежестких деталей вращающимся инструментом с целью определения жесткости технологической системы. **Результат.** Определена зависимость колебаний на шпинделе промышленного робота на микроперемещения заготовки, что позволило произвести расчет жесткости технологической системы роботизированного комплекса. **Практическая значимость.** Произведенные исследования позволяют определять жесткость технологической системы роботизированного комплекса путем тестовой обработки деталей, что позволит в дальнейшем назначать режимы резания, обеспечивающие заданную точность при максимальной производительности.

**Ключевые слова:** механическая обработка, вращающийся инструмент, роботизированный комплекс, колебательный процесс, микроперемещения, промышленный робот, фрезерование

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.*

© Гузев В.И., Сергеев С.В., Нуркенов А.Х., Батуев В.В., Сергеев Ю.С., Нестерюк Е.В., 2023

### Для цитирования

Исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса для реализации методики проектирования операции механической обработки вращающимися инструментами / В.И. Гузев, С.В. Сергеев, А.Х. Нуркенов, В.В. Батуев, Ю.С. Сергеев, Е.В. Нестерюк // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 45-54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# STUDY ON OSCILLATIONS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM OF A ROBOTIC COMPLEX TO IMPLEMENT THE TECHNIQUE OF DESIGNING ROTARY MACHINING OPERATIONS

Guzeev V.I., Sergeev S.V., Nurkenov A.Kh., Batuev V.V., Sergeev Yu.S., Nesteryuk E.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** Currently, industrial robots are used in the industry as part of robotic complexes for machining large-sized parts made from composite materials and metals. For example, control panels of electric locomotives, three-dimensional curved shells, etc. The existing methods for designing a rotary machining operation based on robotic complexes follow the empirical selection of cutting conditions for every specific product; therefore, they are limited in their versatility. The lack of methods for the reasonable assignment of cutting modes and the choice of a cutting tool, taking into account the assessment of the oscillatory process in the technological system during machining on the basis of robotic complexes, negatively influences both the output of machining (downgrading of machining modes in order to ensure accuracy and quality) and time required to introduce the parts into production. **Methods Applied.** The paper studies the oscillatory processes in the technological system and the possibility of taking them into account when developing a methodology for designing a machining operation with rotating tools based on a robotic complex. **Originality.** A study examined oscillations of a robotic complex during rotary machining of large-sized non-rigid parts with a rotating tool in order to determine rigidity of the technological system. **Result.** The authors determined the dependence between oscillations on the spindle of an industrial robot and micro-displacements of the workpiece, contributing to calculating rigidity of the technological system of the robotic complex. **Practical Relevance.** The research carried out makes it possible to determine rigidity of the technological system of the robotic complex by test machining of parts, which will contribute to a subsequent assignment of cutting modes that provide the specified accuracy at maximum performance.

**Keywords:** machining, rotating tool, robotic complex, oscillatory process, micro-displacements, industrial robot, milling

*The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.*

## For citation

Guzeev V.I., Sergeev S.V., Nurkenov A.Kh., Batuev V.V., Sergeev Yu.S., Nesteryuk E.V. Study on Oscillations of the Technological System of a Robotic Complex to Implement the Technique of Designing Rotary Machining Operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 45-54. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-45-54>

## Введение

Современные машиностроительные предприятия для механической обработки изделий активно используют промышленных роботов, оснащенных инструментальными шпинделями [1-8]. Гибкая переналадка оборудования, габаритные размеры и параметры рабочей зоны позволяют их эффективно использовать для обработки нежестких конструкций из композитных материалов и металлов. Однако анализ научных источников показал, что технологические решения имеют частный характер и не могут служить в качестве универсальных рекомендаций для обработки широкой номенклатуры машиностроительной продукции с использованием такого прогрессивного оборудования, как промышленные роботы, оснащенные инструментальными шпинделями. Вместе с этим из-за недостаточной изученности колебательных процессов, возникающих в процессе работы данного оборудования, и их влияния на точ-

ность и качество обрабатываемых деталей [9-20] отсутствуют рекомендации по научно обоснованному назначению режимов резания, выбору режущего инструмента и т.д. Следовательно, проектные решения далеки от совершенства и приводят к значительному увеличению этапа внедрения деталей в производство, связанному с поиском различных технологических решений, позволяющих обеспечить требуемые параметры точности и качества обрабатываемых деталей.

Ранее реализованное авторами экспериментальное исследование позволило установить, что жесткость технологической системы изменяется в широком диапазоне [21]. При этом жесткость детали при импульсной нагрузке отличается от жесткости при обработке вращающимся инструментом не менее чем на порядок, а жесткость шпинделя при обработке вращающимся инструментом отличается от жесткости детали не менее чем на два порядка. Это оказывает значительное влияние на точность и качество изготавливаемых

деталей, особенно при обработке крупногабаритных нежестких деталей. Исходя из этого, разработка рекомендаций по назначению режимов резания, основанных на учете математического моделирования жесткости элементов технологической системы, при обработке заготовок вращающимся инструментом в условиях нежесткой технологической системы роботизированного комплекса является актуальной задачей.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование колебаний технологической системы роботизированного комплекса и их влияния на ее жесткость для последующей разработки рекомендаций по выбору технологических параметров, обеспечивающих требуемую точность и качество изготовления деталей с обеспечением заданной производительности.

### Материалы и методы исследования

Оценка колебательного процесса элементов технологической системы производилась путем тестового определения вибраций на шпинделе роботизированного комплекса и косвенной оценки микроперемещений на образце. Для этого проведен ряд экспериментов с проверкой гипотезы о возможности измерения вибраций на детали. Показания колебаний снимались при помощи датчика, закрепленного на шпинделе роботизированного комплекса KUKA. Для проведения эксперимента спроектировано приспособление для базирования и закрепления образцов, обеспечивающее требуемое положение относительно системы координат поворотного стола роботизированного комплекса (рис. 1). Обработка образцов производилась последовательным фрезерованием окон и стенок в различных направлениях (рис. 2). Режимы резания назначены в соответствии со справочными нормативами от производителя инструмента Cerin (табл. 1).

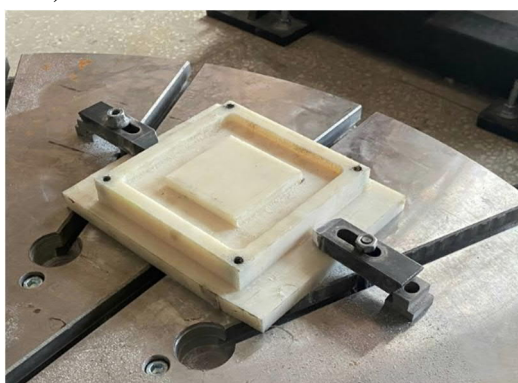
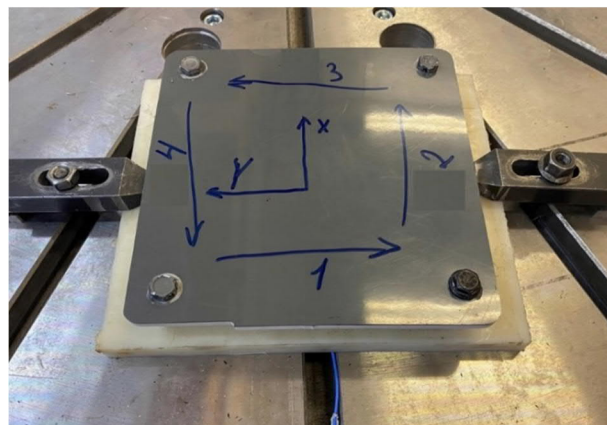
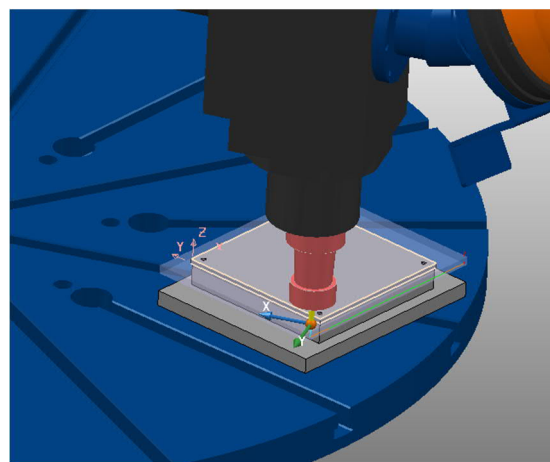


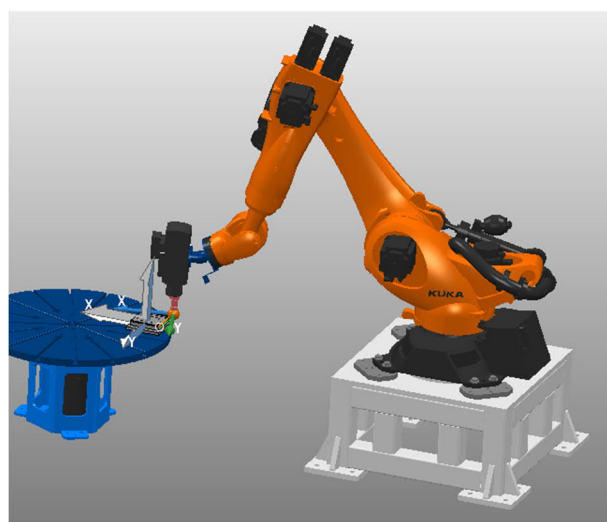
Рис. 1. Станочное приспособление для обработки образцов на роботизированном комплексе  
Fig. 1. A machine tool for machining samples on a robotic complex



а



б



в

Рис. 2. Моделирование обработки: а – схема обработки образцов; б – участок обработки в САМ-системе; в – общий вид роботизированного комплекса

Fig. 2. Machining simulation: a is a sample machining diagram, b is a machining area in the CAM system, c is a general view of the robotic complex

Таблица 1. Режимы резания инструмента Cerin  
Table 1. Cutting modes of the Cerin tool

Наименование параметра	Режимы резания
Скорость резания $V_c$	160 м/мин
Минутная подача $F$	800 мм/мин
Глубина фрезерования $t$	3 мм

В ходе эксперимента главной задачей было измерение параметров виброускорений на образце и шпинделе в процессе обработки. Для замеров амплитудно-частотных характеристик использовались акселерометры, закрепленные на шпинделе промышленного робота и станочном приспособлении (рис. 3). Измерения производились в системе координат оборудования по осям X, Y.

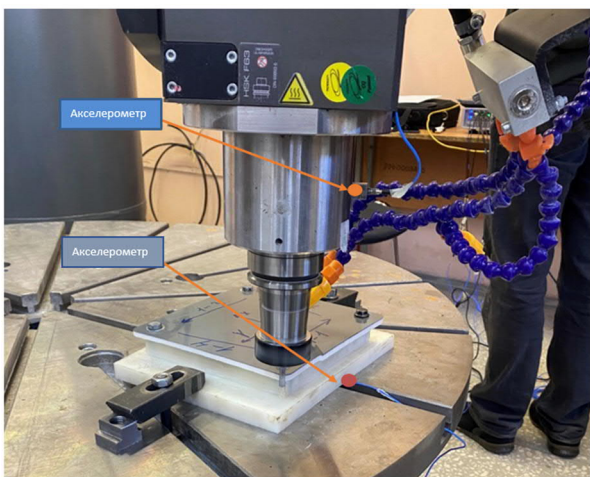


Рис. 3. Схема установки акселерометров на экспериментальной установке  
Fig. 3. A scheme of installation of accelerometers on the experimental facility

### Полученные результаты и их обсуждение

В ходе проведения экспериментов получены диаграммы виброускорений, возникающих на шпинделе промышленного робота и образце (рис. 4). С целью дальнейшего анализа результатов измерений произведена их статистическая обработка.

Обработка результатов измерений осуществлялась в следующем порядке:

1. Сравнивались предельные максимальные значения на диаграммах  $x_1$  и  $x_2$  в интервале по 20 секунд ( $x_1$  – максимум на образце,  $x_2$  – мак-

симум на шпинделе).

2. Определялись отношения максимального значения  $x_1$  на максимальный  $x_2$  в каждом интервале  $k_1$ :

$$\frac{x_1 i}{x_2 i} = k_i. \tag{1}$$

3. Находилось среднее значение коэффициента корреляции:

$$k_{i_{cp}} = \frac{k_i}{15}, \tag{2}$$

где  $k_{i_{cp}}$  – среднее значение коэффициента корреляции.

По результатам обработанных измерений построены графики изменения колебаний технологической системы на шпинделе промышленного робота и образце (рис. 5). Из графиков видно значительный всплеск амплитуды колебаний в начальный момент измерения, который обусловлен предельными вибрациями, возникающими в процессе врезания вращающегося инструмента в образец и стабилизирующимся в дальнейшем при стабилизации условий резания.

Для оценки микроперемещений на шпинделе и образце под действием силы резания произведено преобразование по методу Фурье. Результаты показали средние значения микроперемещений (табл. 2) и жесткости образца и шпинделя (табл. 3).

Анализ результатов показал, что жесткость образца отличается от жесткости шпинделя в процессе обработки на один порядок. Из этого следует, что необходимо учитывать данную разницу на стадии тестовой обработки.

С целью автоматизации обработки результатов измерений разработан алгоритм (рис. 6) и программный модуль для расчета микроперемещений на образце и шпинделе роботизированного комплекса, который позволяет в автоматическом режиме по заданным пользователем амплитудно-частотным характеристикам (в виде массивов данных) производить расчет и строить графики значений декремента затухания колебаний.

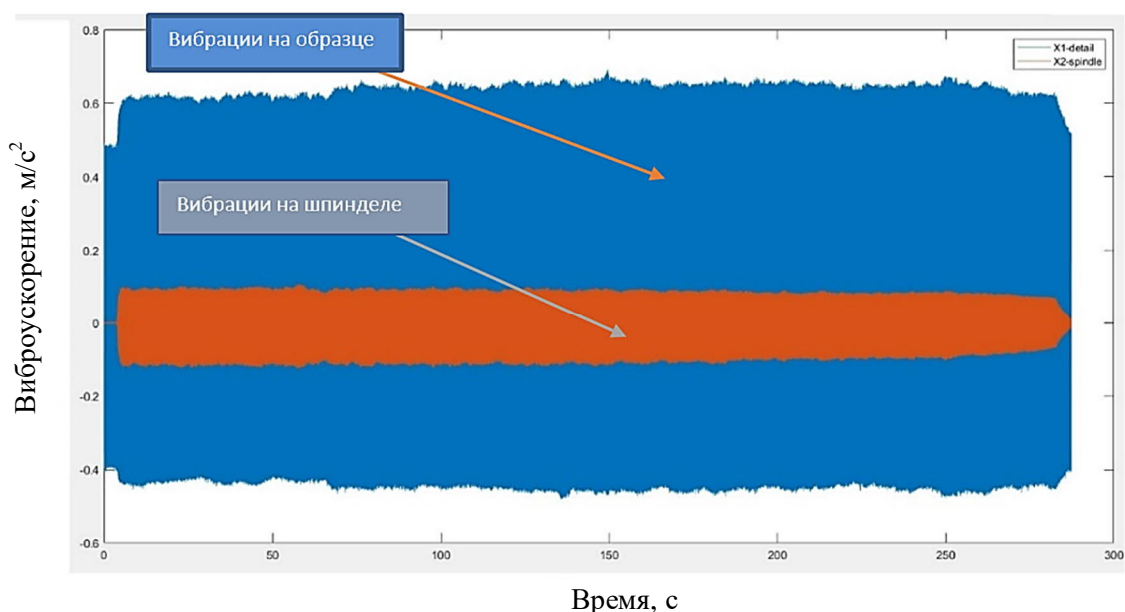


Рис. 4. Диаграмма виброускорений при обработке детали вращающимся инструментом на роботизированном комплексе

Fig. 4. A diagram of vibration accelerations when machining a part with a rotating tool on the robotic complex

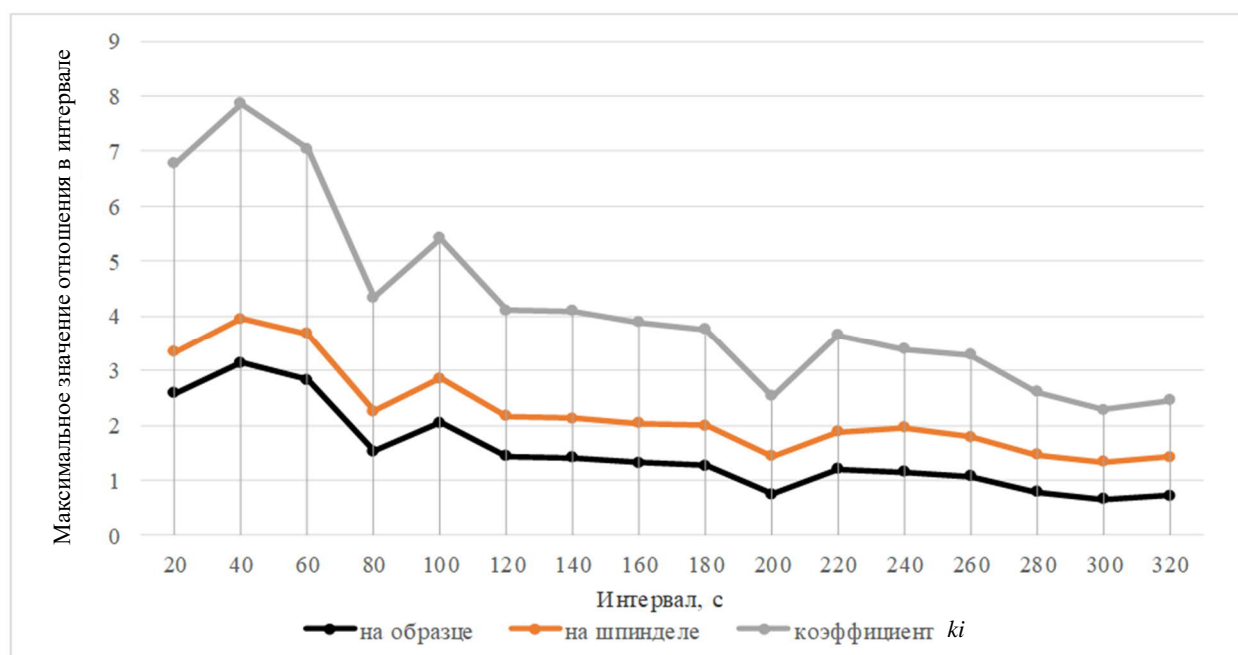


Рис. 5. Графики изменения колебаний рассматриваемых элементов технологической системы

Fig. 5. Graphs of changes in oscillations of the technological system components under study

Таблица 2. Средние значения микроперемещений образца и шпинделя промышленного робота  
Table 2. Average values of micro-displacements of the sample and the spindle of an industrial robot

Номер направления	Среднее значение микроперемещений, мм	
	на образце	на шпинделе
1	0,2364	0,0490
2	0,3752	0,0400
3	0,4075	0,0624
4	0,3774	0,0251

Таблица 3. Средние значения жесткости образца и шпинделя промышленного робота  
 Table 3. Average stiffness values of the sample and the spindle of an industrial robot

Номер направления	Среднее значение жесткости, Н/м	
	образца	шпинделя
1	$1,91 \cdot 10^6$	$1,89 \cdot 10^7$
2	$2,11 \cdot 10^6$	$2,19 \cdot 10^7$
3	$1,50 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^7$
4	$2,36 \cdot 10^6$	$1,79 \cdot 10^7$

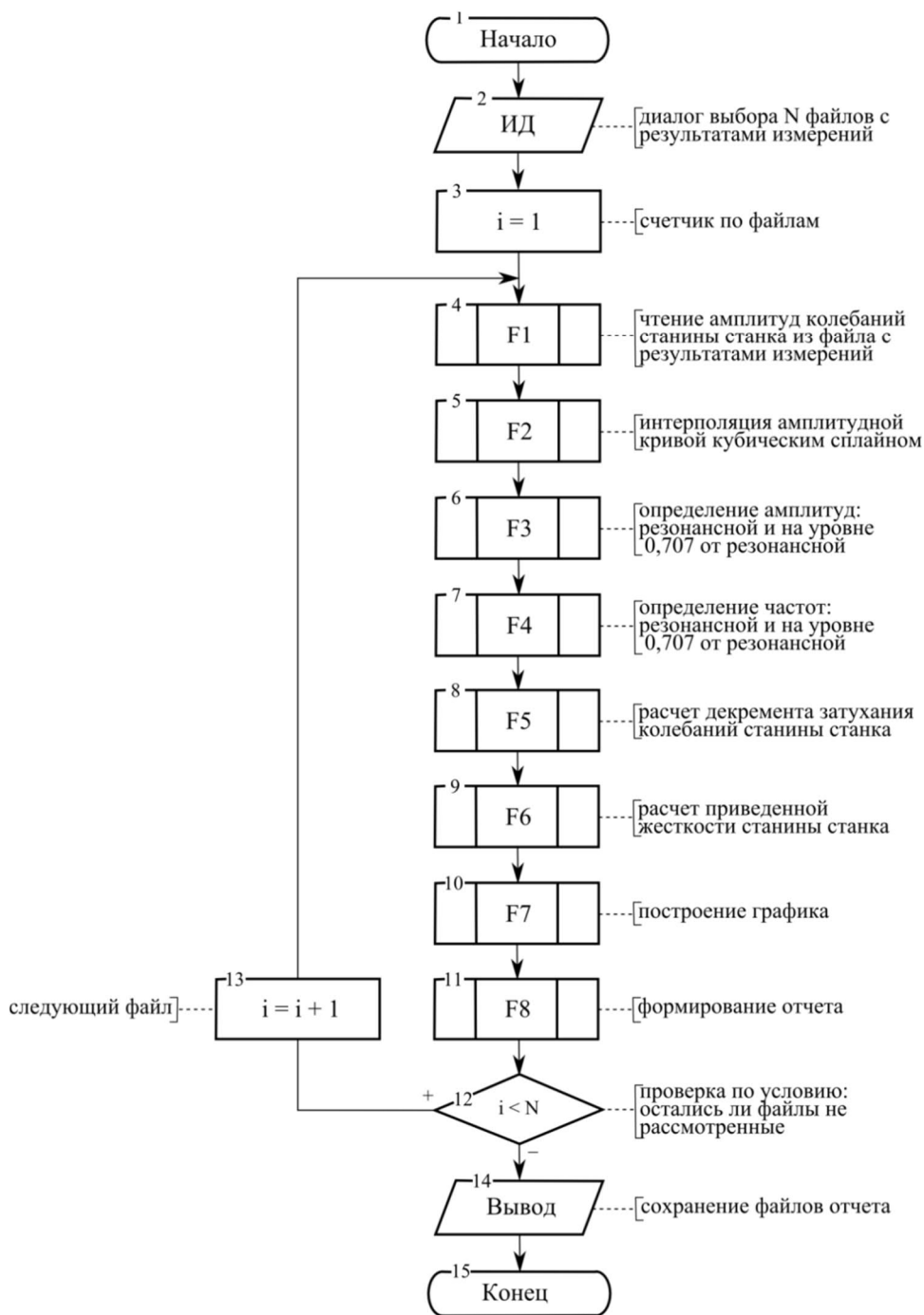


Рис. 6. Алгоритм программного модуля в C#  
 Fig. 6. POU algorithm in C#

В блоках алгоритма выполняются следующие действия:

1 – задаются начальные значения параметров состояния программы;

2 блок – происходит ввод исходных данных – выбор текстовых файлов с результатами измерений, которые будут обрабатываться в программном модуле;

3-13 блоки – обрабатывается итеративный цикл в соответствии с файлами с результатами измерений из перечня исходных данных;

4 блок – открывается табличный файл с результатами измерений и из него считываются амплитуды в массив внутренней памяти приложения;

5 блок – данные этого массива интерполируются кубическим сплайном кусочно-линейной функции, построенной по точкам с координатами амплитуды и частоты;

6 блок – определяется резонансная (пиковая) амплитуда и амплитуда, величина которой равна 0,707 от резонансной;

7 блок – определяются частоты, при которых резонансная кривая пересекает горизонтальные линии на уровне резонансной амплитуды и 0,707 от нее;

8 блок – производится расчет декремента затухания по величине резонансной амплитуды и ширине интервала на уровне 0,707 от резонансного пика;

9 блок – рассчитывается жесткость детали;

10 блок – строятся графики кусочно-линейной функции и функции интерполяции кубическим сплайном, вертикальные и горизонтальные линии, проходящие через точку резонансной амплитуды и точку амплитуды 0,707 от резонансной;

11 блок – формируется страница отчета в Microsoft Word, включая вывод исходных данных, комплекса графиков функций и результатов расчетов;

14 блок – в исходную папку приложения сохраняется файл с отчетом о результатах измерений амплитудно-частотных характеристик, а также основные результаты вычислений;

15 блок – завершаются все процессы приложения и оно закрывается.

### Заключение

Таким образом, в соответствии с целью эксперимента установлено:

1. Жесткость образца при обработке вращающимся инструментом отличается от жесткости шпинделя более чем в 10 раз, что вызывает необходимость учета этих параметров при проектировании технологической операции.

2. По значениям жесткости технологической системы определены значения микроперемещений на образце и шпинделе, что позволяет использовать их на этапе подготовки производства для назначения рациональных режимов резания, обеспечивающих заданные точность и качество обрабатываемой детали.

3. Для определения жесткости конкретной технологической системы роботизированного комплекса и дальнейшего использования полученных данных при расчете режимов резания предлагается тестовая обработка образца по приведенной выше методике.

4. Для автоматизации процесса обработки данных, полученных в результате тестовой обработки образца, разработан программный модуль.

С целью формирования базы знаний параметров жесткости роботизированных комплексов следует формировать массивы данных для различных типов заготовок и обрабатываемых материалов, что позволит в дальнейшем производить машинное обучение системы проектирования технологической подготовки производства.

### Список источников

1. Афонин В.Л. Робототехнические комплексы для финишной обработки пера лопаток ГТД // Экстремальная робототехника. 2017. №1. С. 382-386.
2. Интеллектуальный робототехнический комплекс для финишной обработки проточной части лопаток газотурбинных двигателей / В.Л. Афонин, Ю.В. Илюхин, М.Г. Яковлев и др. // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. №3. С. 49-56.
3. Горисев С.А., Ефременко А.П. Возможности САМ-системы Autodesk PowerMill 2018 в машиностроении // Технология машиностроения и материаловедение. 2018. №2. С. 6-8.
4. Изготовление литейного модельного комплекта с применением станка-робота FANUC / Л.Г. Саранин, П.И. Маленко, С.К. Захаров, Д.К. Белов, О.В. Костыгова // Известия Тульского университета. Технические науки. 2018. №12. С. 519-527.
5. Рассказчиков Н.Г. Применение промышленных роботов на операциях абразивной зачистки // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2019. №3. С. 10-13.
6. Дударев А.С. Инновационное применение роботов для производства изделий из полимерных композиционных материалов // СТИН. 2018. №10. С. 2-6.
7. Perez R., Gutiérrez S.C., Zotovic R. A study on robot arm machining: Advance and future challenges // 29th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Croatia: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing. 2018, pp. 931-940.

8. Bo T., XingWei Z., Han D. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study // Science China Technological Sciences. 2019, vol. 62, no. 8, pp. 1388-1400.
9. Iglesias I., Ares J.E., González-Gaya C., Morales F., Rosales V.F. Predictive Methodology for Dimensional Path Precision in Robotic Machining Operations // IEEE Access. 2018, vol. 6, no. 3, pp. 49217-49223.
10. Peng J.F., Ding Y., Zhang G., Ding H. Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes // Science China Technological Sciences. 2020, vol. 63, no. 9, pp. 1751-1763.
11. Экспериментальные исследования жёсткости станка-робота / Б.А. Еникеев, А.Р. Сайдуганов, О.К. Акмаев, Р.Г. Кудояров // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 273-276.
12. Бутенко В.И., Давыдова И.В., Атоян Т.В. Влияние динамической жёсткости технологического робота на качество обработанной поверхности детали // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. №2(75). С. 21-27.
13. Кудояров Р.Г., Фецак С.И., Башаров Р.Р. Методика измерений виброустойчивости станка-робота // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 292-296.
14. He F.-X., Liu Y., Liu K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 101, no. 9-12, pp. 2739-2750.
15. Mamedov S., Popov D., Mikhel S., Klimchik A. Increasing Machining Accuracy of Industrial Manipulators Using Reduced Elastostatic Model // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020, vol. 613, pp. 384-406.
16. Klimchik A., Pashkevich A., Chablat D. MSA-technique for stiffness modeling of manipulators with complex and hybrid structures // IFAC-PapersOnLine. 2018, vol. 51, no. 22, pp. 37-43.
17. Габитов А.А., Каляшина А.В. Анализ обеспечения точности позиционирования промышленных роботов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. №4. С. 49-54.
18. Измерение собственных и вынужденных частот робота-станка и станка модели 500V/5 / А.Ф. Гаймалов, Б.А. Еникеев, А.Н. Типеев, С.И. Фецак, Ю.В. Идрисова // Станкостроение и инновационное машиностроение: материалы всероссийской научно-технической конференции. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 318-224.
19. Barnfather J.D., Goodfellow M.J., Abram T. Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 95, no. 1-4, pp. 1421.
20. Xiong G., Ding Y., Zhu L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019, vol. 55, pp. 19-28.
21. Экспериментальное исследование жёсткости технологической системы на базе промышленного робота KUKA KR 300 R2500 ULTRA / Нуркенов А.Х., Гузеев В.И., Батуев В.В., Нестерюк Е.В., Павлов С.А. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2022. Т. 22. № 1. С. 48-58.

#### References

1. Afonin V.L. Robotic complexes for finishing of gas-turbine engine blades. *Ekstremalnaya robototekhnika* [Extreme Robotics]. 2017;(1):382-386. (In Russ.)
2. Afonin V.L., Ilyukhin Yu.V., Yakovlev M.G. et al. The intelligent robotic complex for finishing the flow path of the blades of gas-turbine engines. *Vestnik MGTU Stankin* [Bulletin of STANKIN Moscow State University of Technology]. 2019;(3):49-56. (In Russ.)
3. Gorisev S.A., Efremenko A.P. Autodesk PowerMill 2018 capabilities in mechanical engineering. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedeniya* [Mechanical Engineering Technology and Materials Science]. 2018;(2):6-8. (In Russ.)
4. Saranin L.G., Malenko P.I., Zakharov S.K., Belov D.K., Kostygova O.V. Manufacturing a casting and molding set using a FANUC robot]. *Izvestiya Tulskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula University. Engineering Sciences]. 2018;(12):519-527. (In Russ.)
5. Rasskazhnikov N.G. The use of industrial robots in abrasive cleaning operations]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika* [Mechatronics, Automation and Robotics]. 2019;(3):10-13. (In Russ.)
6. Dudarev A.S. Innovative application of robots for the production of products from polymer composite materials. *STIN* [Machines and Tools]. 2018;(10):2-6. (In Russ.)
7. Perez R., Gutiérrez S.C., Zotovic R. A study on robot arm machining: Advance and future challenges. 29th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Croatia: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing. 2018;931-940.
8. Bo T., XingWei Z., Han D. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. Science China Technological Sciences. 2019;62(8):1388-1400.
9. Iglesias I., Ares J.E., González-Gaya C., Morales F., Rosales V.F. Predictive methodology for dimensional path precision in robotic machining operations. IEEE Access. 2018;6(3):49217-49223.
10. Peng J.F., Ding Y., Zhang G., Ding H. Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes. Science China Technological Sciences. 2020;63(9):1751-1763.



11. Enikeev B.A., Sayduganov A.R., Akmaev O.K., Kudoyarov R.G. Experimental studies on rigidity of a robot machine. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;273-276. (In Russ.)
12. Butenko V.I., Davydova I.V., Atoyev T.V. Influence of dynamic rigidity of a technological robot on the quality of the machined surface of parts. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2019;(2(75)):21-27. (In Russ.)
13. Kudoyarov R.G., Fetsak S.I., Basharov R.R. A method for measuring the vibration resistance of a robot machine]. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;292-296. (In Russ.)
14. He F.-X., Liu Y., Liu K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;101(9-12):2739-2750.
15. Mamedov S., Popov D., Mikhel S., Klimchik A. Increasing machining accuracy of industrial manipulators using reduced elastostatic model. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020;613:384-406.
16. Klimchik A., Pashkevich A., Chablat D. MSA-technique for stiffness modeling of manipulators with complex and hybrid structures. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(22):37-43.
17. Gabitov A.A., Kalyashina A.V. Analysis of ensuring positioning accuracy of industrial robots. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of Tupolev Kazan State Technical University]. 2018;(4):49-54. (In Russ.)
18. Gaimalov A.F., Enikeev B.A., Tipeev A.N., Fetsak S.I., Idrisova Yu.V. Measurement of natural and forced frequencies of a robot machine and the 500V/5 model machine. Machine Tool Building and Innovative Mechanical Engineering: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019;318-324. (In Russ.)
19. Barnfather J.D., Goodfellow M.J., Abram T. Achievable tolerances in robotic feature machining operations using a low-cost hexapod. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;95(1-4): 1421-1436.
20. Xiong G., Ding Y., Zhu L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;55:19-28.
21. Nurkenov A.Kh., Guzeev V.I., Batuev V.V., Nesteruk E.V., Pavlov S.A. Experimental study on rigidity of a technological system based on KUKA KR 300 R2500 ULTRA industrial robot. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of South Ural State University]. 2022;22(1):48-58. (In Russ.)

Поступила 16.12.2022; принята к публикации 17.01.2023; опубликована 27.03.2023  
Submitted 16/12/2022; revised 17/01/2023; published 27/03/23

**Гузев Виктор Иванович** – доктор технических наук, профессор,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

**Сергеев Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, профессор,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

**Нуркенов Антон Халилевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: nurkenovah@susu.ru. ORCID 0000-0002-5832-031X

**Батуев Виктор Викторович** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: batuevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9969-4310

**Сергеев Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

**Нестерюк Егор Владимирович** – аспирант,  
Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.  
Email: e1g9o9r@mail.ru. ORCID 0000-0001-6955-7702

**Viktor I. Guzev** – DrSc (Eng.), Professor,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: guzeevvi@susu.ru. 0000-0002-8277-1217

**Sergey V. Sergeev** – PhD (Eng.), Professor,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: sergeevsv@susu.ru. 0000-0001-7868-4295

**Anton Kh. Nurkenov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: nurkenovah@susu.ru. 0000-0002-5832-031X

**Viktor V. Batuev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: batuevvv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9969-4310

**Yury S. Sergeev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

**Egor V. Nesteryuk** – postgraduate student,  
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.  
Email: e1g9o9r@mail.ru. ORCID 0000-0001-6955-7702