



Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем

С. Ю. Калякулин^{1*}, В. В. Кузьмин², Э. В. Митин¹,

С. П. Сульдин¹, Т. Б. Тюрбеева²

¹ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

(г. Москва, Россия)

*rim-tm@mail.ru

Введение. Целью статьи является разработка математической модели детали на основе параметрической модели графических систем.

Материалы и методы. Проведенный авторами обзор состояния данного вопроса показал возможность управления геометрической формой детали через переменные параметризованного чертежа. На основании этого выдвинуто предложение использовать конструкторскую параметризацию в расчетах параметров технологических процессов в системах автоматизированного проектирования.

Результаты исследования. В данной статье установлены связи между конструкторскими параметрами чертежа детали и табличными значениями переменных. Выявленные связи между параметрами на чертеже и переменными в таблице позволяют при модификации геометрической формы детали осуществлять изменения значений в таблице переменных, т. е. происходит управление чертежом через таблицу. Ввиду этого предлагается использовать данную систему работы с параметрическим чертежом в системе автоматизированного проектирования для расчета параметров технологических процессов.

Обсуждение и заключение. Задачи, решаемые в данной статье, позволяют сделать шаг в повышении уровня автоматизации расчета параметров в системах автоматизированного проектирования. Реализация разработанной методики построения математических моделей деталей на основе графических систем позволит повысить общий уровень автоматизации разработки геометрических чертежей деталей, а при внедрении данной методики в системы автоматизированного проектирования технологических процессов даст возможность автоматизировать расчеты параметров (режимы резания, нормы времени, технологические размеры на переходах и т. д.).

Ключевые слова: технологический процесс, математическая модель, параметризация, САПР 3D, конструкторский параметр, геометрический чертеж

Для цитирования: Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем / С. Ю. Калякулин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 67–76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>



Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models

S. Yu. Kalyakulin^{1*}, V. V. Kuzmin², E. V. Mitin¹,
S. P. Suldin¹, T. B. Tyurbееva²

¹ National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

² Moscow State University of Technology "STANKIN"
(Moscow, Russia)

*rim-tm@mail.ru

Introduction. The aim of the work is to develop a mathematical model of a part based on a parametric model of graphic systems.

Material and Methods. The review of the status of the question of developing a mathematical model of a part based on graphic systems showed the possibility of controlling the geometric shape of a part through the variables of a parameterized drawing. A proposal was made to use design parameterization in the calculation of the parameters of technological processes in computer-aided design systems.

Results. The article establishes links between the design parameters of the part drawing and tabular values of the variables. The revealed relationships between the parameters in the drawing and the variables in the table make it possible to change the geometric shape of the part by changing the values in the variable table, i.e. the drawing is managed through the table. It is proposed to use this system of work with the parametric drawing in computer-aided design systems for calculating the parameters of technological processes.

Discussion and Conclusion. The tasks solved in this article allow making a step in increasing the level of automation of parameter calculations in computer-aided design systems. The implementation of the developed methodology for constructing mathematical models of parts based on graphic systems will increase the overall level of automation of developing geometric drawings of parts. The implementation of this technique in computer-aided design systems allows automating the calculation of parameters (cutting modes, time norms, technological dimensions on transitions, etc.).

Keywords: technological process, mathematical model, parameterization, CAD, design parameter, geometric drawing

For citation: Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbееva T.B. Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technology and Systems. 2019; 29(1):67-76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>

Введение

Суть конструкторско-технологической параметризации заключается в том, что в пределах заданной структуры технологических процессов [1] при изменении конструкторских параметров на чертеже детали автоматически меняются технологические параметры, отображаемые в картах технологической документации.

В системе T-Flex CAD переменные задаются следующими способами: 1) с помощью редактора переменных; 2) при задании и редактировании параметров линий построения, а также дру-

гих элементов чертежа или 3D-модели; 3) в текстовом редакторе (позволяет работать с внешними файлами формата «.tft», «.rtf», «.txt»); 4) при задании текстовых строк в параметрах некоторых элементов; 5) при задании значений практически всех вещественных параметров элементов.

Чтобы система могла в любой момент вычислять значение переменной, для каждой переменной можно задать выражение. Выражения в T-Flex CAD содержат операнды (константы, переменные) и операции (набор действий над этими операндами). При работе

с переменными можно использовать следующие типы функций: 1) стандартные математические функции; 2) переменные и тексты; 3) переменные и текстовые строки; 4) переменные и уровни видимости (переменные и приоритеты); 5) переменные и базы данных (возможна работа как с внутренними, так и с внешними базами данных в формате dBASE); 6) работа со сборочными документами.

Основным способом связи T-FLEX CAD с какими-либо внешними процедурами (особенно программами проектирования или расчетов) является передача значений параметров, причем можно не только передавать данные, но и принимать их. Реализуется это с помощью файла параметров, который представляет собой обычный ASCII-файл (формат «.par»).

Технологическая параметризация является логическим развитием конструкторской параметризации, которая успешно реализована в системе T-FLEX CAD и позволяет в рамках одной геометрической модели детали или сборочной единицы охватить большой класс однотипных объектов. Соотношения между геометрическими параметрами объектов изготовления, свойствами материала, характеристиками производственной системы позволяют более естественно описывать типовые представители и комплексные детали, которые широко используются в практике технологического проектирования.

Обзор литературы

Процесс параметрического моделирования (параметризация) – модели-

рование с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перестроить (с помощью изменения геометрических отношений или параметров) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок.

Проектирование деталей в параметрическом режиме значительно отличается от простого двухмерного черчения или трехмерного моделирования. Конструктор в режиме параметрического проектирования создает математическую модель объектов с заданными параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали и взаимного расположения деталей в сборке.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке математических моделей. В. В. Болкунов и соавторы¹ пишут о построении математических моделей структуры технологических операций механической обработки деталей машин и технологическом процессе. В работе А. С. Сергеева² приведены математические зависимости по расчету параметров шероховатости при обработке сталей на металлорежущем оборудовании. Математическая модель оптимизации ТП восстановления изношенных деталей представлена в статье А. М. Третьякова и соавторов [2]. Еще одна математическая модель, посвященная оптимизации размерно-точностных параметров деталей, описана в работе М. А. Болотова и соавторов³. Н. И. Пасько [3] представил математическую модель

¹ Болкунов В. В., Мирошкин А. Г., Злобина И. В. Построение математической модели структуры технологической операции механической обработки деталей машин // Современные тенденции развития науки и производства : сб. мат-лов Междунар. науч.-практ. конф. : в 4 т. Т. 3. Кемерово : ЗапСибНЦ, 2014. С. 94–96. URL: <https://docplayer.ru/55090787-23-24-oktyabrya-g-tom-3.html>

² Сергеев А. С. Разработка математических моделей расчета параметров шероховатости при обработке деталей на токарных и фрезерных станках с ЧПУ // Поколение будущего: взгляд молодых ученых : сб. мат-лов Междунар. молодежной науч. конф. Курск : А. А. Горохов, 2012. С. 160–163.

³ Болотов М. А., Печенин В. А., Рузанов Н. В. Математическая модель оптимизации размерно-точностных параметров деталей газотурбинных двигателей // Высокие технологии в современной науке и технике : сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов ; под ред. А. Н. Яковлева. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 298–299. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/45413/1/conference_tpu-2017-C17_p298-299.pdf

процесса измерения размера детали при механической обработке. Построение математических моделей имеет большое значение при решении задач автоматизации сборочного процесса [4] и распределения деталей по технологическим группам [5].

Д. Е. Максимовский [6; 7] рассматривает вопросы разработки математических моделей структуры ТП, от которых напрямую зависит расчет параметров.

Разработка математических моделей с последующей передачей ее параметров в САПР ТП является частью технологической подготовки производства (ТПП), большое внимание которой уделяется в европейских странах.

В работе немецких ученых [8] рассматривается вопрос сокращения используемых в процессе производства энергии и материалов, что является существенным фактором, влияющим на структуру общих затрат компании. Авторами разработан алгоритм планирования, который представляет собой материально-ориентированное расширение этапа выбора производственного материала. На основе предложенного алгоритма происходит оценка затрачиваемой энергии, которая вызвана дополнительным снятием стружки с материала. Данные экономической эффективности обработки определенной детали включаются в план производственного процесса САПР ТП.

В работах польских ученых [9; 10] предлагается повысить уровень автоматизации ТПП за счет использования нового стандарта формата файлов STEP-NC, созданного для работы с системами числового программного управления (ЧПУ). Формат содержит модели данных для токарной и фрезерной обработки, а также представление о геометрии обрабатываемых поверхностей. Предлагается использовать модели данных STEP-NC для системы САПР ТП при разработке структуры ТП.

С. Г. Митин и П. Ю. Бочкарев [11] предлагают подход к созданию комплексной системы ТПП на основе полностью автоматизированной процедуры проектирования процесса планирования механической обработки. Авторами представлены следующие модели автоматизации: разработки маршрута обработки детали, формирования возможных групповых методов обработки, выбора оборудования, формирования структуры операции, выбора инструмента.

Материалы и методы

В данной статье предложен метод построения геометрического чертежа детали на основе конструкторской параметризации с последующим построением таблицы переменных и интеграции ее в САПР ТП. Результаты разработанного метода можно использовать при расчете параметров ТП в автоматизированном режиме в САПР ТП.

В основе полученных научных результатов лежат фундаментальные положения расчета параметров ТП, технологии машиностроения, теории графов, теории моделей, методологии проектирования технологических процессов механической обработки.

Результаты исследования

Под параметризацией системы понимается процесс изменения «выходных» параметров при изменении «входных» в автоматическом режиме с помощью множества переменных и связей между ними.

Конструкторские и технологические переменные широко используются в системе технологического проектирования (СИТЕП), разработанной в МГТУ «СТАНКИН», в рамках технологической параметризации, которая является важной составляющей системы PDM (Product Data Management) CALS-технологий. Основная суть конструкторско-технологической параметризации заключается в том, что в пределах заданной структуры ТП при изменении

конструкторских параметров на чертеже детали автоматически изменяются технологические параметры, отображаемые в картах технологической документации.

Технологическая параметризация является логичным развитием конструкторской параметризации, которая успешно реализована в системе T-FLEX CAD и позволяет в рамках одной геометрической модели детали или сборочной единицы охватить большой класс однотипных объектов. Соотношения между геометрическими параметрами объектов изготовления, свойствами материала, характеристиками производственной системы позволяют более естественно описывать типовые представители и комплексные детали, которые широко используются в практике технологического проектирования.

Конструкторская параметризация – изменение чертежа детали y в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $y = f(x)$.

Технологическая параметризация – изменение технологических параметров y в автоматическом режиме при изменении параметров конструкции x с использованием функциональной связи $y = f(x)$.

Конструкторская параметризация заключается в разработке геометрического чертежа детали в режиме, при котором изменение параметров чертежа приводит к автоматическому перестраиванию детали. Конструкторско-технологическая параметризация позволяет не только автоматически перестраивать геометрию детали, но и передавать информацию о ней в расчетный модуль конкретного параметра, информация из которого, в свою очередь, передается в комплект технологической документации. Расчетный модуль можно рассматривать как часть информационной модели применительно к рассматриваемому параметру ТП, оформленному

в виде программы. В этой программе выполнены этапы планирования и генерирования. Сама же информационная модель указывает, какие связи существуют между переменными и в каком виде они реализованы (математические выражения, таблицы, конкретные значения и т. д.).

Основное отличие автоматизированного расчета параметров ТП от ручных состоит в том, что в первом случае исходная информация об объекте изготовления (детали) представлена в виде векторных форматов графических систем 2D и 3D, а во втором случае – в виде традиционных чертежей. Исходная информация в первом случае содержит не все свойства поверхностей детали, необходимые для расчета параметров ТП, а форма ее представления неудобна для обработки.

Алгоритм расчет параметров ТП изготовления оригинальной детали включает следующие этапы:

- разработка ТП изготовления оригинальной детали на основе типового ТП изготовления комплексной детали;
- настройка конструкторских параметров параметризованного чертежа в T-FLEX CAD на параметры оригинальной детали;
- переключение окон в САПР ТП и формирование технологических карт, которые содержат параметры ТП, полученные в автоматическом режиме.

Математические модели деталей при расчете параметров ТП необходимы для выполнения конструкторско-технологической параметризации. Исходными элементами для моделей 2D-деталей являются чертежные примитивы, а для 3D-моделей – поверхности и одномерные многообразия в трехмерном пространстве.

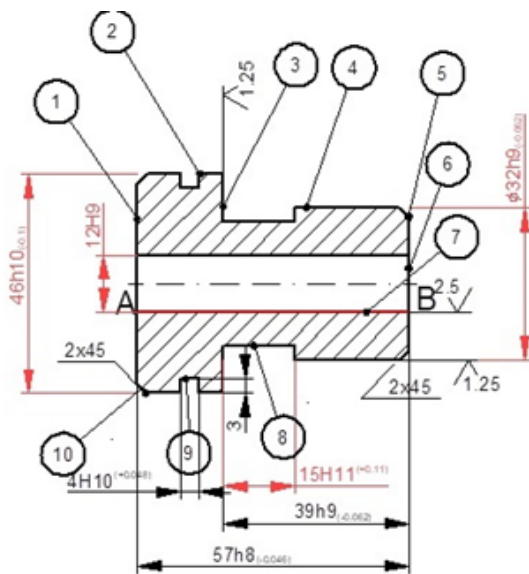
Математическая модель детали определяется как [12]:

$$M_{\text{дет}} = \langle M_{\text{дет}}, R_{\text{дет}}^{1,2} \rangle, \quad (2.7)$$

где $M_{\text{дет}}$ – исходные элементы модели детали (обрабатываемые поверхности);

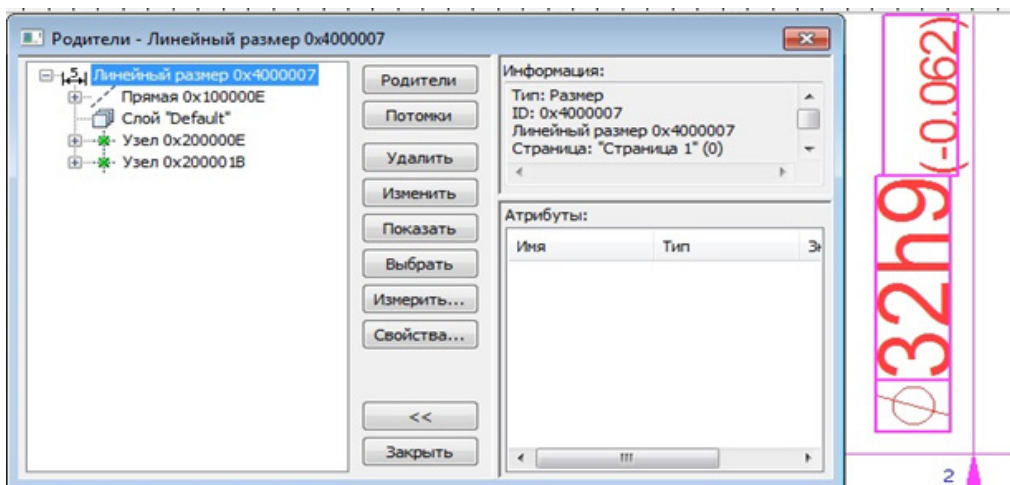
$R^{(1)}$ – унарные отношения свойств поверхностей, необходимые для расчета параметров ТП (тип линии, длина, толщина и т. д.); $R^{(2)}$ – бинарные отношения показателей точности относительного расположения поверхностей (допуск, шероховатость, параллельность, соосность и т. д.).

Отношениям $R^{(1)}$, $R^{(2)}$ на параметрическом чертеже детали (рис. 1) соответствуют ID-номера: например, $\text{Ø}32\text{h}9_{-0,062}$ соответствует номер $0\text{x}4000007$ (рис. 2). При помощи выражений данные ID-номера разбираются на составляющие (табл. 1): значение размера, допуск, верхнее и нижнее предельные отклонения.



Шифр 111 / Cipher 111
 Материал Ст45 / Material St45
 Заготовка-пруток $D = 50$ /
 Workpiece-bar $D = 50$
 Производство мелкосерийное /
 Small-scale production

Р и с. 1. Параметрический чертеж детали «Втулка»
 F i g. 1. The parametric drawing of the detail “Bushing”



Р и с. 2. Соответствие ID размеру детали $\text{Ø}32\text{h}9_{-0,062}$
 F i g. 2. Compliance with ID part size $\text{Ø}32\text{h}9_{-0,062}$

На примере параметризованной втулки видно, какие примитивы отвечают за те или иные поверхности, потому что на 2D-моделях поверхностей нет. Например, примитив 4 отвечает за наружную цилиндрическую поверхность диаметром 32, примитив 1 – за наружный торец диаметром 46, а примитив $A-B$ – за внутреннюю цилиндрическую поверхность диаметром $\varnothing 12$.

Все составляющее размера формируют таблицу переменных (рис. 2).

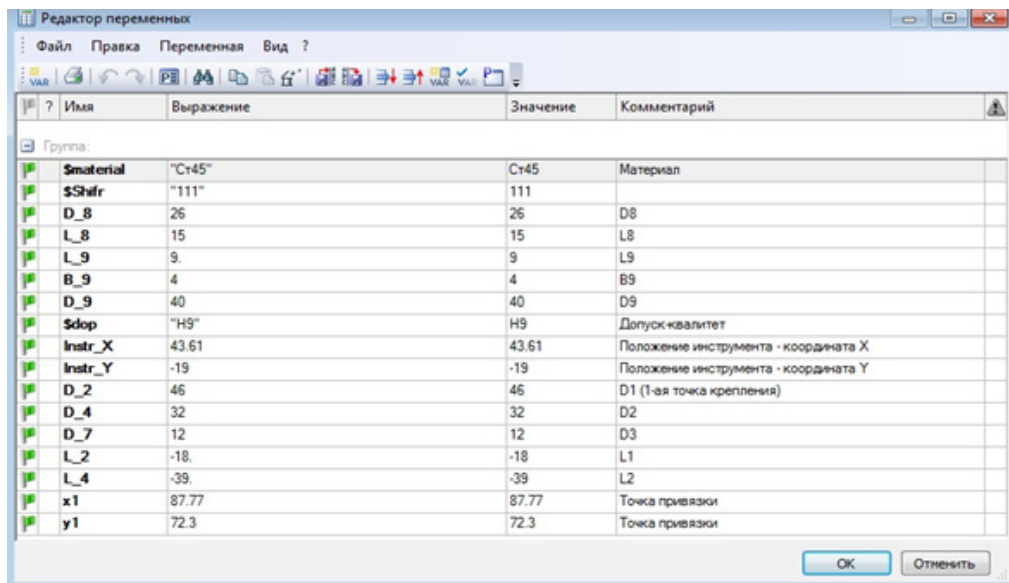
Таблица переменных отображается в редакторе переменных T-Flex CAD (рис. 3).

Так как геометрический чертеж разработан в параметрическом режиме, изменение его параметров приводит к автоматическому пересчету значений в таблице переменных.

Таблица
Table

Составляющие размера детали $\varnothing 32h9_{-0,062}$
Size-components $\varnothing 32h9_{-0,062}$

Значение / Value	Описание / Description	Выражение / Expression
32	Значение размера / Size value	get("0x4000007", "VALUE")
h9	Допуск / Tolerance	tget("0x4000007", "TOLERANCE")
0	Верхнее отклонение / Upper deviation	get("0x4000007", "UPPER_DEVIATION")
-0.062	Нижнее отклонение / Lower deviation	get("0x4000007", "LOWER_DEVIATION")



Имя	Выражение	Значение	Комментарий
Smaterial	"Ст45"	Ст45	Материал
\$Shfr	"111"	111	
D_8	26	26	D8
L_8	15	15	L8
L_9	9.	9	L9
B_9	4	4	B9
D_9	40	40	D9
Sdop	"H9"	H9	Допуск-кавалитет
Instr_X	43.61	43.61	Положение инструмента - координата X
Instr_Y	-19	-19	Положение инструмента - координата Y
D_2	46	46	D1 (1-ая точка крепления)
D_4	32	32	D2
D_7	12	12	D3
L_2	-18.	-18	L1
L_4	-39.	-39	L2
x1	87.77	87.77	Точка привязки
y1	72.3	72.3	Точка привязки

Р и с. 3. Таблица переменных параметризованного чертежа детали «Втулка»

F i g. 3. The table of variables for the parameterized drawing of the detail “Bushing”

Обсуждение и заключение

На основе предложенного метода конструкторской параметризации построена математическая модель детали «Втулка». Составлена таблица переменных, отражающая значения параметров геометрического чертежа детали, изменения которых приводят к перестроению

детали. Предлагается использование данного метода при расчетах параметров ТП в САПР ТП. Для этого необходимо разработать в САПР ТП окно, отображающее считанные переменные табличных значений. Внедрение данной методики позволит в автоматизированном режиме рассчитывать любые параметры ТП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза / С. Ю. Калякулин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 1. С. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>
2. **Третьяков А. М., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н.** Математическая модель оптимизации выбора технологического процесса восстановления изношенных деталей // Строительные и дорожные машины. 2002. № 11. С. 31–34.
3. **Пасько Н. И., Картацев И. С.** Математическая модель процесса изменения размера деталей при токарной обработке партии деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 4. С. 206–210. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2013_04&year=2013
4. **Кузнецова С. В., Симаков А. Л.** Математическая модель процесса адаптации положения детали при автоматизированной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5 (142). С. 15–20. URL: http://www.mashin.ru/files/2012/sb5_12.pdf
5. Математическая модель управления распределением деталей по технологическим группам / Е. Н. Сосенушкин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. № 3. С. 47–53. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2009_03&year=2009
6. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590>
7. **Maksimovskii D. E.** Automation of process design by design-technological parameterization // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, no. 9. P. 870–872. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>
8. **Goldhahn L., Eckardt R.** Sustainable process planning of manufacturing variants for high-precision parts // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. P. 344–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.127>
9. **Duda J., Poboziak J.** The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 501–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.143>
10. **Poboziak J., Sobieski S.** Extension of STEP-NC data structure to represent manufacturing process structure in CAPP system // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 1692–1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.294>
11. **Mitin S., Bochkarev P.** Mathematical modelling in the computer-aided process planning // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. Article ID 012077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012077>
12. **Kalyakulin S. Yu.** Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, no. 11. P. 713–715.

Поступила 02.04.2018; принята к публикации 20.09.2018; опубликована онлайн 29.03.2019

Об авторах:

Калякулин Сергей Юрьевич, доцент, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: O-6519-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Кузьмин Владимир Владимирович, профессор, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), доктор технических наук, ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Митин Эдуард Валерьевич, доцент, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, gimnauka@ Rambler.ru

Сулдин Сергей Петрович, заведующий, кафедра технологии машиностроения, Рузаевский институт машиностроения, ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: V-5381-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, gimstanok@mail.ru

Тюрбеева Татьяна Борисовна, доцент, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» (127994, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 1), кандидат технических наук, ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4071-7490>, turbееv@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Ю. Калякулин – разработка параметрической модели детали; В. В. Кузьмин – научное руководство, постановка задачи исследования; Э. В. Митин – анализ литературных данных; С. П. Сулдин – разработка таблицы переменных; Т. Б. Тюрбеева – написание текста статьи, верстка и редактирование, обзор зарубежной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., Suldin S.P., Tyurbееva T.B. Designing the structure of technological processes based on synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(1):77-84. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084> (In Russ.)
2. Tretyakov A.M., Kravchenko I.N., Erofeev M.N. Mathematical model of optimization of a choice of technological process of restoration of the worn out details. *Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny* = Building and Road Cars. 2002; 11:31-34. (In Russ.)
3. Pasko N.I., Kartavtsev I.S. A parts dimension variation process model for batch turning. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2013; 4:206-210. Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2013_04&year=2013 (In Russ.)
4. Kyznecova S.V., Simakov A.L. The mathematical model of the process of adaptation of the detail's position at the automated assembly. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* = Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making. 2012; 5:15-20. Available at: http://www.mashin.ru/files/2012/sb5_12.pdf (In Russ.)
5. Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Tretyakova E.I., Bekokopytov V.V. Workpieces technological group distribution control mathematical model. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* = News of the Tula State University. Technical Sciences. 2009; 3:47-53.

Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2009_03&year=2009 (In Russ.)

6. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Choice of technological bases on the basis of the decision of a direct problem of the dimensional analysis. *Vestnik MGTU "STANKIN" = Vestnik MSTU "STANKIN"*. 2012; 2:64-69. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (In Russ.)

7. Maksimovskii D.E. Automation of process design by design-technological parameterization. *Russian Engineering Research*. 2011; 31(9):870-872. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1109019X>

8. Goldhahn L., Eckardt R. Sustainable process planning of manufacturing variants for high-precision parts. In: *7th CIRP Conference on High Performance Cutting. Procedia*. 2016; 46:344-347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.127>

9. Duda J., Poboziak J. The architecture of intelligent system for CNC machine tool programming. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:501-508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.143>

10. Poboziak J., Sobieski S. Extension of STEP-NC data structure to represent manufacturing process structure in CAPP system. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:1692-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.294>

11. Mitin S., Bochkarev P. Mathematical modelling in the computer-aided process planning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 124. Article ID 012077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012077>

12. Kalyakulin S.Yu. Algorithm for calculating the parameters of the initial blank in the SITEP MO automated design system. *Russian Engineering Research*. 2014; 34(11):713-715.

Received 02.04.2018; revised 20.09.2018; published online 29.03.2019

About the authors:

Sergey Yu. Kalyakulin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: O-6519-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0644-7746>, rim-tm@mail.ru

Vladimir V. Kuzmin, Professor, Chair of Information Technology and Computer System, Moscow State University of Technology "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127994, Russia), D.Sc. (Engineering), ResearcherID: V-5405-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-8563>, kvv2607@yandex.ru

Eduard V. Mitin, Associate Professor, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5383-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9899-3420>, rimnauka@rambler.ru

Sergey P. Suldin, Head, Chair of Mechanical Engineering Technology, Ruzayevka Institute of Engineering, National Research Mordovia State University (68/1 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5381-2017, <https://orcid.org/0000-0002-8159-6322>, rimstanok@mail.ru

Tatiana B. Tyurbeeva, Associate Professor, Chair of Information Technology and Computer Systems, Moscow State University of Technology "STANKIN" (1st Vadkovskiy Pereulok, Moscow 127994, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: V-5050-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6693-5974>, turbeev@mail.ru

Contribution of the authors:

S. Yu. Kalyakulin – developing the parametric model of the part; V. V. Kuzmin – scientific management, formulation of the research objectives; E. V. Mitin – analyzing literary data; S. P. Suldin – developing a table of variables; T. B. Tyurbeeva – writing the draft, word processing, editing the text, reviewing the relevant literature.

All authors have read and approved the final version of the paper.