

**МЕТОДИКА ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
РОТАЦИОННОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**Т. В. БАСОВА<sup>1\*</sup>, Ю. С. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, М. В. БАСОВА<sup>2</sup><sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

\* tvbasova@itmo.ru

<sup>2</sup> Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф.

Устинова, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Предложена новая методика операционного контроля режущего инструмента с применением бесконтактных датчиков его наладки и рассмотрены основные трудности контроля инструмента в производстве. Разработанная методика позволяет повысить уровень автоматизации технологической подготовки производства за счет применения рекомендованной разработанной базы данных технических параметров инструмента и усовершенствования алгоритма обработки результатов измерений, полученных бесконтактными датчиками наладки инструмента. Контроль по новой методике повышает эффективность производства участков, на которых размещены станки с ЧПУ, и обеспечивает заданное качество изготовления деталей. Преимущества методики — экономичность решения за счет применения только штатных датчиков станков с ЧПУ, а также исключение ручной обработки результатов измерений. Актуальность работы обусловлена распространенностью применения ротационного фрезерного инструмента в технологии современного приборостроительного и машиностроительного производства.

**Ключевые слова:** износ режущего инструмента, методика, циклы измерения, операционный контроль, ротационный режущий инструмент, станки с ЧПУ, датчик наладки инструмента, алгоритмы

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 17984ГУ/2022 от 26.05.2022).

**Ссылка для цитирования:** Басова Т. В., Андреев Ю. С., Басова М. В. Методика операционного контроля ротационного режущего инструмента на станках с числовым программным управлением // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 56—65. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-56-65.

**METHOD OF OPERATIONAL CONTROL OF A ROTARY CUTTING TOOL  
ON MACHINE TOOLS  
WITH NUMERICAL CONTROL**T. V. Basova<sup>1\*</sup>, Yu. S. Andreev<sup>1</sup>, M. V. Basova<sup>2</sup><sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia

\* tvbasova@itmo.ru

<sup>2</sup> D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, St. Petersburg, Russia

**Abstract.** A new method of operational control of a rotary cutting tool with the use of non-contact tools setters is proposed, and main difficulties of rotary cutting tools control in a manufacturing plant are considered. The developed technique makes it possible to increase the level of automation of technological preparation of production through the use of recommended database of the tool technical parameters and improvement of the algorithm for processing the measurement results obtained by non-contact tool setting sensors. Control performed in accordance with the new method increases the efficiency of the production of sections where CNC machines are located and ensures the specified quality of parts manufacturing. The advantages of the technique are the cost-effectiveness of the solution due to the use of only standard sensors of CNC machines, as well as the exclusion of manual processing of measurement results. The relevance of the work is due to the prevalence of the use of rotary milling tools in the technology of modern instrument-making and machine-building enterprises.

**Keywords:** cutting tool wear, methodology, measurement cycles, operational control, rotary cutting tool, CNC machines, tool adjustment sensor, algorithms

**Acknowledgment:** the work was carried out with the support of the Innovation Assistance Fund (Contract No. 17984GU/2022 dated 05/26/2022).

**For citation:** Basova T. V., Andreev Yu. S., Basova M. V. Method of operational control of a rotary cutting tool on machine tools with numerical control. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 56—65 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-56-65.

**Введение.** Широкое применение ротационного режущего инструмента (РРИ) на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) обусловлено, в частности, возможностью повышения производительности изготовления деталей, что особенно важно при обработке перспективных материалов, используемых в приборостроительной, авиационной, космической, атомной промышленности [1]. Возможными причинами, снижающими точность механической обработки деталей, а также производительность обрабатывающих станков с ЧПУ, являются превышение максимально допустимого износа режущего инструмента и неполная автоматизация процесса технологической подготовки производства [2]. Это в результате приводит к 1) снижению параметров режимов резания в два раза, а в некоторых случаях и в 5 раз относительно рекомендуемых производителями РРИ, 2) простоям, вызванным отказом режущего инструмента, а значит, низкой эффективности производства, 3) высокой вероятности технологического брака, 4) несоблюдению требуемого качества изготовления детали и 5) увеличению себестоимости изготовления детали [3].

Изменение геометрии режущего клина может привести как к возрастанию сил резания, так и к появлению вибраций в процессе обработки [4, 5]. Некорректное определение координат нулевой точки режущего инструмента на станке с ЧПУ (наладка инструмента) также может привести к технологическому браку. Эти факторы особенно сильно выражены при работе с фасонным РРИ, таким как резьбовая фреза [6—8]. Автоматизированное измерение и привязка РРИ для станка с ЧПУ выполняются контактными и бесконтактными датчиками наладки инструмента [9], однако при работе датчиков наладки по алгоритму, заложенному по умолчанию, невозможно обеспечить операционный контроль РРИ без вмешательства специалистов в технологическую систему. В итоге недостатки данной производственной методики — одна из основных проблем обеспечения как эффективности функционирования участков, на которых размещены станки с ЧПУ, так и качества изготовления деталей.

Таким образом, при автоматизированном изготовлении деталей на станках с ЧПУ вопросы повышения качества их изготовления и контроля РРИ являются крайне важными, особенно в связи с тенденцией к исключению участия человека в работе технологической системы [10—14]. В этой связи актуальна разработка простой и экономичной системы мониторинга состояния РРИ с минимальным количеством устанавливаемых датчиков и высокой эффективностью [15—17].

**Традиционная производственная методика контроля РРИ на станках с ЧПУ.** Многие металлообрабатывающие предприятия машиностроения и приборостроения комплектуют станки с ЧПУ датчиками наладки инструмента для осуществления контроля и измерения геометрических размеров РРИ. Для фрезерных станков с ЧПУ в основном применяют бесконтактные датчики наладки инструмента благодаря следующим их преимуществам по сравнению с контактными датчиками:

- возможность работы с режущим инструментом малого размера, так как измерения производятся без оказания давления;
- возможность контроля режущего инструмента фасонной формы, а также обнаружения сколов режущих кромок сменных пластин;
- более высокая скорость измерения.

Согласно паспортным данным датчиков наладки инструмента, точность выполнения измерений составляет, как правило, 1...5 мкм с повторяемостью результатов 1—2 мкм [18].

Производственную методику измерения геометрических размеров инструмента можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1 (здесь УП — управляющая программа) [18, 19].

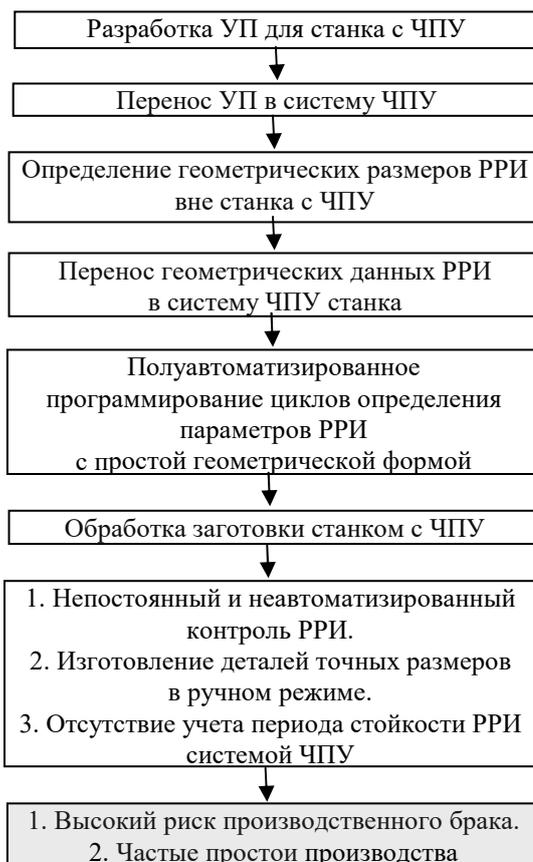


Рис. 1

Для функционирования датчика наладки инструмента необходима программа (цикл измерения), разрабатываемая на специальном языке макрокоманд, поддерживаемых конкретной системой управления станка с ЧПУ. Цикл измерения содержит параметры инструмента, значения которых в основном вводятся вручную через систему ЧПУ станка [20].

Так как программирование циклов измерений для некоторых типов РРИ является сложным и требует подстановки необходимых значений параметров, то для определения износа РРИ датчики наладки, как правило, не используются, а используются только для определения его нулевых точек перед запуском управляющей программы обработки. При этом следует отметить, что цикл измерения при функционировании по подобной схеме запускается один раз и контроль износа РРИ не производится. Также алгоритм функционирования датчика наладки инструмента „не посылает“ на станок с ЧПУ конкретные команды управления, обеспечивающие его автоматическую адаптацию к изменению технологических характеристик обработки (рис. 2).

В результате состояние РРИ не определяется автоматически, а устанавливается косвенно, что требует вмешательства специалистов для отладки технологической системы. Возможными последствиями неавтоматизированного контроля являются как простои оборудования, так и высокий риск производственного брака, вызванные неполной автоматизацией процесса технологической подготовки производства.

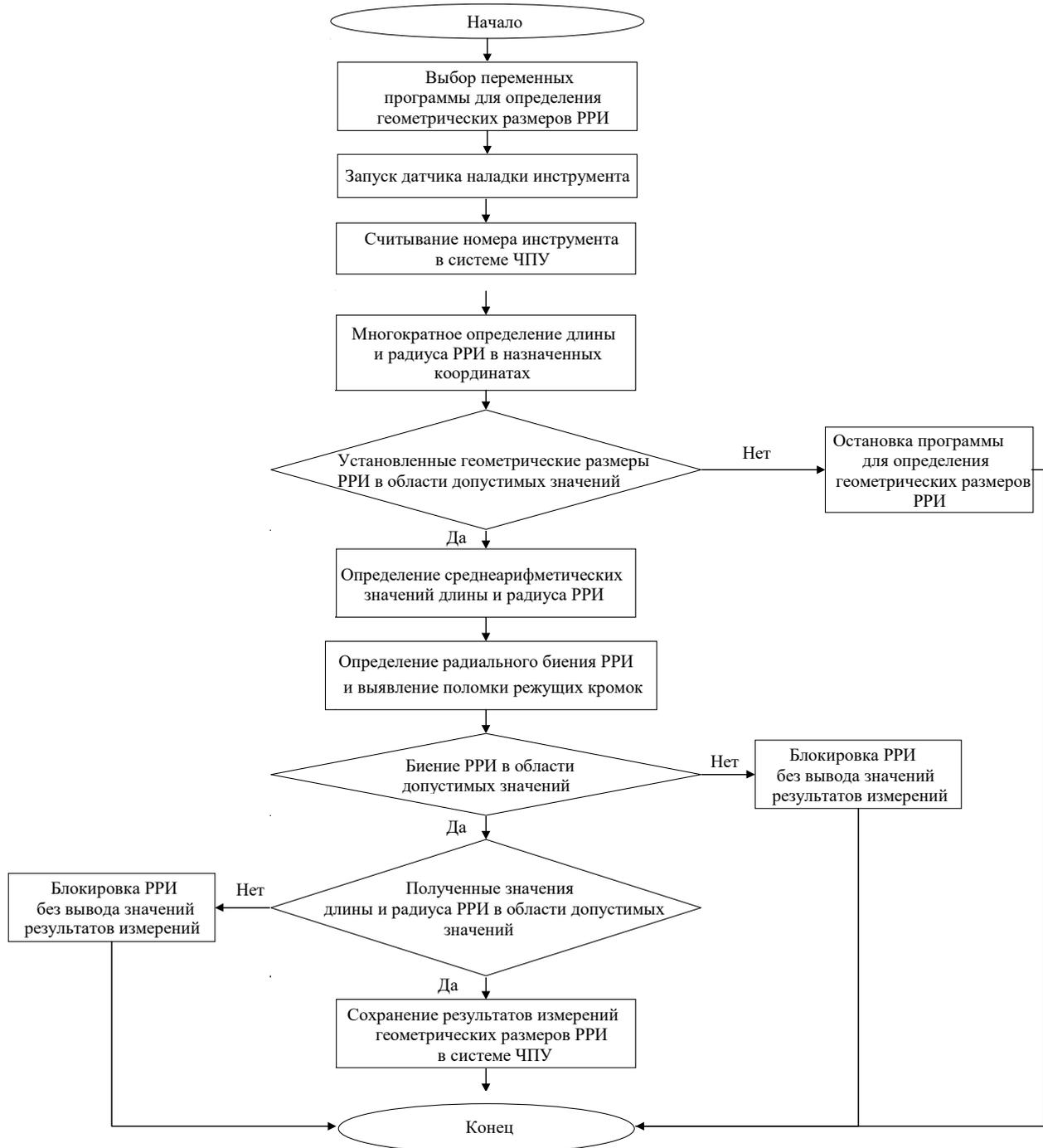


Рис. 2

**Сложности при программировании цикла измерения.** Значения параметров РРИ в каждом цикле измерения влияют на результаты измерений, выполняемых датчиком наладки, а следовательно, на размеры изготавливаемой детали, поэтому должны быть подобраны индивидуально в зависимости от конкретного инструмента и цели измерения. Основными параметрами инструмента являются: радиус (диаметр) инструмента, радиус режущей кромки, допустимые значения износа инструмента, количество режущих кромок, координаты точек измерения геометрических размеров РРИ в радиальном и осевом положении луча лазера (в настоящей статье обозначены как  $P_x$  и  $P_z$  соответственно) и пр.

На данный момент многие приложения для автоматизации программирования датчиков наладки инструмента имеют следующие недочеты:

- ручной ввод данных;

- невозможность редактирования значений параметров, заложенных по умолчанию;
- отсутствие постоянного вывода программ для автоматической проверки РРИ.

Параметр  $P_z$  отвечает за положение луча лазера для определения радиуса РРИ и отсчитывается относительно вершины РРИ. Параметр  $P_x$  отвечает за радиальное положение луча лазера для измерения длины РРИ и, как правило, определяется относительно центра РРИ (рис. 3). Так, например, для корректного измерения радиуса (диаметра) гребенчатых резьбовых фрез бесконтактным датчиком наладки инструмента значение параметра  $P_z$  должно обеспечить попадание луча лазера на вершину режущей кромки, а именно на первую режущую кромку из-за ее более быстрого износа, чем остальные (в случае фрезерования в направлении сверху вниз относительно верхнего торца заготовки) [21]. При этом точка, в которой определяется длина резьбовой фрезы должна располагаться на плоской части торца пластины (см. рис. 3) [22]. В каталогах ведущих производителей резьбовых фрез не указывается значение параметра  $P_z$ , что требует его предварительного определения на прессеторе [23]. Измерения размеров РРИ со сложной геометрией на прессеторе могут быть трудоемкими и многократными.



Рис. 3

В случае запуска управляющей программы фрезерования резьбы в отверстии резьбовой фрезой, длина и радиус которой были определены датчиком наладки инструмента по программе со значениями параметров  $P_x$  и  $P_z$ , отличающимися от фактических более чем на 0,1 мм, произойдет брак резьбы. Этот результат обусловлен тем, что при внесении некорректных значений параметров  $P_x$  и  $P_z$  на станке с ЧПУ будут использоваться ошибочные координаты нулевой точки РРИ, что приведет к смещению траектории его движения относительно заданной в коде управляющей программы.

**Разработанная методика контроля РРИ на станках с ЧПУ.** В настоящей статье под методикой операционного контроля РРИ подразумевается контроль износа инструмента посредством определения его геометрических размеров датчиком наладки инструмента в начале и в конце технологических переходов с целью адаптации оборудования с ЧПУ к изменениям технологических характеристик обработки (без постороннего вмешательства в технологическую систему). На рис. 4 представлена схема функционирования станка с ЧПУ по предлагаемой методике, включающей новые алгоритмы обработки результатов измерений датчиком наладки инструмента. Разработанные алгоритмы имеют наибольшую эффективность для горизонтальных фрезерных станков со сменными паллетами.



Рис. 4

Информация о технических параметрах инструмента, содержащаяся в реляционной базе данных (см. таблицу), через постпроцессор станка с ЧПУ автоматически формируется в программе определения геометрических размеров инструмента, которая вызывается по командам измерения в начале и в конце технологических переходов. В таблице (базе данных) приведены следующие данные, необходимые для программирования цикла измерения:

- номер инструментальной наладки;
- способ измерения геометрических размеров инструмента;
- координаты точек  $P_x$  и  $P_z$ ;
- допуск на износ РРИ;
- допуск на поломку РРИ;
- допуск для сравнения с прибором предварительной настройки инструмента ( $\Delta$  установки) и пр.

Номер РРИ	Способ измерения	$P_x$	$P_z$	Допуск на износ РРИ, мм	Допуск на поломку РРИ, мм	$\Delta$ установки, мм	Период стойкости РРИ, мин
T1	1	0,5	0,5	0,1	0,15	0,05	150
T2	1	0,5	0,5	0,1	0,15	0,05	60

Применение базы данных сокращает процессы ручного ввода данных и подбора значений параметров, необходимых для программирования цикла измерения. Команды для вызова циклов измерений выводятся постпроцессором ЧПУ в коде управляющей программы с учетом особенностей РРИ автоматически в начале и в конце технологических переходов. В целях повышения уровня автономности оборудования с ЧПУ от оператора алгоритм функционирования датчика наладки инструмента был дополнен (рис. 5). Преимуществами расширенного алгоритма работы датчиков наладки по сравнению с исходным алгоритмом являются:

- 1) автоматическая блокировка некорректно собранной инструментальной наладки с ее заменой на дубль для запуска технологической операции;
- 2) автоматическая блокировка износившегося РРИ с его заменой на дубль для продолжения технологической операции;
- 3) автоматическая блокировка РРИ и замена его на дубль, а также вывод станочной паллеты с заготовкой из производственного цикла для дальнейшей проверки заготовки в случае поломки или чрезмерного износа РРИ после выполнения им обработки.

В результате функционирования по подобной схеме РРИ автоматически контролируется на станке с ЧПУ, а также осуществляется смещение траектории движения РРИ, указанной в управляющей программе, на сохраненное в системе ЧПУ установленное значение износа инструмента (в случае если значение не превышает предельное допустимое). Разработанные программы операционного контроля РРИ для измерения его параметров в начале и в конце технологических переходов минимизируют производственный брак, вызванный работой на фрезерном станке с ЧПУ с изношенным РРИ. За счет функционирования по разработанным программам операционного контроля РРИ обеспечивается требуемое качество изготовления деталей.

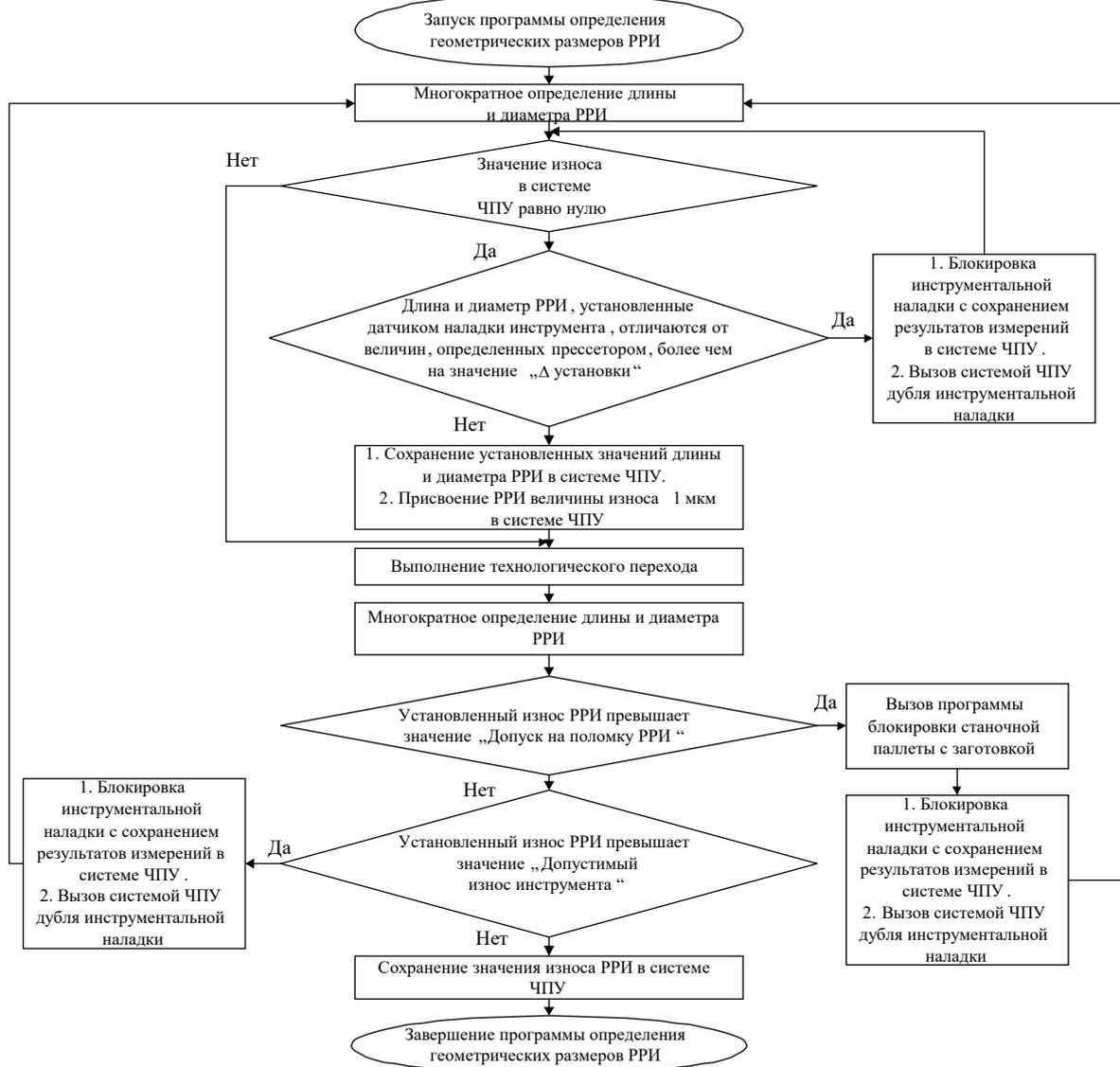


Рис. 5

**Результаты внедрения предлагаемой методики.** На рис. 6 представлена диаграмма, полученная на основе статистических данных, собранных с помощью системы мониторинга станков с ЧПУ „СМПО Foreman“ [24] для загрузки двух горизонтально-фрезерных обрабатывающих центров, выполнявших один заказ в течение месяца.

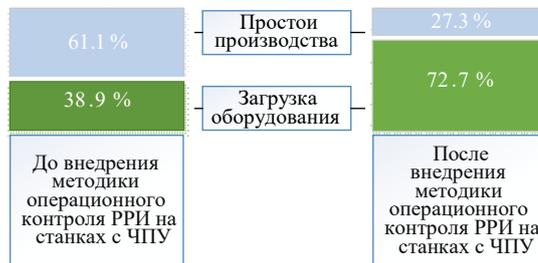


Рис. 6

Первый обрабатывающий центр функционировал с использованием производственной методики контроля РРИ, а на втором была внедрена предлагаемая методика операционного контроля РРИ. Согласно полученным статистическим данным, коэффициент загрузки оборудования был увеличен на 34 %. Также некоторые причины простоев, а именно простои, связанные с обслуживанием станка с ЧПУ (выверка/обнуление/замер РРИ), контролем детали оператором станка с ЧПУ с помощью измерительных инструментов, изготовлением элемен-

тов детали в ручном режиме на станке с ЧПУ и другими операциями, были сокращены или устранены вовсе (рис. 7).

Время простоя оборудования на основании статистических данных за 1 месяц (ч)

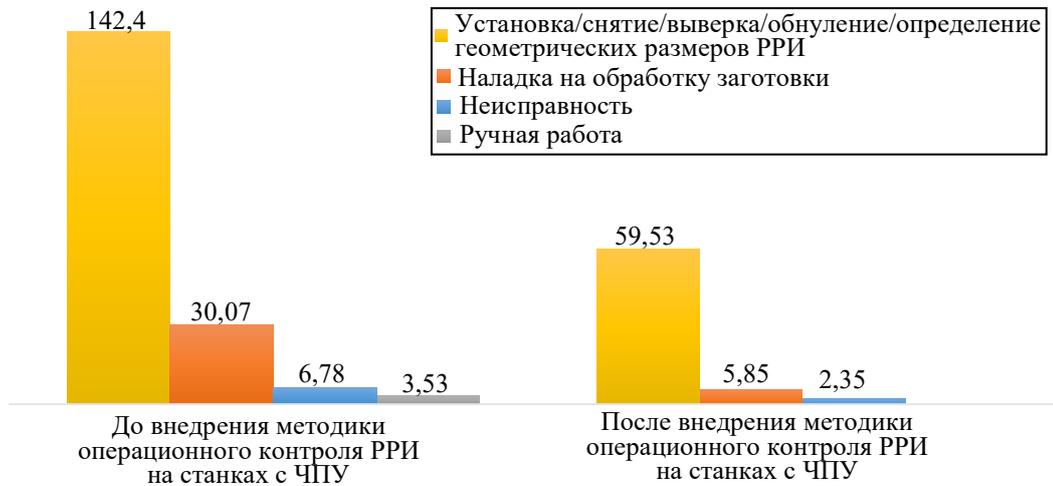


Рис. 7

Таким образом, был сделан вывод, что внедрение разработанной методики операционного контроля РРИ обеспечивает высокую эффективность производства за счет снижения простоев, а также заданное качество изготовления деталей.

**Заключение.** Разработана методика операционного контроля ротационного режущего инструмента, в основу которой положены считывание информации из реляционной базы данных технических параметров инструмента в течение циклов измерений, а также алгоритм обработки результатов измерений бесконтактными датчиками наладки инструмента. Применение базы данных способствует сокращению ошибок измерений геометрических размеров инструмента за счет автоматического формирования цикла измерения. Представленная методика особенно актуальна для режущего инструмента со сложной геометрической формой, как, например, у резьбовых фрез. Функционирование по предлагаемой методике операционного контроля РРИ обеспечивает автоматическую адаптацию фрезерных станков с ЧПУ к изменениям некоторых технологических характеристик механической обработки; автоматизацию измерения параметров РРИ; повышение уровня автономности оборудования с ЧПУ от вмешательства оператора в технологическую систему; сокращение вероятности появления брака, вызванного работой с изношенным или сломанным РРИ, а также неверным определением координат его нулевой точки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов М. Ю., Алексеенко Д. А., Евтухов С. Н. Специальный ротационный режущий инструмент // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Серия. Машиностроение. 2012. № 33. С. 154—156.
2. Araujo A. C., Silveira J. L., Kapoor S. Force prediction in thread milling // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2004. N 26. P. 82—88.
3. Junior M. V., Baptista E. A., Araki L., Smith S., Schmitz T. The role of tool presetting in milling stability uncertainty // Procedia Manufacturing. 2018. N 26. P. 164—172.
4. Araujo A. C., Fromentin G., Poulachon G. Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy // Intern. Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. N 67. P. 28—34.
5. Benardos P. G., Vosniakos G. C. Predicting surface roughness in machining: a review // Intern. Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. N 43(8). P. 833—844.
6. Федоров В. А., Мельников Д. А., Сухарева А. А. Выбор инструмента для резьбофрезерования отверстий // Научный альманах. 2017. № 2—3. С. 140—145.

7. Овсянников В. Е., Суворов А. И. К вопросу применения резбобфрезерования при обработке отверстий // Вестн. Курганского гос. ун-та. 2013. № 2 (29).
8. Rao K. V., Murthy B. S. N., Rao N. M. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring // Measurement. 2013. N 46(10). P. 4075—4084.
9. Richter A. Breaking the beam // Cutting Tool Engineering. 2010. N 62 (4). P. 43—47.
10. Timofeev D. Yu., Khalimonenko A. D., Nacharova M. A. Preliminary local thermal impact as a surface quality assurance factor // Materials Science Forum. 2021, Vol. 1031 MSF. P. 125—131 DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.125/
11. Khalimonenko A. D., Timofeev D. Y., Golikov T. S. Cutting tool for turning large workpieces // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1399(4). P. 044082. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044082.
12. Григорьев С. Н., Сиональников В. А., Гурин В. Д. Особенности контактных явлений на передней поверхности режущего инструмента с износостойким покрытием при прерывистом резании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7. С. 45—51.
13. Максимов Ю. В. и др. К вопросу об обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ // Изв. Московского гос. техн. ун-та МАМИ. 2012. Т. 2, № 2.
14. Кочеровский Е. В., Лухцер Г. М. Диагностика состояния режущего инструмента по силовым характеристикам процесса резания: Обзор. М.: ВНИИТЭМР, 1988. Вып. 7. 40 с.
15. Wei L. Research on Tool Wear Monitoring and Turning Simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. N 576 (1). P. 122—129.
16. Zhang Y., Zhu K., Duan X., Li S. Tool wear estimation and life prognostics in milling: Model extension and generalization // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. N 155. P. 107617.
17. Ong P., Lee W. K., Lau R. J. H. Tool condition monitoring in CNC end milling using wavelet neural network based on machine vision // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. N 104(1). P. 1369—1379.
18. Reiser W. Laser system for non-contact tool setting and breakage detection // WIT Trans. on Engineering Sciences. 1970. Vol. 16.
19. Толубаев И. Н., Антипин А. П., Евстигнеев А. Д. Разработка управляющей программы изготовления направляющей в Siemens Sinumerik 840DSL // Вузовская наука в современных условиях. 2020. С. 78—80.
20. <https://www.blum-novotest.com/en/products/measuring-components/lasercontrol/micro-compact-nt.html>, 03.05.2022.
21. Júnior R. C. E., Pereira R. B. D., Lauro C. H., Brandão L. C. Research on the wear mechanisms during the high-speed tapping in 316L stainless steel // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. N 112(1). P. 419—436.
22. Fromentin G., Poulachon G. Geometrical analysis of thread milling—part 1: Evaluation of tool angles // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. N 49(1—4). P. 73—80.
23. <https://www.iscar.ru/eCatalog/item.aspx?cat=3346000&fnum=4063&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>, 19.08.2022.
24. Зайцева А. Д., Ерохина Е. В. Системы мониторинга станков с числовым программным управлением как источник повышения эффективности производства // Научные исследования XXI века. 2019. № 2. С. 49—55.

#### *Сведения об авторах*

- Татьяна Владимировна Басова** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: tvbasova@itmo.ru
- Юрий Сергеевич Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: ysandreev@itmo.ru
- Мария Владимировна Басова** — аспирант; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия; E-mail: basova\_mv@voenmeh.ru

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

## REFERENCES

1. Popov M.U., Alekseenko D.A., Evtukhov S.N. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2012, no. 33, pp. 154–156. (in Russ.)
2. Araujo A.C., Silveira J.L., & Kapoor S. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, pp. 82–88.
3. Junior M.V., Baptista E.A., Araki L., Smith S., & Schmitz T. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 164–172.
4. Araujo A.C., Fromentin G., & Poulachon G. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 67, pp. 28–34.
5. Benardos P.G., & Vosniakos G.C. *Predicting Surface Roughness in Machining: a Review. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, no. 8(43), pp. 833–844.
6. Fedorov V.A., Melnikov D.A., Sukhareva A.A. *Scientific almanac*, 2017, no. 2–3, pp. 140–145. (in Russ.)
7. Ovsyannikov V.E., Suvorov A.I. *Bulletin of Kurgan State University*, 2013, no. 2(29). (in Russ.)
8. Rao K.V., Murthy B.S.N., & Rao N.M. *Measurement*, 2013, no. 10(46), pp. 4075–4084.
9. Richter A. *Breaking the beam. Cutting Tool Engineering*, 2010, no. 4(62), pp. 43–47.
10. Timofeev D.Yu., Khalimonenko A.D., Nacharova M.A. *Preliminary local thermal impact as a surface quality assurance factor. Materials Science Forum*, 2021, Vol. 1031 MSF, pp. 125–131, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.125.
11. Khalimonenko A.D., Timofeev D.Y., Golikov T.S. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 4(1399), pp. 044082, DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044082.
12. Grigoriev S.N., Sinonalikov V.A., Gurin V.D. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya (Hardening Technologies and Coatings) 2007*, no. 7, pp. 45–51. (in Russ.)
13. Maksimov Y.V., Porkhunov S.G., Kuzminskiy D.L. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2012, no. 2(2), pp. 98–104. (in Russ.)
14. Kocherovsky E.V., Likhtser G.M. *Diagnostika sostoyaniya rezhushchego instrumenta po silovym kharakteristikam protsessa rezaniya (Diagnostics of the State of the Cutting Tool by the Power Characteristics of the Cutting Process)*, Moscow, 1988, no. 7, pp. 40. (in Russ.)
15. Wei L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 1(576), pp. 122–129.
16. Zhang Y., Zhu K., Duan X., & Li S. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 155, p. 107617.
17. Ong P., Lee W.K., & Lau R.J.H. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 1(104), pp. 1369–1379.
18. Reiser W. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 1970, vol. 16.
19. Tolubaev I.N., Antipin A.P., Evstigneev A.D. *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh (University Science in Modern Conditions)*, 2020, pp. 78–80. (in Russ.)
20. <https://www.blum-novotest.com/en/products/measuring-components/lasercontrol/micro-compact-nt.html>.
21. Júnior R.C.E., Pereira R.B.D., Lauro C.H., & Brandão L.C. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, no. 1(112), pp. 419–436.
22. Fromentin G., & Poulachon G. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, no. 1–4(49), pp. 73–80.
23. <https://www.iscar.ru/eCatalog/item.aspx?cat=3346000&fnum=4063&mapp=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>.
24. Zaitseva A.D., Erokhina E.V. *Scientific Research of the 21st Century*, 2019, no. 2, pp. 49–55. (in Russ.)

## Data on authors

- Tatiana V. Basova** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: tvbasova@itmo.ru
- Yuriy S. Andreev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ysandreev@itmo.ru
- Maria V. Basova** — Post-Graduate Student; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Small-Gun, Artillery and Rocket Weapons; E-mail: basova\_mv@voenmeh.ru

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.