

УДК 67.02:658.512:006.015.7:62-192
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

С. П. Ермаков*, К. П. Помпеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* *ermak1999@live.ru*

Аннотация. Предложены методика оценки надежного обеспечения заданной точности действующими технологическими процессами и сформированный на ее основе алгоритм точностной оценки технологических процессов. Апробация на заводских технологических процессах подтвердила адекватность предлагаемой методики и работоспособность созданного алгоритма, а также позволила выявить недостатки и ошибки, допущенные технологом, в частности, при разработке технологии изготовления призматической детали, для устранения которых были даны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: методика, алгоритм, надежность технологического процесса, размерные цепи, деталь

Ссылка для цитирования: Ермаков С. П., Помпеев К. П. Методика исследования возможности автоматического обеспечения точности технологических процессов изготовления деталей // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 2. С. 176–183. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.

METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF AUTOMATICALLY ENSURING THE ACCURACY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PARTS MANUFACTURING

S. P. Ermakov*, K. P. Pompeev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

* *ermak1999@live.ru*

Abstract. A method for assessing the reliable provision of a given accuracy by current technological processes and an algorithm formed on its basis for evaluating the accuracy assessment for the technological processes are proposed. Testing on factory technological processes confirmed the adequacy of the proposed methodology and the operability of the created algorithm, and also made it possible to identify shortcomings and errors made by the technologist, in particular, during the development of manufacturing technology for prismatic parts, for which appropriate recommendations are formulated.

Keywords: methodology, algorithm, reliability of technological process, dimensional chains, part

For citation: Ermakov S. P., Pompeev K. P. Methodology for investigating the possibility of automatically ensuring the accuracy of technological processes of parts manufacturing. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 2. P. 176–183 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.

Введение. Надежное обеспечение требуемого качества изготавливаемых деталей при минимально возможной себестоимости является одной из важных задач разрабатываемых технологических процессов механической обработки. Результаты изготовления деталей напрямую влияют на качество и надежность конечного продукта, а также на его конкурентоспособность на рынке [1]. Одним из ключевых факторов, определяющих качество изготовленных деталей,

является соблюдение точности их параметров, зависящей от многих факторов, включая особенности материалов, инструментов, оборудования и самого производственного процесса [2].

Однако ошибки в технологическом процессе (ТП), даже при использовании высококачественных материалов и оборудования, могут привести к значительному снижению точностных параметров изготавливаемых деталей [3–13]. Поэтому необходимы постоянный мониторинг и управление технологическим процессом, чтобы снизить количество ошибок при разработке последнего и достичь требуемой точности параметров деталей, таких как линейные размеры, требования взаимного расположения (ТВР), а также обеспечить заданную шероховатость обработанных поверхностей. Для этого необходимо анализировать действующие техпроцессы, определять причины отклонений от требуемых параметров и разрабатывать мероприятия по устранению этих отклонений с обеспечением возможности автоматического получения заданной точности размеров и требований взаимного расположения (биений) поверхностей при изготовлении деталей.

Согласно [14], под надежностью ТП механической обработки заготовок понимается свойство обеспечивать заданные чертежом точность и качество деталей на разных этапах изготовления, при условии сохранения на этих этапах требуемых технических параметров в установленных пределах, с учетом обработки заготовок в определенной последовательности, на выбранном оборудовании, в требуемой технологической оснастке, необходимым инструментом, при заданных режимах обработки. При этом надежность ТП можно выразить показателем запаса точности ($\psi = IT_{Xi}/\omega_{Xi}$), характеризующим отношение допустимой величины изменения (IT_{Xi}) точностного параметра (X_i) к погрешности (ω_{Xi}), ожидаемой при реализации ТП. Иными словами, надежность ТП, согласно [2], можно связать с надежностью обеспечения требуемой точности обработки заготовок. При условии $1,0 < \psi \leq 1,2$ (а тем более — $\psi > 1,2$) надежность ТП по обеспечению точности будет гарантирована. Чем этот показатель больше, тем выше ожидаемая надежность ТП (она будет зависеть только от настройки оборудования и технологической оснастки и их технического состояния при реализации ТП в производственных условиях).

Оценить ожидаемую погрешность точностных параметров ω_{Xi} можно с использованием размерно-точностного анализа ТП, при котором расчет технологических размеров и их допусков осуществляется методом максимума-минимума при обеспечении точности методом полной взаимозаменяемости [2, 14]. Метод обеспечения точностной надежности ТП позволяет полностью исключить появление брака изготавливаемых деталей по вине технолога и создает условия для того, чтобы можно было вести обработку заготовок в автоматическом режиме, без предварительной выверки.

В связи с этим разработана методика и на ее основе — алгоритм оценки надежности внедряемых в производство ТП по параметрам точности (точностной надежности ТП), для которых необходимо строить соответствующие размерные схемы. Апробация на ряде заводских ТП подтвердила адекватность предлагаемой методики и работоспособность алгоритма, а также позволила выявить ошибки проектирования, например, допущенные технологом при разработке технологии изготовления призматической детали, для устранения которых были даны соответствующие рекомендации. Пока проведение размерно-точностного анализа ТП сдерживается отсутствием модуля САД-системы автоматизированного построения размерных схем для его использования в САПР ТП, несмотря на то что соответствующие расчеты автоматизированы.

Методика оценки обеспечения заданной точности действующими ТП. Для эффективного исследования заводских технологических процессов, особенно при изготовлении деталей на станках с ЧПУ [15], необходимо придерживаться некой последовательности действий [14, 16–19]. Сперва следует определить, является изучаемая деталь призматической или телом вращения. Это определяет вариативность предлагаемой методики.

Для призматической детали процедура исследования заводского ТП изготовления будет следующей.

1. Построить линейные размерные схемы по исследуемому ТП как минимум в трех проекциях [14, 20].

2. Выявить в этих схемах размерные цепи, замыкающими звеньями которых будут являться конструкторские размеры и припуски на обработку, а также несоосности отверстий, если это необходимо [14].

3. Проанализировать количество соответствующих технологических размеров в выявленных размерных цепях. Для цепей, в которых замыкающим звеном является конструкторский размер, должно быть не более трех составляющих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является припуск (или несоосность), должно быть не более четырех составляющих технологических размеров [14].

4. При нарушении этих условий или возможности уменьшения числа составляющих технологических размеров — изменить их структуру или, при необходимости, структуру ТП. Составить новые схемы и повторить п. 2 и 3.

5. Провести расчет линейных технологических размеров по схемам до и после их корректировки [14].

6. Проанализировать „жесткость“ допусков составляющих технологических размеров.

Если объект исследования представляет собой тело вращения, то этапы методики точностной оценки ТП его изготовления будут следующими.

1. Построить линейную размерную схему по исследуемому ТП в одной или двух проекциях [14, 20].

2. Выявить в схемах размерные цепи, замыкающими звеньями которых будут конструкторские размеры и припуски на обработку, а также несоосности отверстий, если это необходимо [14].

3. Проанализировать число технологических размеров в размерных цепях. Для цепей, в которых замыкающим звеном является конструкторский размер, должно быть не более трех составляющих технологических размеров. Для цепей, в которых замыкающим звеном является припуск (или несоосность), должно быть не более четырех составляющих технологических размеров [14].

4. При нарушении этих условий или возможности уменьшения числа составляющих технологических размеров — изменить их структуру или структуру ТП. Составить новые схемы и повторить п. 2 и 3.

5. Рассчитать линейные технологические размеры по схемам до и после их корректировки [14].

6. Проанализировать „жесткость“ допусков составляющих технологических размеров.

7. Построить схему биений по исследуемому ТП [14, 17].

8. Составить уравнения для расчета биений поверхностей, возникающих в ходе ТП [14, 17, 20].

9. Провести расчет биений и проверку возможности обеспечения требований взаимного расположения поверхностей, заданных в чертеже [14, 20].

10. На основе полученных данных проанализировать рациональность закрепления заготовки или назначения переходов.

Общий алгоритм точностной оценки действующих ТП представлен на рис. 1.

Первая ветка описывает точностную оценку ТП изготовления деталей типа тел вращения (выход из логического блока по ответу „да“). Алгоритм предусматривает сначала выполнение подпроцесса анализа исследуемого ТП по параметрам точности линейных размеров. При этом необходимо построить линейную размерную схему [14, 20], выявить размерные цепи [14], замыкающими звеньями которых будут конструкторские размеры и припуски на обработку, а также несоосности отверстий, проанализировать количество составляющих технологических размеров размерных цепей, проанализировать точность этих технологических размеров и определить возможность обеспечения заданных допусков конструкторских размеров на основе технологических размеров [14], указанных в операционных эскизах исследуемого ТП.

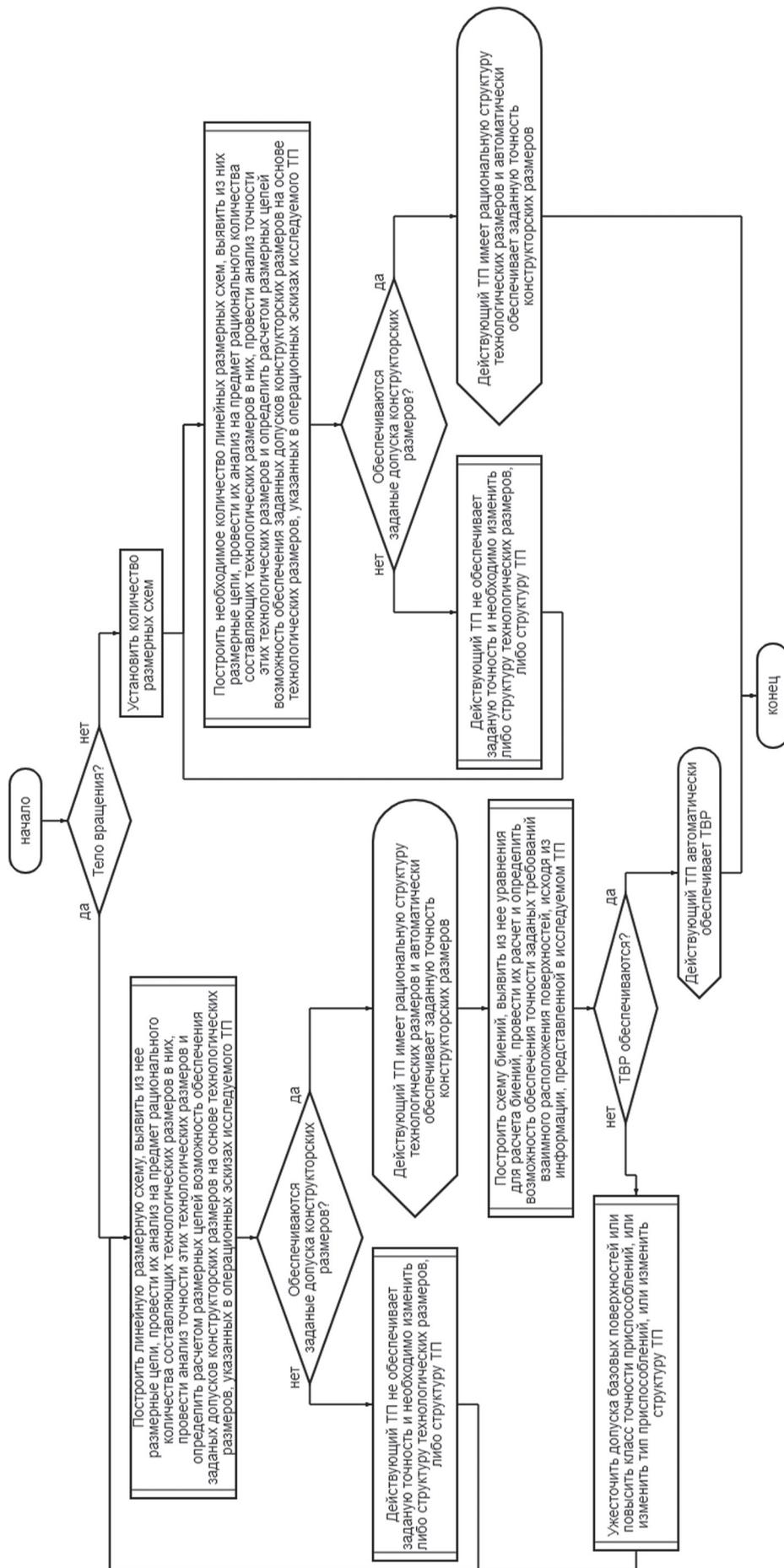


Рис. 1

Если действующий ТП не обеспечивает точность конструкторских размеров, то делается вывод о невозможности автоматического обеспечения заданных допусков конструкторских размеров и констатируется необходимость внесения изменений либо в структуру технологических размеров, либо в структуру самого ТП, проводимых в соответствующем блоке подпроцесса, выполняемого в первой ветке общего алгоритма.

Иначе — следует блок с сообщением о рациональной структуре технологических размеров ТП и его способности автоматически обеспечить требуемую точность конструкторских размеров.

Далее идет блок подпроцесса, связанного с выполнением следующих действий: построить схему биений; выявить уравнения для расчета биений; провести их расчет и определить возможность обеспечения точного взаимного расположения поверхностей согласно информации, представленной в ТП.

Если ТВР не обеспечиваются по действующему ТП, следует блок подпроцесса, в котором предлагается ужесточить допуски базовых поверхностей либо повысить класс точности используемых приспособлений для закрепления заготовки, либо изменить их тип, либо изменить структуру самого ТП.

Если ТВР обеспечиваются, то по алгоритму осуществляется переход к блоку с сообщением о том, что действующий ТП обеспечивает точность заданных ТВР в автоматическом режиме.

После прохождения всей первой ветки алгоритм завершает работу.

Вторая ветка алгоритма относится к точностной оценке ТП изготовления призматических деталей (выход из логического блока по ответу „нет“). В этом случае выполняется переход к блоку с определением числа необходимых размерных схем. Для призматических деталей таких схем должно быть как минимум три.

После этого алгоритмом предусмотрено выполнение подпроцесса анализа исследуемого ТП по параметрам точности линейных размеров. При этом следует построить необходимое количество линейных размерных схем, выявить размерные цепи, проанализировать количество составляющих технологических размеров в них, провести анализ точности этих технологических размеров и определить путем расчета размерных цепей возможность обеспечения заданных допусков конструкторских размеров на основе технологических размеров, указанных в операционных эскизах исследуемого ТП.

Если действующий ТП не обеспечивает точность конструкторских размеров, то фиксируется невозможность автоматического обеспечения заданных допусков конструкторских размеров и констатируется необходимость внесения изменений либо в структуру технологических размеров, либо в структуру самого ТП, проводимых в соответствующем блоке подпроцесса, выполняемого во второй ветке общего алгоритма.

Иначе — в сообщении фиксируется рациональная структура технологических размеров ТП и его способность обеспечить требуемую точность конструкторских размеров автоматически.

После этого алгоритм завершает работу.

Апробация методики и алгоритма на примере ТП изготовления призматической детали. В качестве объекта для апробации разработанной методики и построенного на ее базе алгоритма был выбран ТП изготовления детали „Фланец“, которую можно отнести к особо ответственным деталям призматического типа, входящим в сборку топливной системы двигателя „ВК-2500“. Данная деталь изготавливается из алюминиевого сплава АК4-1. Заготовку для изготавливаемой детали получают методом литья под давлением. Трехмерная модель детали представлена на рис. 2.

В ходе изучения технологии изготовления представленной детали были выявлены места обработки (внешний контур и выступающая поверхность) с периодически возникающим отклонением по параметрам точности. В начальный момент анализа причины возникновения брака не были установлены, что потребовало более подробного изучения технологии. По предварительной оценке, первопричиной появления брака может служить ошибка технолога при составлении ТП. Появление брака носит непостоянный характер, детали получают либо на грани допуска, либо с неисправимым браком.

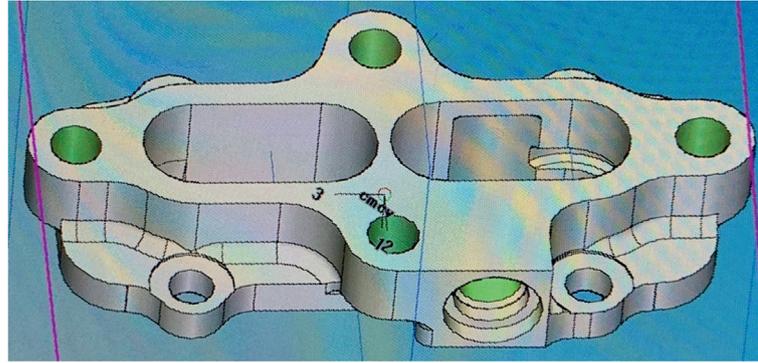


Рис. 2

При размерно-точностном анализе действующего ТП изготовления детали „Фланец“ был использован разработанный алгоритм. В соответствии с ним и с учетом технологических размеров, указанных в операционных эскизах, было построено пять схем линейных размеров. На основе этих схем были выявлены технологические размерные цепи, замыкающими звеньями которых являются конструкторские размеры и припуски на обработку, а составляющими звеньями — технологические размеры.

При исследовании составленных размерных схем были выявлены ошибки в допусках размеров и нецелесообразные решения технолога по структуре технологических размеров.

Расчет размерных цепей был проведен с использованием программы в среде MS Excel. Программа расчета линейных размеров разработана на факультете систем управления и робототехники Университета ИТМО на основе общих положений, приведенных в методике, описанной в [14], а также справочной информации. Расчет линейных размеров в программе проводится на максимум-минимум по методу полной взаимозаменяемости [2, 14], который исключает появление брака.

Пример результатов программного расчета, выполненного при условии автоматического обеспечения заданной точности конструкторских размеров с использованием выверки заготовки на фрезерных операциях в автоматическом режиме при помощи специального щупа, представлен на рис. 3. В целом результаты показали, что в действующем ТП на некоторые технологические размеры не указаны или неправильно назначены допуски, которые потребовалось указать по качеству 12 (размер Т2, который при этом является третьим составляющим размером в цепи для К4) или ужесточить с качества 14–15 до 12–13 (размер Т4), а в некоторых случаях имела место нерациональная структура технологических размеров.

Величины конструкторских размеров, припусков и несоосностей				№ черт.: 7885.0471 № размерной схемы: 2 Наим. дет.: Фланец		Величины расчетных технологических размеров				ВО - верхнее отклонение, НО - нижнее отклонение	
№ п.п.	Обознач. и № замык. звена	Номинал	Информационное сообщение		Обознач. и № технол. р-ра	Номинал	Информационное сообщение		Напечатать сводный лист		
			+/-	Знач. ВО / Знач. НО			+/-	Знач. ВО / Знач. НО			
1	К 1 = 2		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К1 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 1 = 14		+ 0,1 - 0,1	Номинальное значение технологического размера Т1 и его отклонений рассчитаны и приняты			
2	К 2 = 5,5		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К2 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 2 = 0,5		+ 0,05 - 0,05	Номинальное значение технологического размера Т2 и его отклонений рассчитаны и приняты			
3	К 3 = 6,5		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К3 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 3 = 2		+ 0,1 - 0,1	Номинальное значение технологического размера Т3 и его отклонений рассчитаны и приняты			
4	К 4 = 6		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К4 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 4 = 7,5		+ 0,1 - 0,1	Номинальное значение технологического размера Т4 и его отклонений рассчитаны и приняты			
5	К 5 = 6,5		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К5 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 5 = 14		+ 0,1 - 0,1	Номинальное значение технологического размера Т5 и его отклонений рассчитаны и приняты			
6	К 6 = 9		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение размера К6 и его отклонения введены на соответствующей вкладке	Т 6 = 9		+ 0,25 - 0,25	Номинальное значение технологического размера Т6 и его отклонений рассчитаны и приняты			

Рис. 3

После изменения структуры технологических размеров и ужесточения их допусков, в соответствии с разработанным алгоритмом, на экран выводится сообщение: „Действующий ТП имеет рациональную структуру технологических размеров и автоматически обеспечивает

заданную точность конструкторских размеров⁶, что свидетельствует о правильности структуры как самого ТП, так и назначенных технологических размеров, а также их принятых допусков. Но результаты расчета только по одной схеме не гарантируют точности конструкторских размеров по всему ТП, и для полной оценки был проведен анализ оставшихся схем.

Таким образом, сделан вывод, что возможно появление брака из-за ошибок, допущенных технологом при составлении действующего ТП, в связи с чем требуется провести изменение структуры ТП с корректировкой базирования заготовки на фрезерных операциях. Новая структура ТП должна исключать настроечные базы, чтобы автоматически обеспечить точность конструкторских размеров и отказаться от использования измерительного щупа при определении нуля каждой обрабатываемой заготовки на операциях с ЧПУ.

Заключение. Результаты апробации подтверждают практическую значимость разработанной методики и сформированного на ее основе алгоритма оценки надежного обеспечения заданной точности действующими технологическими процессами. Данные методика и алгоритм позволят технологом, владеющим размерно-точностным анализом ТП, при необходимости скорректировать структуру технологических размеров и обосновать ужесточение точностных параметров изготавливаемых деталей, что, в свою очередь, повысит качество и надежность конечного продукта, а также увеличит конкурентоспособность предприятия на рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наумова А. Н.* Причины возникновения брака продукции на машиностроительном предприятии и пути его сокращения // Вектор экономики. 2020. Т. 12, № 1. С. 102.
2. *Маталин А. А.* Технология машиностроения. СПб: Лань, 2010. 512 с.
3. *Халимоненко А. Д., Вьюшин Р. В.* Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащенным сменными керамическими пластинами // Записки горного института. 2014. Т. 209. С. 99–103.
4. *Кранаренков Ю. Б., Атаманов С. А., Шаев Е. А.* Повышение точности и производительности многолезвовой токарной обработки // Станки и инструменты. 1974. № 8. С. 28–30.
5. *Шаш Н. Н., Касьянов А. В.* Управление качеством на предприятии (малый бизнес). М.: ГроссМедиа, 2014. С. 80–85.
6. *Timofeev D. Y., Kosheleva E. V.* Improving the quality of manufacturing parts from titanium alloys using the method of preliminary local plastic deformation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87, is. 8. P. 082048.
7. *Maksarov V., Khalimonenko A.* Forecasting performance of ceramic cutting tool // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. P. 86–90.
8. *Kudryashov E. A., Smirnov I. M., Stepanov Y. S., Khizhnyak N. A.* Improving Cutter Performance in Turning Complex Profiles // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, is. 12. P. 1003–1008.
9. *Астахов С. А.* Деформации обрабатываемой полой цилиндрической заготовки // Изв. ТулГУ. Серия „Технические науки“. 2011. Вып. 4. С. 307–315.
10. *Mavliutov A. R., Zlotnikov E. G.* Optimization of cutting parameters for machining time in turning process // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327, N 4. P. 042069.
11. *Yang Y.* Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism // CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences. 2018. Vol. 116, is. 3. P. 365–389.
12. *Yuan M., Wang M.* A feature selection method based on an improved fruit fly optimization algorithm in the process of numerical control milling // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10, is. 5. DOI:10.1177/1687814018778227
13. *Астахов С. А., Сидоркин А. В., Маликов А. А.* Экспериментальное определение жесткости технологической системы и ее влияние на точность обработки // Изв. ТулГУ. Сер. „Технические науки“. 2011. Вып. 4. С. 302–306.
14. *Валетов В. А., Помпеев К. П.* Технология приборостроения. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 234 с.
15. *Балла О. М.* Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. СПб: Лань, 2015. 364 с.
16. *Клевцов В. А., Помпеев К. П.* Автоматизация процесса проектирования технологий на основе структурного синтеза размерных связей // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 37–40.
17. *Помпеев К. П.* Особенности размерно-точностного анализа технологий изготовления валов в центрах // Современное машиностроение. Наука и образование: мат. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 1049–1058.

18. *Белаиов В. А., Белаиов А. В., Белаиов М. В.* Размерный анализ технологий в редакторе технологических процессов: Методическое пособие. Пенза: Пензенский гос. университет, 2008. 49 с.
19. *Shao X. Y., Lin K., Gao L., Qiu H. B.* Research on Tolerance Analysis System Based on 3D Collaborative Design Platform // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 44–46. P. 253–260. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.44-46.253.
20. *Борботько В. А., Помпеев К. П., Плешков А. А.* Интерактивный синтез технологических размерных схем // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. С. 1049–1058.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Сергей Павлович Ермаков** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: ermak1999@live.ru
- Кирилл Павлович Помпеев** — канд. техн. наук, ординарный доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, Международный научный центр „Нелинейные и адаптивные системы управления“; доцент; E-mail: kir-pom@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.24; одобрена после рецензирования 25.11.24; принята к публикации 25.12.24.

REFERENCES

1. Naumova A.N. *Vektor Ekonomiki*, 2020, no. 1(12), pp. 102. (in Russ.)
2. Matalin A.A. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* (Mechanical Engineering Technology), St. Petersburg, 2010, 512 p. (in Russ.)
3. Khalimonenko A.D., Vyushin R.V. *Notes of the Mining Institute*, 2014, vol. 209, pp. 99–103. (in Russ.)
4. Kranarenkov Yu.B., Atamanov S.A., Shaev E.A. *Machine tools and instruments*, 1974, no. 8, pp. 28–30. (in Russ.)
5. Shash N.N., Kasyanov A.V. *Upravleniye kachestvom na predpriyatii* (malyy biznes) (Quality Management at the Enterprise (Small Business)), Moscow, 2014, pp. 80–85.
6. Timofeev D.Y., Kosheleva E.V. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, no. 8(87), pp. 082048.
7. Maksarov V., Khalimonenko A. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 86–90.
8. Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Stepanov Y.S., Khizhnyak N.A. *Russian Engineering Research*, 2018, no. 12(38), pp. 1003–1008.
9. Astakhov S.A. *Bulletin of Tula State University, Series “Technical Sciences”*, 2011, no. 4, pp. 307–315. (in Russ.)
10. Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 4(327), pp. 042069.
11. Yang Y. *CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2018, no. 3(116), pp. 365–389.
12. Yuan M., Wang M. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 5(10), DOI:10.1177/1687814018778227.
13. Astakhov S.A., Sidorkin A.V., Malikov A.A. *News of Tula State University, Series “Technical Sciences”*, 2011, no. 4, pp. 302–306. (in Russ.)
14. Valetov V.A., Pompeev K.P. *Tekhnologiya priborostroyeniya* (Instrument-Making Technology), St. Petersburg, 2013, 234 p. (in Russ.)
15. Balla O.M. *Obrabotka detaley na stankakh s CHPU. Oborudovaniye. Osnastka. Tekhnologiya* (Processing of Parts on CNC Machines. Equipment. Tooling. Technology), St. Petersburg, 2015, 364 p. (in Russ.)
16. Klevtsov V.A., Pompeev K.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8(57), pp. 37–40. (in Russ.)
17. Pompeev K.P. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern mechanical engineering. Science and education), Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2014, pp. 1049–1058. (in Russ.)
18. Belashov V.A., Belashov A.V., Belashov M.V. *Razmernyy analiz tekhnologiy v redaktore tekhnologicheskikh protsessov* (Dimensional Analysis of Technologies in the Editor of Technological Processes), Penza, 2008, 49 p. (in Russ.)
19. Shao X.Y., Lin K., Gao L., Qiu H.B. *Advanced Materials Research*, 2008, vol. 44–46, pp. 253–260.
20. Borbotko V.A., Pompeev K.P., Pleshkov A.A. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Mechanical Engineering. Science and Education), Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2020, pp. 1049–1058. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Sergey P. Ermakov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Experimental Production of ITMO, Engineer; E-mail: ermak1999@live.ru
- Kirill P. Pompeev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Scientific Center of Nonlinear and Adaptive Control Systems; E-mail: kir-pom@mail.ru

Received 29.05.24; approved after reviewing 25.11.24; accepted for publication 25.12.24.