

## Инновационный подход к разработке технологических процессов изготовления изделий в многономенклатурном производстве

© 2021

*Решетникова Евгения Павловна*<sup>1,3</sup>, начальник сектора решения задач энергообмена  
*Бочкарев Петр Юрьевич*<sup>\*2,4</sup>, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология машиностроения и прикладная механика»  
Камышинского технологического института

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», Саратов (Россия)

<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград (Россия)

\*E-mail: bpy@mail.ru

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8682-964X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

**Аннотация:** Актуальность работы определяется решением важной проблемы – совершенствования разработки технологических процессов (ТП) изготовления изделий в условиях производственных систем традиционных машиностроительных предприятий, осуществляющих переход к автоматизации и интеллектуализации своего производственного цикла. Для решения сформулированной выше задачи предложен инновационный подход, состоящий в разработке рациональных технологических процессов изготовления изделий многономенклатурной производственной системы на основе принятия эффективных проектных технологических решений. Предложенный способ проектирования рациональных технологических процессов изготовления изделий многономенклатурной производственной системы реализуется в разработанной авторами системе автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (САПлТП). САПлТП – современный инструмент автоматизации технологической подготовки производства, соответствующий актуальной концепции цифровизации производства. Разработанный авторами комплекс контрольно-измерительных процедур (ККИП), способствующий совершенствованию САПлТП, направлен на модернизацию механообрабатывающих производств с традиционным производственным циклом и обеспечение процесса их цифровой трансформации. ККИП осуществляет автоматизированное проектирование рациональных единичных технологических процессов в мелкосерийном производстве на основе информации о реальных размерных параметрах поверхностей заготовки детали на начальном этапе создания ТП и на основе включения в структуру ТП рационального комплекта контрольно-измерительных средств (СИ), сформированного на базе ККИП, для оценки заданной точности изготовления детали. Представлено методическое и алгоритмическое обеспечение реализации ККИП, включающее в себя разработку методики координатного измерения деталей, служащей структурным элементом рационального ТП, и алгоритма формирования рационального комплекта контрольно-измерительных средств при проектировании рационального ТП.

**Ключевые слова:** технологический процесс; производственная система; многономенклатурное производство; комплекс контрольно-измерительных процедур; рациональный комплект контрольно-измерительных средств; ККИП; САПлТП.

**Для цитирования:** Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Инновационный подход к разработке технологических процессов изготовления изделий в многономенклатурном производстве // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2. С. 35–46. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-35-46.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях функционирования механообрабатывающих производственных систем возрастает потребность выпуска многономенклатурной продукции высокого качества с целью сохранения конкурентоспособности предприятия. Складывающаяся тенденция развития механообрабатывающей промышленности направлена на интеллектуализацию производственного процесса изготовления изделий [1; 2], которая определяет переход механообрабатывающих предприятий к многономенклатурному производству со сменой характера организации производства и автоматизацией его планирования [3–5].

Существующие подходы к обеспечению качества изготовления изделий механообрабатывающей промышленности не всегда обладают достаточной степе-

нью универсальности [6]. Так, в работе [7] отмечается положительное влияние создания цифровых двойников производственного процесса, что повышает качество процесса проектирования радиоэлектронной продукции. Цифровые двойники позволяют избежать технологических ошибок на стадии реализации производства и существенно снижают экономические риски.

Ведется интенсивная работа по анализируемому вопросу, и предлагаются перспективные решения проблемы совершенствования технологической подготовки производства (ТПП) и повышения эффективности его производственного цикла [8–10]. Так, найденные в литературных источниках решения для проектирования новейших систем планирования производства для его технологической подготовки в целом направлены на совершенствование отдельных этапов производства, что недостаточно обеспечивает согласованность этапов

проектирования и реализации производственного процесса. В то же время обеспечение тесной взаимосвязи этапов проектирования производственного процесса и его реализации способствует повышению эффективности многономенклатурной производственной системы [11; 12].

Для решения вышеупомянутой проблемы – недостаточного исследования согласованности этапов производственного процесса авторы подробно рассматривают решение задачи совершенствования ТПП, а именно совершенствование процесса проектирования технологических процессов (ТП) изготовления изделий при автоматизации планирования производства. С этой целью разработан и реализован комплекс контрольно-измерительных процедур (ККИП), обеспечивающий автоматизацию ТПП и взаимосвязь ее проектных процедур при разработке ТП, а именно учет взаимосвязи

реальных размерных характеристик поверхностей заготовки для проектирования рационального ТП производства конечного изделия [13]. Структура комплекса контрольно-измерительных процедур представлена на рис. 1.

ККИП реализуется в системе автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (САПлТП) (рис. 2). Особенностью САПлТП является возможность проектирования множества альтернативных вариантов ТП изготовления изделий и способность выбрать из указанного множества ТП рациональные ТП для изготовления деталей в каждой конкретной производственной ситуации.

Развитием данной работы видится совершенствование проектирования рациональных технологических процессов производственной системы посредством учета взаимосвязи функциональных возможностей

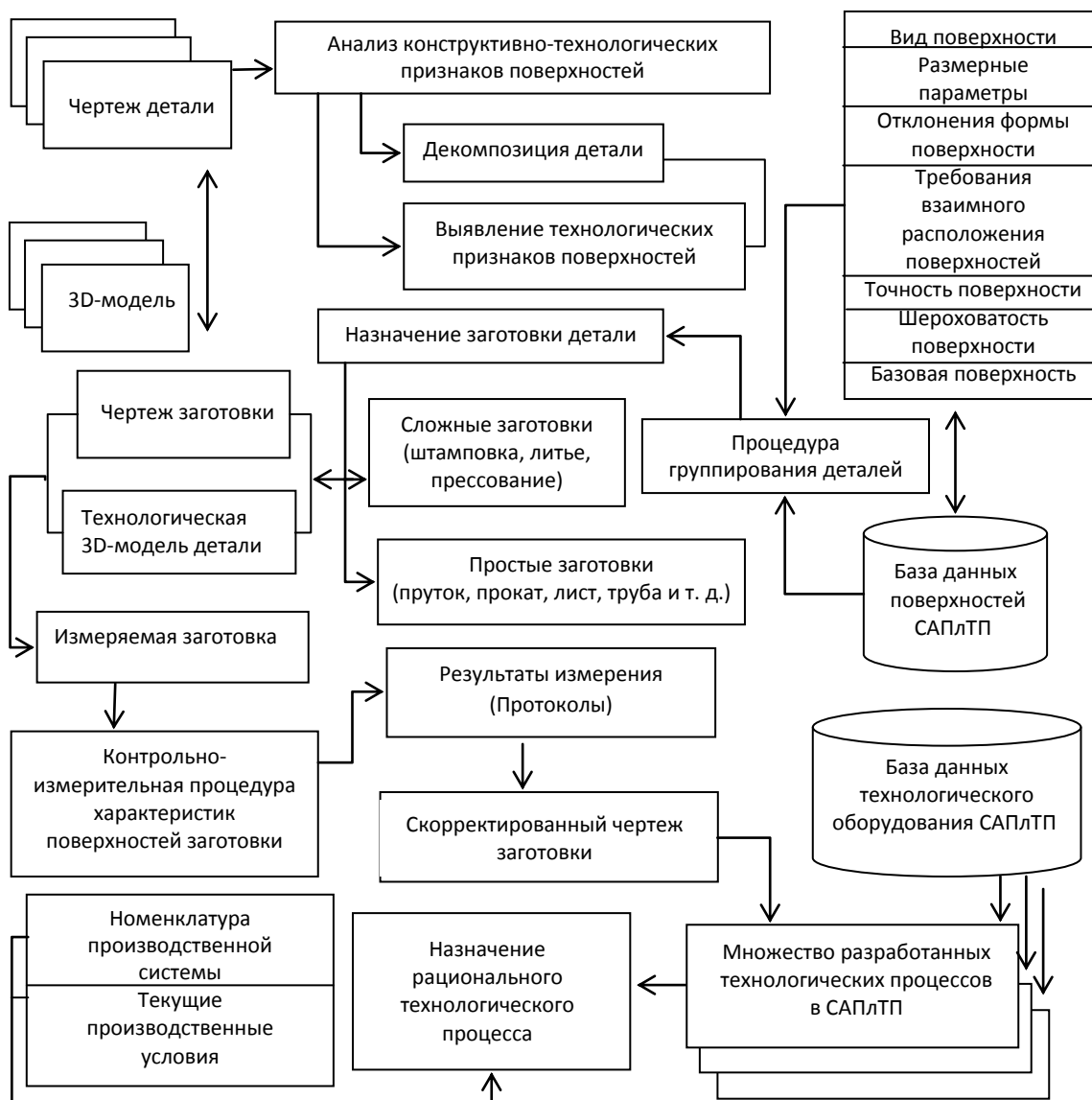


Рис. 1. Структурная схема комплекса контрольно-измерительных процедур  
 Fig. 1. Structure diagram of the complex of monitoring and measuring procedures

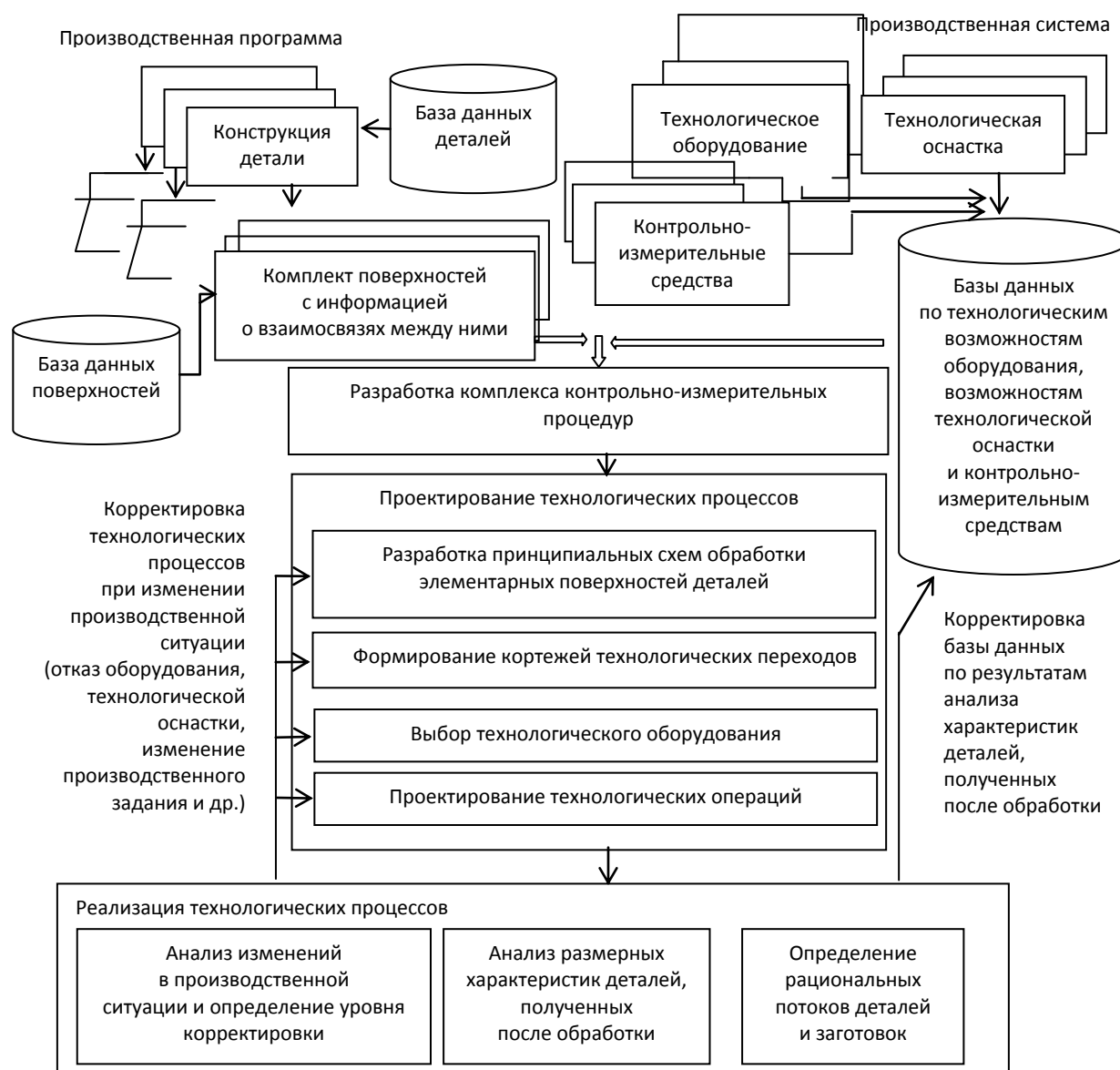


Рис. 2. Принципиальная схема системы планирования многономенклатурных технологических процессов  
 Fig. 2. Basic diagram of the System of Planning of Manufacturing Procedures

контрольно-измерительного инструмента с технологическими возможностями обрабатывающего оборудования и конструкторско-технологическими параметрами изготавливаемых изделий.

Цель работы – предложение подхода к разработке рациональных технологических процессов изготовления изделий многономенклатурных производств для повышения эффективности их производственно-го цикла.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание комплекса контрольно-измерительных процедур САП/ТП подразумевает последовательное решение задач разработки основных методик и алгоритмов для их реализации.

Первая задача – это разработка методики измерения размерных характеристик поверхностей заготовок изго-

тавливаемых деталей (МИ) и ее формализация. МИ является структурным элементом при проектировании рационального ТП изготовления деталей.

Вторая задача включает разработку методики назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств и ее формализацию при проектировании рационального ТП изготовления деталей.

Решение третьей задачи обеспечивает разработку алгоритмического и программного обеспечения ККИП.

Разработанная МИ в основном предназначена для автоматизированных контрольно-измерительных средств (СИ), производящих контрольно-измерительные процедуры контактным методом. Предложенная МИ рекомендует операторам автоматизированного СИ рациональное количество координатных точек и их целесообразное расположение на анализируемых поверхностях заготовок для сбора измерительной информации.

Вычисление рационального количества координатных точек ( $N_{рац}$ ) при измерениях выполнено посредством метода статистических испытаний. Способ расположения рассчитанного рационального количества точек найден при помощи аппарата комбинаторного анализа. Условие определения возможных вариантов расположения координатных точек ( $k$ ): способы расположения различны при условии, что состоят из одинакового количества точек (рационального  $N_{рац}$ ), которые расположены в различном порядке.

Процедура назначения комплекта контрольно-измерительных средств производственной системы состоит из:

- генерации множества возможных вариантов контрольно-измерительных средств в комплекты;
- процесса отсева нерациональных вариантов контрольно-измерительных средств из комплектов, сформированных на предыдущем этапе;
- выбора рационального комплекта контрольно-измерительных средств для контрольно-измерительных операций, проектируемого рационального ТП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Разработка ККИП

Решение первой задачи направлено в основном на оптимизацию контрольно-измерительных процедур, осуществляемых с помощью автоматизированных средств измерения для деталей, измерение которых представляет собой технически сложный и трудоем-

кий процесс. Решение указанной технологической задачи актуально в рамках автоматизации ТПП производства, так как направлено на повышение точности и производительности не только процесса измерения, но и производительности производственного процесса в целом.

В работе рассмотрен модельный пример для определения рационального количества точек поверхности цилиндрической формы.

Анализ размерного параметра максимально возможного ( $N_M$ ) количеством точек на анализируемой поверхности повышает достоверность измерительной процедуры, однако требует и больших временных ресурсов на ее осуществление, что повышает трудоемкость и себестоимость процедуры. Измерение же размерного параметра анализируемой поверхности минимально возможным ( $N_P$ ) количеством точек рекомендованным программным обеспечением измерительного средства не всегда оправдано необходимой точностью контрольно-измерительной процедуры. Поэтому предложено следующее решение: количество рациональных координатных точек ( $N_{рац}$ ) исследуемой поверхности определять в интервале значений ( $N_P; N_M$ ) методом статистических испытаний, позволяющим установить значение действительного размерного параметра поверхности с помощью количества точек анализируемой поверхности, определенного случайным образом.

$N_P$  – рекомендованное количество точек, указанное в программных обеспечениях автоматизированных средств измерений;

$N_M$  – максимальное количество точек измеряемой поверхности детали (рис. 3).

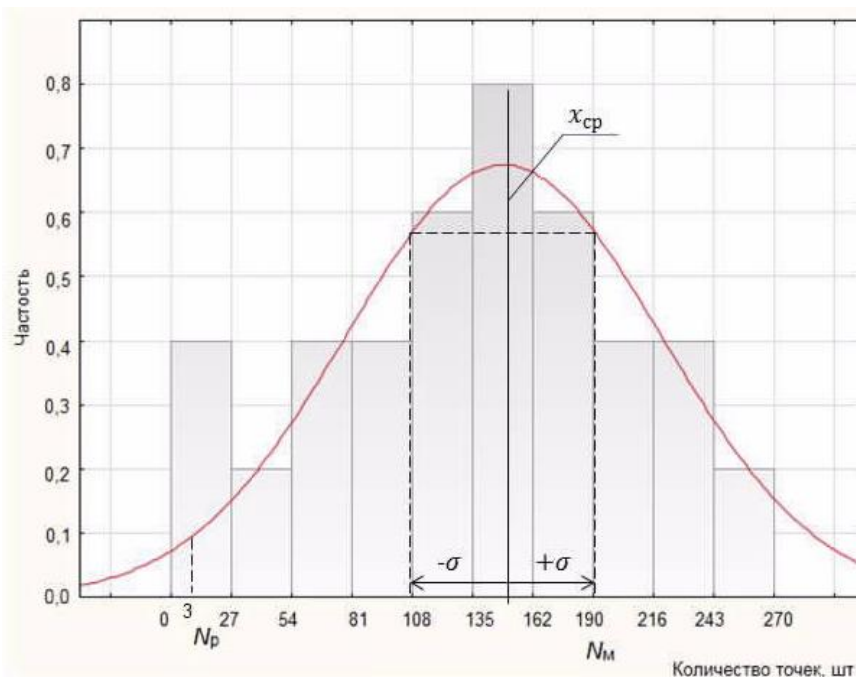


Рис. 3. Определение рационального числа координатных точек поверхности детали цилиндрической формы

Fig. 3. Determination of a rational number of coordinate points of a surface of the cylindrical part

В работе число координатных точек, необходимых для проведения контрольно-измерительной процедуры, принято за случайную величину, что обосновано положением: количество точек при разных условиях проведения измерительной процедуры различно (человеческий фактор, проблема идентичного расположения координатных точек на анализируемых поверхностях даже одинакового их количества и различная технико-экономическая составляющая при различных контрольно-измерительных процедурах). Данные для расчета сведены в таблицу 1.

Данные из таблицы 1 позволяют построить кривую распределения частоты попадания в интервал  $x_i$  размерного параметра измеренной поверхности (интервал определяет измеренное значение размерного параметра при условии заданного значения его допуска) от количества координатных точек.

Количество координатных точек, согласно рис. 3, подчиняется закону нормального распределения, так как результирующая погрешность измерения представляет собой сумму большого числа погрешностей, влияние каждой из которых на результирующую погрешность имеет один порядок. Величина  $(x_{cp})$  определяет центр группирования значений  $N_{рац}$ , среднее квадратическое отклонение  $(\sigma)$  ограничивает интервал со значением  $N_{рац}$ , минимальная граница которого определяется  $(\sigma)$ .  $N_{рац}$  принимается с учетом доверительного интервала оценки достоверности результата  $(\alpha_d)$ .  $\alpha_d$  равен 99,73 % (согласно литературным источникам).

Количество возможных вариантов расположения координатных точек анализируемой поверхности вычислено по зависимости

$$k = (N_0 - 1)! \quad (1)$$

По расчетам согласно (1) принимается способ расположения координатных точек, наиболее соответствующий текущим условиям контрольно-измерительной процедуры, а именно максимально возможное заполне-

ние рассчитанным количеством точек  $N_{рац}$  измеряемой поверхности с наименьшими временными затратами на процедуру измерения:

$$t_k = \frac{p(N_M)}{g} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $t_k$  – время, затраченное на контрольно-измерительную процедуру;

$p(N_M)$  – замкнутый профиль исследуемой поверхности заготовки;

$g$  – скорость снятия координатных точек оператором средства измерения ( $g = \text{const}$ ).

Определенное по (2) расположение точек накладывается на исследуемую поверхность, и находится способ целесообразного расположения координатных точек поверхности с условием минимальных затрат временных ресурсов на контрольно-измерительную процедуру:

$$S_{N_{рац}}(n) = \sum_{i=1}^{N_{рац}} \sum_{j=1}^{N_{рац}} t_{ij} n_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{рац}} n_{ij} = 1, \forall j = \overline{1, N_0} \\ \sum_{i=1}^{N_{рац}} n_{ij} = 1, \forall i = \overline{1, N_0} \\ n_{ij} \in [0, 1] \end{cases}$$

$$n_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ в цикле есть переход из } i \text{ в } j \\ 0, \text{ перехода нет из } i \text{ в } j \end{cases}$$

Таблица 1. Исходные данные и результаты измерения  
Table 1. Initial data and measurement results

Максимальное количество точек поверхности		190		
Количество интервалов		5		
Шаг интервала		38		
Интервал значений координатных точек, $x_i$		Среднее значение величины количества точек, $x_{icp}$	Частота попадания размерного параметра в интервал, $m_i$	Частота попадания размерного параметра в интервал, $m_i/n$
$x_{mini}$	$x_{mini} + C$			
3	38	38	30	0,16
39	77	58	22	0,12
78	116	97	49	0,22
117	155	136	80	0,42
156	194	175	9	0,1

где  $S_{N_{рац}}$  – принимаемый способ расположения точек на измеряемом объекте;

$N_{рац} = (n_1, n_2, n_3, \dots, n_k)$  – множество рассчитанного рационального количества координатных точек;

$t_{ij}$  – время, затрачиваемое на перемещение измерительного наконечника автоматизированного СИ от одной точки поверхности к другой.

В работе [14] авторами представлено подробное описание способа группирования поверхностей с позиции сложности измерения и его формализация на основе аппарата кластерного анализа [15; 16]. Группирование поверхностей при проектировании рационального ТП необходимо для повышения эффективности обработки результатов контрольно-измерительных процедур производственной системы.

Решение задачи 2. Формализация назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств (рис. 4) осуществлена с учетом действующей производственной ситуации при условии минимизации суммарного времени контрольно-измерительной процедуры:

$$T_k = \sum t_k \rightarrow \min ,$$

$$\begin{cases} P(K'') = \sum_{m=1}^z k_m \cdot w_k \rightarrow \max \\ \sum_{m=1}^z k_m \cdot t_k \leq T_k \\ k_m \in \{0,1\}, m = \overline{1, z} \end{cases} , \quad (4)$$

$$k_m = \begin{cases} 1, \text{ если СИ входит в комплект} \\ 0, \text{ если СИ не входит в комплект} \end{cases} ,$$

где  $T_k$  – суммарное время контрольно-измерительной процедуры;

$t_k$  – время работы каждым контрольно-измерительным средством;

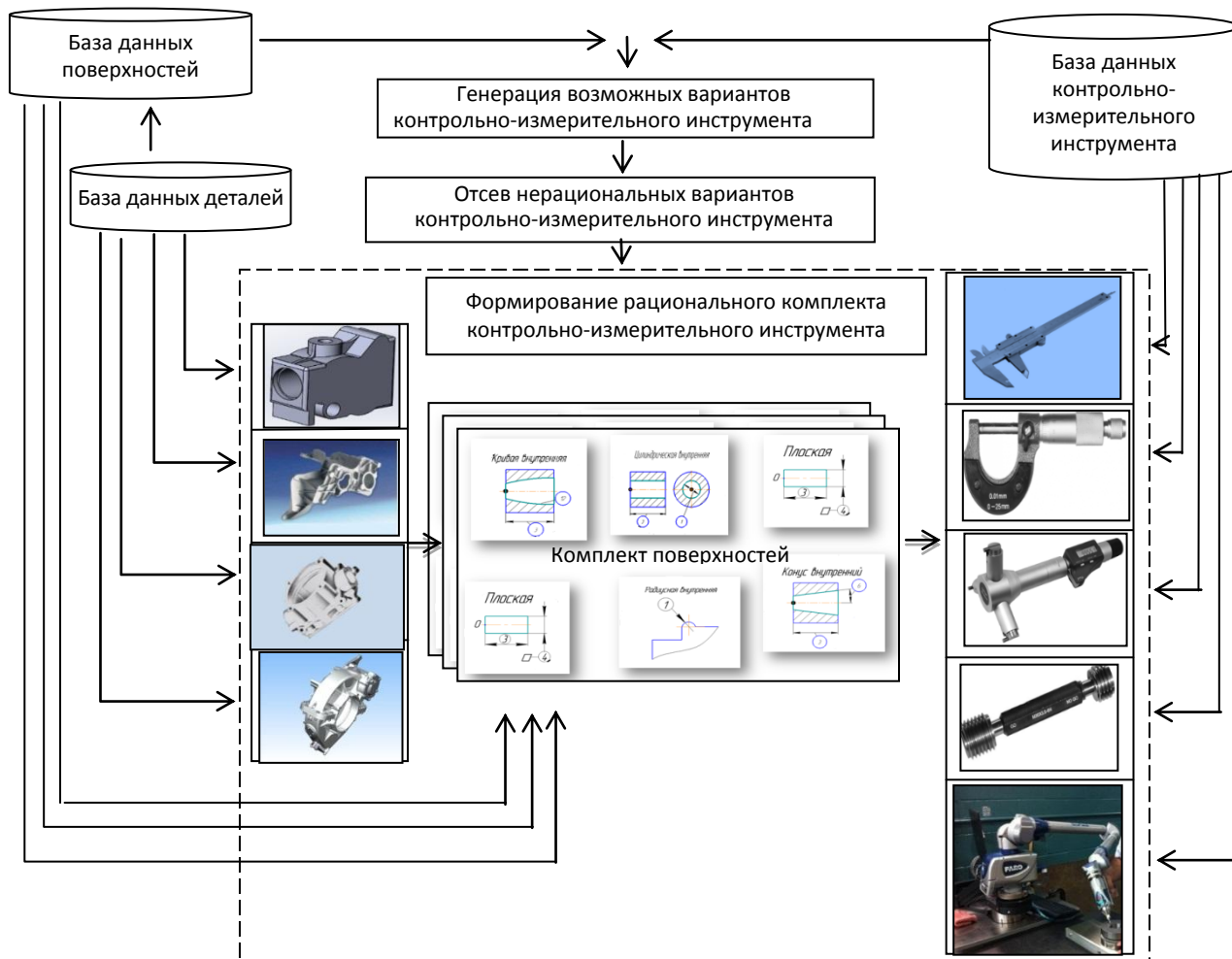


Рис. 4. Формирование рационального комплекта контрольно-измерительных средств производственной системы

Fig. 4. The formation of an efficient set of monitoring and measuring tools of a production system

$P(K'')$  – рациональный комплект контрольно-измерительных средств для текущей производственной ситуации;

$k_m$  – конкретный контрольно-измерительный инструмент, входящий в комплект,  $m=1, 2, \dots, z$ ;  $z$  – общее количество контрольно-измерительных средств на контрольно – измерительной процедуре;

$\{w_k\}$  – технические характеристики конкретного контрольно-измерительного инструмента.

Формирование рационального комплекта контрольно-измерительных средств осуществляется на базе ге-

нетического аппарата. Время работы алгоритма ограничено технико-экономической целесообразностью контрольно-измерительной процедуры.

Решение задачи 3. Алгоритмическое обеспечение ККИП включает алгоритм назначения рациональных точек исследуемой поверхности (рис. 5), алгоритм рационального расположения координатных точек на исследуемой поверхности (рис. 6) и алгоритм назначения целесообразного количества контрольно-измерительных средств при проектировании рационального ТП изготовления изделий (рис. 7).

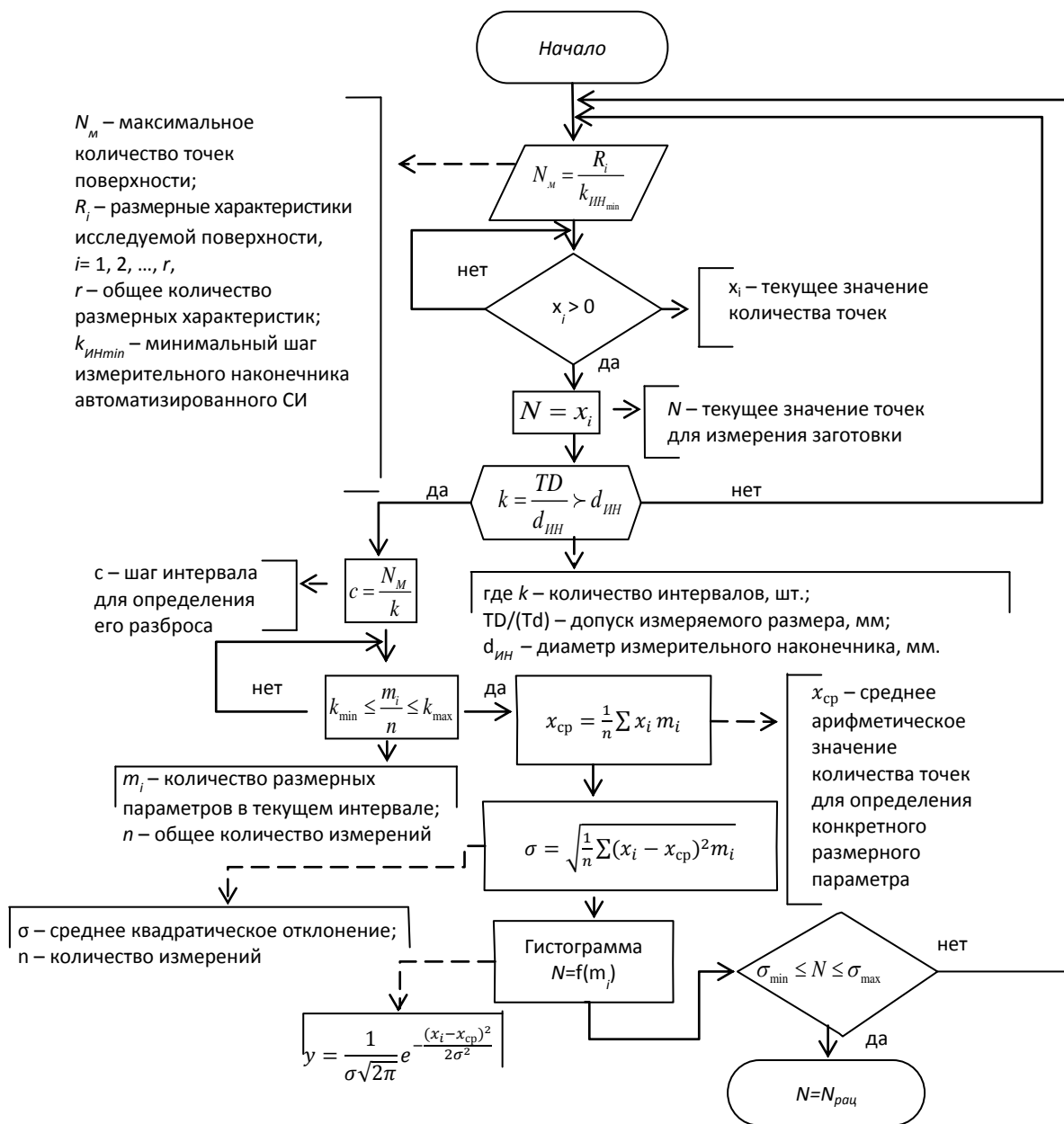


Рис. 5. Алгоритм расчета рационального количества точек для измерения размерного параметра поверхности детали

Fig. 5. The algorithm of calculation of the rational number of points to measure dimensional parameters of a part surface

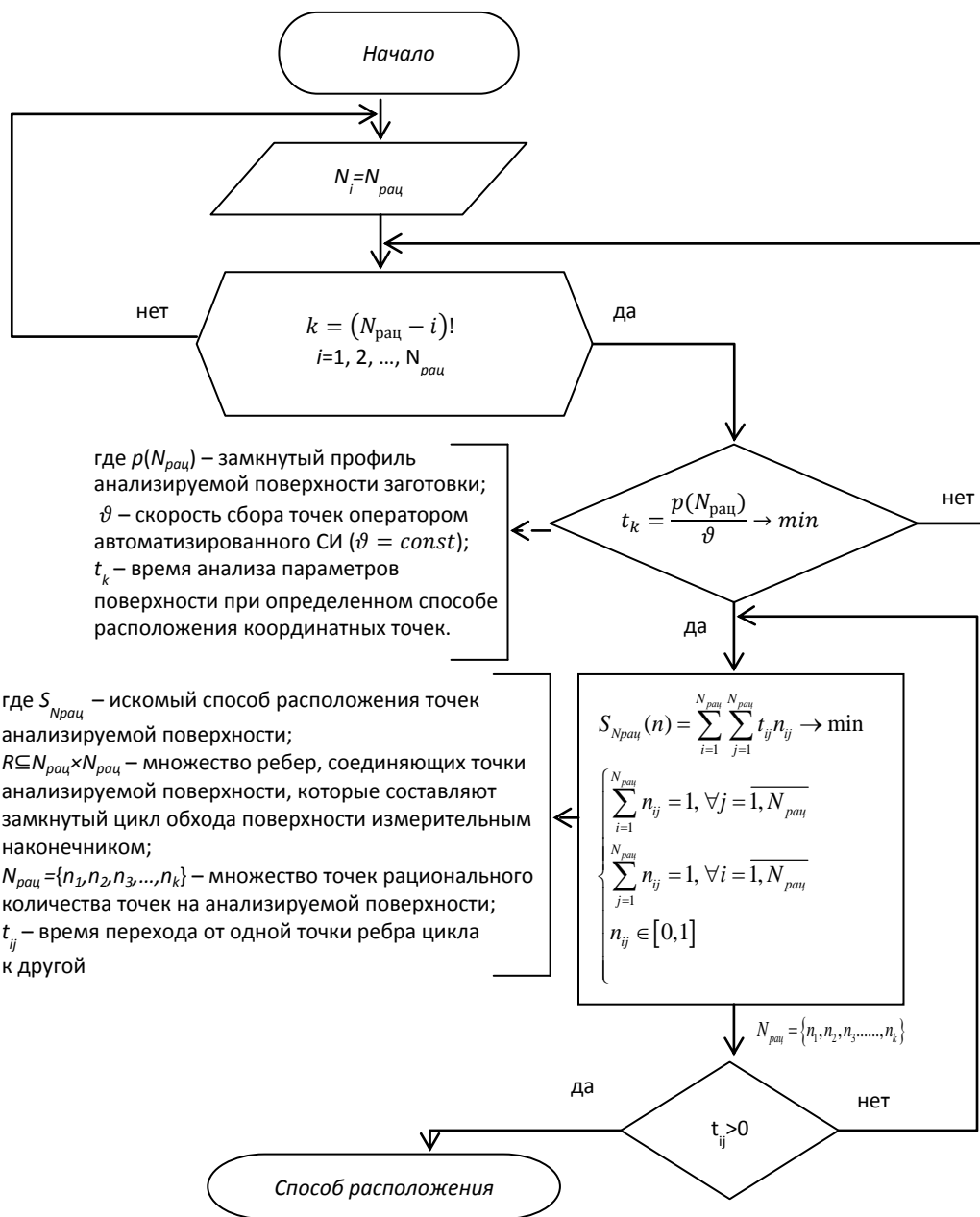


Рис. 6. Алгоритм определения оптимального способа расположения рационального количества точек на измеряемых поверхностях

Fig. 6. The algorithm of identifying an optimal method of location of rational number of points on measured surfaces

Согласно рис. 5 реализация алгоритма включает:

- расчет максимально возможного количества координатных точек на исследуемой поверхности в зависимости от используемого диаметра измерительного наконечника СИ;
- перебор значений из интервала  $(0; N_M)$ ;
- группирование одинаковых значений размерных параметров;
- вычисление количества интервалов  $k$  для распределения значений, полученных в предыдущем шаге:

$$k = \frac{TD}{d_{ИИ}}, \tag{5}$$

где  $k$  – число интервалов, шт.;

TD (Td) – величина технологического допуска измеряемого размера, мм;

$d_{ИИ}$  – диаметр измерительного наконечника, мм;

- определение размера интервала:

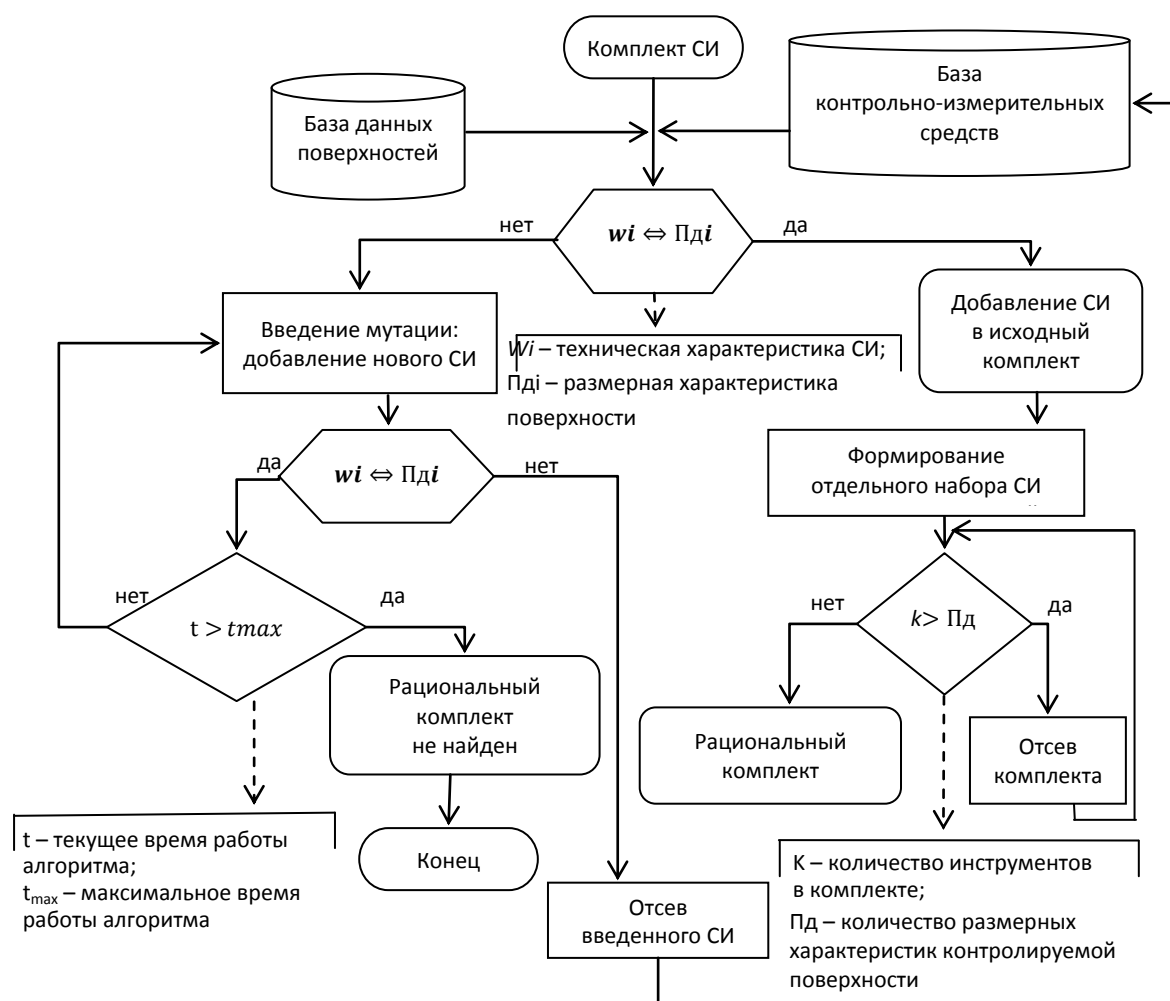
$$c = \frac{N_M}{k}, \tag{6}$$

где  $c$  – шаг интервала для определения его разброса;

$N_M$  – максимальное количество точек измеряемой поверхности, шт.;

- заполнение таблицы 1;





**Рис. 7.** Алгоритм формирования рационального комплекта контрольно-измерительных средств в САПлТП  
**Fig. 7.** The algorithm of formation of an efficient set of monitoring and measuring tools in the System of Computer-Aided Planning of Manufacturing Procedures

– графическое представление зависимости рассчитанных значений;

– определение рациональной величины количества точек для измеряемого параметра исследуемой поверхности:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - x_{cp})^2 m_i}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение. Определяет интервал с рациональной величиной количества точек для измеряемого размерного параметра;

$n$  – общее количество измерений. Принимается значение минимальной границы среднее квадратического отклонения с целью сокращения времени контрольно-измерительной процедуры.

Последовательность, представленная на рис. 6, включает:

– расчет рационального числа точек для измеряемой поверхности;

– расчет (1) числа вариантов расположения рационального числа координатных точек на поверхности;

– выбор (2) оптимального варианта расположения координатных точек на измеряемой поверхности.

Формирование рационального комплекта контрольно-измерительной процедуры в производственной системе (рис. 7) осуществлено при помощи аппарата генетического алгоритма [16–18] с критериями минимизации времени контрольно-измерительной процедуры и однородности [19] – с использованием каждого отдельного СИ для наиболее большого количества поверхностей, отвечающих техническим возможностям СИ, и учетом действующих условий производственной системы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работоспособность разработанных в рамках ККИП методик и алгоритмов подтверждена промышленным экспериментом в условиях действующих механообрабатывающих производств. Введение проектных контрольно-измерительных процедур позволяет получить информацию о реальных размерных характеристиках заготовки, что способствует проектированию

рационального ТП. На это направлено и применение сформированного с помощью ККИП рационального комплекта контрольно-измерительных средств производственной системы, что способствует сокращению времени контрольно-измерительных процедур, а соответственно, и сокращению времени реализации ТП в целом.

Таким образом, применение ККИП обеспечивает сокращение временных затрат на 25 % и технологического брака в среднем на 5 % многономенклатурной производственной системы [20].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработано алгоритмическое обеспечение ККИП, способствующее совершенствованию разработки ТП в традиционных производственных системах и проектированию рационального ТП изготовления изделий в действующих условиях производственной системы механообрабатывающего производства.

Предложенное алгоритмическое и программное обеспечения ККИП в рамках САПР ТП адаптировано к существующим традиционным системам планирования производства и направлено на их модернизацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Д.Н., Кузнецов И.И., Братухин А.Г. Технологическая подготовка производства конкурентоспособных авиационных двигателей на основе цифровых технологий // *Технология машиностроения*. 2018. № 4. С. 59–67.
2. Turner C.J., Emmanouilidis C., Tomiyama T., Tiwari A., Roy R. Intelligent Decision Support for Maintenance: an Overview and Future Trends // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 32. № 10. P. 936–959. DOI: [10.1080/0951192X.2019.1667033](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667033).
3. Братухин А.Г., Стрелец Д.Ю. Автоматизированная система технологической подготовки производства конкурентоспособной авиатехники (на примере самолета Sukhoi Superjet 100) // *Технология машиностроения*. 2017. № 9. С. 46–51.
4. Маданов А.В. Анализ технологической подготовки производства авиационных деталей сложной геометрии на станках с числовым программным управлением // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 1-5. С. 1467–1472.
5. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Разработка комплекса контрольно-измерительных процедур в системе планирования многономенклатурных технологических процессов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 3. С. 80–91.
6. Справочник технолога / под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
7. Маркелова Н.В., Поляков С.Л. Влияние технологии цифровых двойников на качество процесса проектирования радиоэлектронной продукции // *Наука и бизнес: пути развития*. 2020. № 9. С. 151–153.
8. Aivaliotis P., Georgoulas K., Chryssolouris G. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 32. № 11. P. 1067–1080. DOI: [10.1080/0951192X.2019.1686173](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173).
9. Chryssolouris G., Mavrikios D., Papakostas N., Mourtzis D., Michalos G., Georgoulas K. Digital Manufacturing: History, Perspectives, and Outlook // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*. 2008. Vol. 223. № 5. P. 451–462. DOI: [10.1243/09544054JEM1241](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1241).
10. Справочник технолога – машиностроителя / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
11. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю. Принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2-2. С. 117–122.
12. Nazaryev A., Bochkaev P., Reshetnikova E. Integrated approach to process design of manufacturing of high-precision products // *IOP Conference series: Materials science and Engineering*. 2020. Vol. 709. Article number 033085.
13. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Разработка моделей для формализации проектирования контрольно-измерительных процедур технологического процесса изготовления деталей машиностроительных производств // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 8. С. 46–50.
14. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления // *Научные технологии в машиностроении*. 2021. № 3. С. 19–25.
15. Odell P.L., Duran B.S. Mathematical programming and Cluster analysis: a survey // *Cluster Analysis. Lecture notes in Economics and mathematical systems*. Berlin: Heidelberg, 1974. Vol. 100. P. 43–72. DOI: [10.1007/978-3-642-46309-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46309-9).
16. Maulik U., Bandyopadhyay S. Genetic algorithm-based clustering technique // *Pattern Recognition*. 2000. Vol. 33. № 9. P. 1455–1465. DOI: [10.1016/S0031-3203\(99\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00137-5).
17. Mirjalili S. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Switzerland: Springer, 2019. Vol. 780. 156 p. DOI: [10.1007/978-3-319-93025-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1_4).
18. Kramer O. *Genetic Algorithms*. Switzerland: Springer, 2017. Vol. 679. 92 p. DOI: [10.1007/978-3-319-52156-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5).
19. Бокова Л.Г., Королев Р.Д., Бочкарев П.Ю. Использование показателя однородности по используемому оборудованию при оценке производственной технологичности деталей // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018. № 7. С. 7–13.
20. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г. Назначение оптимального комплекта контрольно-измерительного инструмента в механообрабатывающей системе с учетом складывающейся производственной ситуации: свидетельство о регистрации государственной программы для ЭВМ 2018614651.

## REFERENCES

1. Eliseev D.N., Kuznetsov I.I., Bratukhin A.G. Process design of production of competitive aircraft engines based on digital technologies. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2018, no. 4, pp. 59–67.
2. Turner C.J., Emmanouilidis C., Tomiyama T., Tiwari A., Roy R. Intelligent Decision Support for Maintenance: an Overview and Future Trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 32, no. 10, pp. 936–959. DOI: [10.1080/0951192X.2019.1667033](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667033).
3. Bratukhin A.G., Strelets D.Yu. Automated system of process design of production of competitive aviation equipment (using the example of Sukhoi Superjet 100 airplane). *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2017, no. 9, pp. 46–51.
4. Madanov A.V. The analysis of technological preparation of production the aviation details of complex geometry on machines with numerical program control. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1467–1472.
5. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Development of control measures and monitoring procedures in the framework of computer-aided multiproduct workflow. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 80–91.
6. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [The technologist's reference book]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p.
7. Markelova N.V., Polyakov S.L. The influence of digital twin technology on the quality of the design process of radio electronic products. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2020, no. 9, pp. 151–153.
8. Aivaliotis P., Georgoulis K., Chryssolouris G. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 32, no. 11, pp. 1067–1080. DOI: [10.1080/0951192X.2019.1686173](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173).
9. Chryssolouris G., Mavrikios D., Papakostas N., Mourtzis D., Michalos G., Georgoulis K. Digital Manufacturing: History, Perspectives, and Outlook. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 2008, vol. 223, no. 5, pp. 451–462. DOI: [10.1243/09544054JEM1241](https://doi.org/10.1243/09544054JEM1241).
10. Vasilev A.S., Kutina A.A., eds. *Spravochnik tekhnologa – mashinostroitelya* [Reference book of a technologist-mechanic engineer]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2018. 818 p.
11. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Principles of creating the system of computer-aided design of production operations in multiproduct manufacturing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 117–122.
12. Nazaryev A., Bochkarev P., Reshetnikova E. Integrated approach to process design of manufacturing of high-precision products. *IOP Conference series: Materials science and Engineering*, 2020, vol. 709, article number 033085.
13. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Developing models for planning's characterization of the measuring and-control's procedures for technical process of machinery production. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 8, pp. 46–50.
14. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Parts grouping concept of machining production at efficient route formation of engineering process of their manufacturing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2021, no. 3, pp. 19–25.
15. Odell P.L., Duran B.S. Mathematical programming and Cluster analysis: a survey. *Cluster Analysis. Lecture notes in Economics and mathematical systems*. Berlin, Heidelberg Publ., 1974. Vol. 100, pp. 43–72. DOI: [10.1007/978-3-642-46309-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46309-9).
16. Maulik U., Bandyopadhyay S. Genetic algorithm-based clustering technique. *Pattern Recognition*, 2000, vol. 33, no. 9, pp. 1455–1465. DOI: [10.1016/S0031-3203\(99\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00137-5).
17. Mirjalili S. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Switzerland, Springer Publ., 2019. Vol. 780, 156 p. DOI: [10.1007/978-3-319-93025-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1_4).
18. Kramer O. *Genetic Algorithms*. Switzerland, Springer Publ., 2017. Vol. 679, 92 p. DOI: [10.1007/978-3-319-52156-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5).
19. Bokova L.G., Korolev R.D., Bochkarev P.Yu. The use of the homogeneity indicator of used equipment in the evaluation production manufacturability of parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 7, pp. 7–13.
20. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. *Naznachenie optimalnogo komplekta kontrolno-izmeritel'nogo instrumenta v mekhanooobratyvatyayushchey sisteme s uchetom skladyvatyayushchey proizvodstvennoy situatsii* [The assignment of an efficient set of monitoring and measuring tool in the mechanical processing system taking into account the unfolding manufacturing situation], *svidetelstvo o registratsii gosudarstvennoy programmy dlya EVM 2018614651*.

## Innovative approach to the development of manufacturing procedures of producing goods in a multiproduct manufacture

© 2021

**Evgeniya P. Reshetnikova**<sup>1,3</sup>, Head of sector for solving energy exchange problems

**Petr Yu. Bochkarev**<sup>\*2,4</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

professor of Chair “Mechanical Engineering and Applied Mechanics” of Kamyshin Technological Institute

<sup>1</sup>Join-Stock Company “Research and Development Enterprise “Almaz”, Saratov (Russia)

<sup>2</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

\*E-mail: [bpy@mail.ru](mailto:bpy@mail.ru)

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8682-964X>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

**Abstract:** The relevance of the study is in the solution of an important problem – the improvement of the development of engineering procedures for producing goods within the production systems of conventional machine-building enterprises performing the transition to automation and intellectualization of their production cycle. To solve the above-stated task, the authors propose an innovative approach involving the development of efficient manufacturing procedures of producing goods by a multiproduct production system based on making effective project technology solutions. The suggested method of designing effective manufacturing procedures for producing goods by a multiproduct production system is implemented in the System of Computer-Aided Planning of Manufacturing Procedures developed by the authors. The System of Computer-Aided Planning of Manufacturing Procedures is a modern tool for automation of engineering process preparation corresponding to the relevant concept of production digitalization. The set of monitoring and measuring procedures developed by the authors and promoting the improvement of the System of Computer-Aided Planning of Manufacturing Procedures is aimed at the modernization of machining productions with the traditional production cycle and supporting their digital transformation process. The set of monitoring and measuring procedures performs the automated designing of efficient individual manufacturing procedures within a small-series production based on the information about actual dimensional parameters of the part blank surfaces at the initial stage of creation of a manufacturing procedure and based on the integration into the manufacturing procedure structure of an efficient set of monitoring and measuring tools formed on the base of the complex of monitoring and measuring procedures to evaluate the prescribed accuracy of part production. The paper presents methodological and algorithmic provisions of implementing complex of monitoring and measuring procedures, which include the development of the technique of the parts' coordinate metrology serving as a structural element of an efficient manufacturing procedure and the algorithm of formation of the efficient set of monitoring and measuring tools when designing efficient manufacturing procedure.

**Keywords:** manufacturing procedure; production system; multiproduct manufacture; complex of monitoring and measuring procedures; efficient set of monitoring and measuring tools; System of Computer-Aided Planning of Manufacturing Procedures.

**For citation:** Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Innovative approach to the development of manufacturing procedures of producing goods in a multiproduct manufacture. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 2, pp. 35–46. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-35-46.