

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №11 (137). С. 25-31.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №11 (137). P. 25-31.

Научная статья  
УДК 621.7:658.562  
doi:10.30987/2223-4608-2022-11-25-31

## **Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования производства**

**Евгения Павловна Решетникова<sup>1</sup>**, к.т.н.,  
**Петр Юрьевич Бочкарев<sup>2</sup>**, д.т.н.

<sup>1</sup> АО «НПП «Алмаз, Саратов, Россия, <sup>2</sup> Камышинский институт Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия  
<sup>1</sup>purpose22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8682-964X>  
<sup>2</sup>bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

**Аннотация.** Рассмотрена проблема повышения эффективности изготовления изделий механообрабатывающих производств на основе совершенствования их технологического проектирования. Показана возможность совершенствования технологической подготовки производства с применением комплекса контрольно-измерительных процедур и сформированы его научные основы. Установлено, что учет состояния механообрабатывающего оборудования, оснастки и средств технологического контроля позволяет формализовать основные проектные процедуры разработки технологического проектирования производства и минимизировать временные и материальные затраты проектного этапа.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, интеллектуальная производственная система, рациональный комплект средств технологического контроля, механообрабатывающее производство

**Для цитирования:** Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №11 (137). – С. 25-31. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-25-31.

Original article

## **Concept to generation control-and-measuring procedure's complex at manufacturing preproduction engineering**

**Evgeniia P. Reshetnikova<sup>1</sup>**, Can.Sc.Tech.,  
**Petr Yu. Bochkarev<sup>2</sup>**, Dr.Sc.Tech.

<sup>1</sup>JSC SPE Almaz, Saratov, Russian Federation

<sup>2</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

<sup>2</sup>Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russian Federation

<sup>1</sup>purpose22@mail.ru, <sup>2</sup>bpy@mail.ru

**Abstract.** Researching the problem of increasing the efficiency of manufacturing products of machining industries is considered. Showing the possibility of improving the manufacturing technological preparation of production with the use of a complex of control-and-measuring tools and its scientific foundations has been formed. As a result, knowledge of the state of machining equipment, tooling and technological control means allows to formalize the basic procedures for the development of technological planning of production and minimize time and material costs of staging.

**Keywords:** manufacturing preparation of production, intelligent production system, rational set of technological control tools, machining production

**For citation:** Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Concept to generation control-and-measuring procedure's complex at manufacturing preproduction engineering. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 11 (137), pp. 25-31. doi: 10.30987/2223-4608-2022-11-25-31.

### Введение

Стремительное развитие технологий производства, возможность автоматизации производственных процессов и совершенствование информационных сервисов проектирования и управления производством определяют новый вектор создания и модернизации механообрабатывающих производств. Расширение технологических возможностей механообрабатывающего оборудования также требует инновационных подходов к проектированию маршрута технологического процесса (ТП) изготовления изделий. В работах [1, 2] рассмотрены современные подходы к совершенствованию технологической подготовки производства (ТПП), обеспечению и повышению качества изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла. В работе представлен подход, обеспечивающий максимальное использование технологических возможностей конкретной производственной системы при минимизации временных ресурсов на ее технологическое проектирование – проектирование интеллектуальной производственной системы. Кроме того, для повышения конкурентоспособности изготавливаемой продукции рассмотрена актуальная задача сокращения длительности производственного цикла.

### Материалы и методы

Суть предложенного подхода состоит в применении разработанного комплекса контрольно-измерительных процедур (ККИП), направленного на повышение эффективности изготовления выпускаемой продукции в производственной системе.

Целью работы является разработка и обоснование принципов комплекса контрольно-измерительных процедур, обеспечивающих учёт размерных взаимосвязей поверхностей изделий при разработке структур технологических операций их изготовления и формирование рационального комплекта средств технологического контроля в условиях производственных систем механообрабатывающих производств.

Средой для применения и апробации основ ККИП (рис. 1) служит система автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов (САПлТП), базирующаяся на проектировании множества альтернативных вариантов ТП изготовления изделий с последующим назначением из них рационального ТП, наиболее соответствующего действующей производственной ситуации [3, 4].



Рис. 1. Комплекс контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов

Комплекс контрольно-измерительных процедур и позволяет осуществить требуемый выбор ТП изготовления изделия, рационального для каждой отдельной детали номенклатуры в рамках автоматизированной системы ТПП. Обоснование использования САПлТП определяется способностью автоматизированных систем ТПП приспособлять производственную систему к непрерывно изменяющимся производственным условиям и объектам проектирования.

Отличительная особенность предлагаемого подхода – взаимосвязь принятия технологических решений и учет реальных размерных характеристик заготовок деталей и состояния производственной системы, что и является существенным резервом повышения эффективности разработки технологических процессов изготовления изделий. Схема, представленная на рис. 1, раскрывает основные особенности предлагаемого инновационного подхода к проектированию ТПП:

- технология изготовления каждой детали конкретной производственной системы разрабатывается с учетом ТП всех деталей, изготавливаемых в ней в рассматриваемый интервал времени;

- при разработке технологии изготовления каждой детали конкретной производственной системы учитывается взаимосвязь этапов проектирования ТПП и реализации производственного цикла изделия.

Таким образом, процесс разработки ТП параллелен для всех изготавливаемых деталей производственной системы и базируется на учете информации о реальной производствен-

ной ситуации, непосредственно влияющей на эффективную работу производственной системы.

Для повышения эффективности работы производственной системы и разработки ККИП требуется решение ряда следующих задач:

- Первая задача – группирование деталей производственной системы с позиции сложности их измерения;

- Вторая задача – разработка методики координатного измерения деталей, как структурного элемента технологического процесса;

- Третья задача – разработка алгоритма назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств в условиях производственных систем механообрабатывающих производств.

Первая задача – группирование деталей производственной системы, решалась с применением аппарата кластерного анализа и полное ее решение представлено в работе [5]. Кластеризация основана на переборе множества кластеров-объектов проектирования (деталей) по критериям непротиворечивости с целью описания их анализируемых поверхностей с помощью классификационных признаков, характеризующих поверхности с позиций их функционального назначения и возможности измерения различными типами средств измерения.

В процессе процедуры кластерного анализа, формируются дендрограммы (рис. 2), с уровнем группирования, по которому определяются соответствующие набор групп поверхностей изделий и набор групп самих изделий производственной системы.

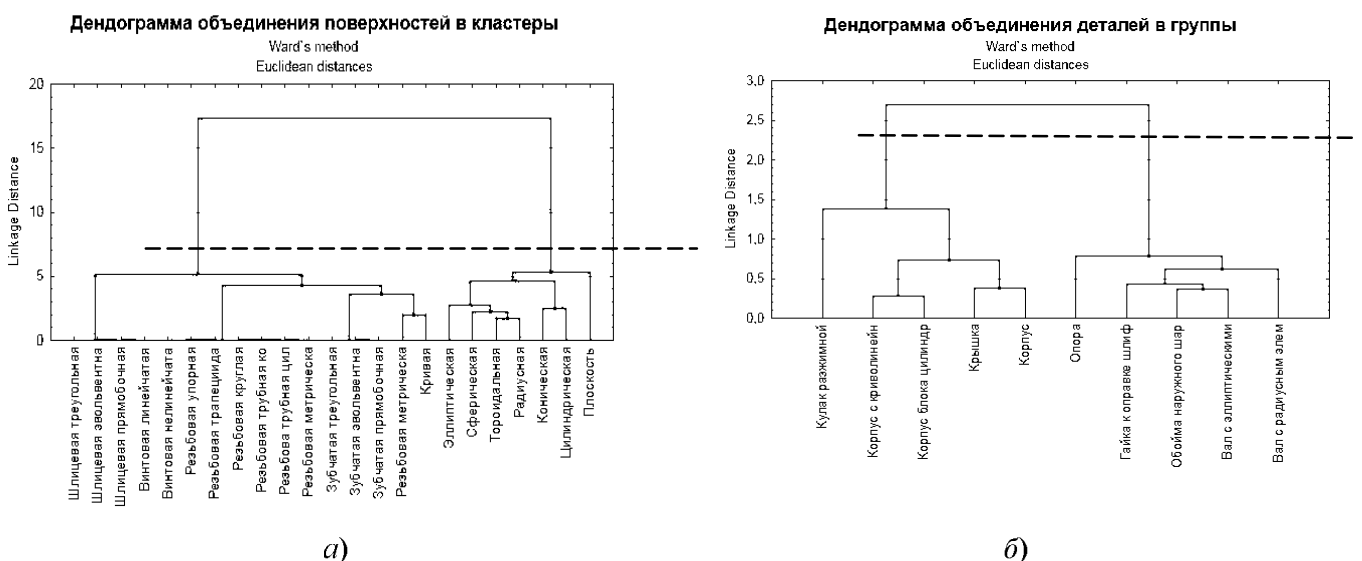


Рис. 2. Способ группирования конструктивных элементов объектов проектирования (а) и самих объектов проектирования (б) с помощью аппарата кластерного анализа

Графически представленные результаты (рис. 2, б) позволяют сделать заключение, что наиболее рациональным разбиением на кластеры является классификация на уровне  $v = 2$ , где формируется 2 класса деталей, поскольку на этом уровне останавливается резкое сокращение количества кластеров.

Решение второй задачи – разработка методики координатного измерения деталей, являющейся структурным элементом разрабатываемого ТП изготовления детали, направленно на разработку рационального ТП, обеспечивающего повышение эффективности производственного процесса.

Методика координатного измерения предназначена в основе своей для изделий со сложной геометрией их поверхностей и применяется при координатно-измерительных процедурах с использованием автоматизированных средств измерения – координатно-измерительных машин (КИМ) и включает в себя:

- определение необходимого количества координатных точек поверхности для получения достоверного результата размерных параметров;
- рациональное расположение координатных точек на поверхности.

Количественное определение необходимого числа координатных точек ( $N_{\text{рац}}$ ) поверхности осуществлено методом статистических испытаний. Зависимость размерного параметра поверхности детали (его частоты) от количества в основе теории вероятности и показана на рис. 3.

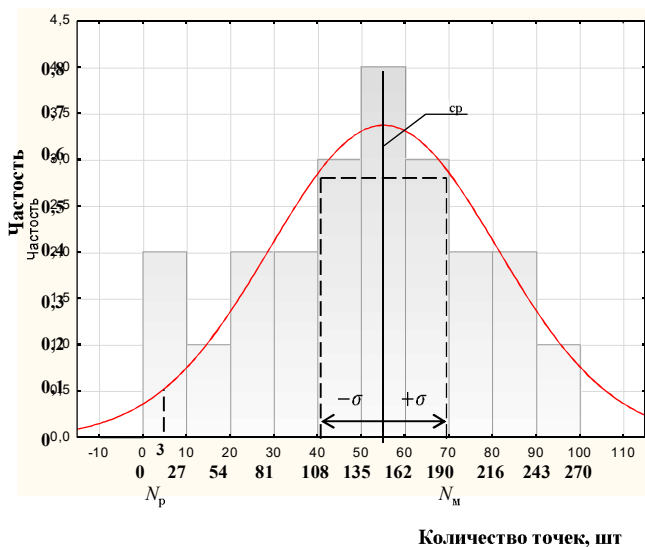


Рис. 3. Определение рационального числа координатных точек поверхности детали

Рациональная величина количества координатных точек определена в области значений  $(N_p; N_m)$ , где  $N_p$  – рекомендуемое количество точек КИМ (принято на основе положений теоретической метрологии: каждую типовую поверхность можно представить минимально возможным числом точек);  $N_m$  – максимально возможное количество точек анализируемой поверхности.

Величина оптимального количества точек назначается с применением метода перебора, количество итераций которого ограничено и назначается в зависимости от требований, связанных с надежностью изделия, в которое входит деталь и технико-экономической целесообразностью ее изготовления.

Расположение полученного конечного множества координатных точек, а именно их рационального количества  $N_{\text{рац}}$ , осуществляется с помощью комбинаторного анализа на основе условия: способы расположения ( $k$ ) координатных точек считаются различными, если они состоят из одинакового количества точек (рационального  $N_{\text{рац}}$ ), но расположены в различном порядке (например, по спирали, квадрату, окружности, пересечением прямых и т.д.):

$$k = (N_{\text{рац}} - 1)! \quad (1)$$

Из полученного числа  $k$  выбирается способ расположения координатных точек. Критериальное условие процедуры измерения: максимальное покрытие координатными точками анализируемой поверхности, с наименьшими временными затратами на процедуру измерения:

$$t_k = \frac{p(N_{\text{рац}})}{v} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $p(N_{\text{рац}})$  – профиль анализируемой поверхности (аналитическая зависимость поверхности анализируемой детали);  $v$  – скорость сбора точек оператором автоматизированного средства измерения ( $v = \text{const}$ );  $t_k$  – время анализа параметров поверхности при определенном способе расположения координатных точек.

Анализируемую поверхность с конкретными размерными характеристиками аппроксимируется выбранными в соответствии с зависимостями (1) и (2) способами расположения координатных точек, и находится способ расположения точек анализируемой поверхности

при условии, что время перехода от одной точки к другой минимально, скорость перехода принята постоянной:

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

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

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

где – искомый способ расположения точек анализируемой поверхности;  $R \subseteq N_{\text{рац}} \cdot N_{\text{рац}}$  – множество ребер, соединяющих точки анализируемой поверхности;  $N_{\text{рац}} = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_k\}$  – множество точек рационального их количества на анализируемой поверхности;  $t_{ij}$  – время перехода от одной точки ребра цикла к другой.

Зависимость (3) определяет набор точек анализируемой поверхности, составляющий наиболее подходящее для текущих условий процедуры измерения их расположения.

Решение третьей задачи ККИП – разработка алгоритма назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств в условиях производственных систем механообработывающих производств направлено на рациональное использование ресурсов времени производственной системы.

Основные процедуры для назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств:

- генерация возможных вариантов комплектов из контрольно-измерительных средств производственной системы;
- отсев нерациональных вариантов комплектов контрольно-измерительных средств;
- формирование рационального комплекта контрольно-измерительных средств.

Генерация возможных вариантов контрольно-измерительных средств производственной системы осуществляется по следующим исходным данным: множество возможных со-

четаний поверхностей и множество вариантов контрольно-измерительных средств производственной системы. Аппарат для формализации процедуры – теория множеств:

$$K = \{\Pi_D\} \cap \{w_i\} \cap \{v_t\} \quad (4)$$

При генерации формируется множество комплектов  $K$  всех возможных вариантов контрольно-измерительных средств с учетом сложившейся производственной ситуации: при условии соответствия множества размерных свойств поверхностей деталей  $\{\Pi_D\}$ , технических характеристик СИ  $\{w_i\}$  и вариантов контрольно-измерительных средств  $\{v_t\}$ , реализующих контрольно-измерительную процедуру.

Вторая процедура – это отсев вариантов контрольно-измерительных средств по критерию однородности из сформированного множества комплектов ( $K$ ). Критерий однородности позволяет выбрать типоразмеры контрольно-измерительных средств, каждый из которых может применяться на как можно большем количестве различных контрольно-измерительных процедур:

$$\begin{cases} \sum_{i,j,n=1}^{u,q,z} k_{i,j,n}(w_1, w_2, \dots, w_{i,j,n}) \neq 0, \\ \sum_{i,j,n=1}^{u,q,z} k_{i,j,n}(w_1, w_2, \dots, w_{i,j,n}) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sum_{i,j,n=1}^{u,q,z} k_{i,j,n}(w_1, w_2, \dots, w_{i,j,n}) \neq 0$  – критерий,

определяющий, что в комплекте должно быть не менее одного инструмента для измерения параметров поверхностей деталей;  $k_i(w_1, w_2, \dots, w_i)$ ,  $k_j(w_1, w_2, \dots, w_j)$ ,  $k_n(w_1, w_2, \dots, w_i)$  – отдельные контрольно-измерительные средства, входящие в каждый из множества комплектов  $K(K_i, K_j, K_n)$  с собственным набором средств измерений;  $w_i, w_j, w_n$  – технические свойства средств измерений, входящих в комплект,  $i = 1 \dots u$ ,  $u$  – общее количество свойств комплекта  $K_i(k_1, k_2, \dots, k_i)$ ,  $j = 1 \dots q$ ,  $q$  – общее количество свойств комплекта  $K_j(k_1, k_2, \dots, k_j)$ ,  $n = 1 \dots z$ ,  $z$  – общее количество свойств комплекта  $K_n(k_1, k_2, \dots, k_n)$ .

Формализация процедур формирования рационального комплекта контрольно-измери-

тельных средств проведена с помощью аппарата генетического алгоритма:

$$T_k = \sum t_k \rightarrow \min,$$
$$\left\{ \begin{array}{l} P(K'') = \sum_{m=1}^z k_m w_k \rightarrow \max, \\ \sum_{m=1}^z k_m t_k \leq T_k, \\ k_m \in [0, 1] = \overline{1, z}, \end{array} \right. \quad (6)$$

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

где  $P(K'')$  – функция для определения рационального комплекта контрольно-измерительных средств для текущей производственной ситуации;  $k_m$  – средство измерения, входящее в каждый из оставшихся после процедуры отсева вариантов комплектов,  $m = 1, 2, \dots, z$ ,  $z$  – общее количество контрольно-измерительных средств на данной контрольно-измерительной процедуре;  $\{w_k\}$  – технические характеристики контрольно-измерительных средств;  $t_k$  – время работы отдельным средством измерения.

В случае не достижения требуемого результата алгоритм назначения рационального комплекта контрольно-измерительных средств генерирует новое множество (поколение) на основе сформированных ранее вариантов комплектов средств измерений.

На основе решенных задач для разработки ККИП создано алгоритмическое и программное обеспечения, проведено тестирование полученных результатов в программной среде Matlab и корректировка программ по результатам тестирования ККИП в условиях действующей производственной системы. По итогам разработки программного обеспечения получены свидетельства государственной регистрации программ ЭВМ: «Выбор мерительного инструмента для контроля размерных характеристик наружных конических поверхностей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов», «Выбор мерительного инструмента для контроля размерных характеристик наружных сферических поверхностей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов», «Назначение оптимального комплекта контрольно-измеритель-

ного инструмента в механообрабатывающей системе с учетом складывающейся производственной ситуации».

### Результаты и обсуждение

Использование ККИП при технологическом проектировании направлено на оценку реальных данных о размерных параметрах поверхностей и позволяет разработать рациональный ТП для текущих условий производственной системы. Введение проектных процедур анализа действительных параметров поверхностей позволяет осуществлять управляющее воздействие на разработку ТП изготовления детали, тем самым обеспечить составление рациональной структуры технологических операций для текущих условий производственного процесса.

### Заключение

Применение ККИП при технологическом проектировании обеспечивает проектирование интеллектуальной производственной системы. Эффективность организации производственного цикла в подобных системах обеспечивается грамотным функционированием современных перспективных технологических средств и рациональным использованием их функциональных особенностей в рамках осуществляемого производственного процесса. Адаптация ККИП в существующие системы ТПП и использование при разработке новых представляет собой новое решение в области совершенствования технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе принципов, ориентированных на цифровизацию производства, возможность автоматизации ТПП в условиях многономенклатурности производственных систем с учетом реальных данных об их технологическом состоянии.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аверченков, А.В., Терехов М.В., Заикин, В.С. Повышение эффективности производства на основе разработки автоматизированной системы планирования производства // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – №2 (12). – С. 49-57.
2. Сулов, А.Г. Управление качеством изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №3 (81). – С. 22-25.
3. Решетникова, Е.П., Бочкарев, П.Ю. Совершенствование системы планирования многономенклатурных технологических процессов обработки деталей на основе комплекса контрольно-измерительных проце-

дур // науч. тр. VI меж. науч. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – 2019. – С. 341-343.

4. Reshetnikova, E.P. Digital transformation of machining workshop's manufacturing system // Journal of Physics: Conference Series. 2021, Vol. 2131(3), P. 032099.

5. Решетникова, Е.П., Бочкарев, П.Ю. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления // Научно-емкие технологии в машиностроении. – 2021. – №3 (117). – С. 19-25.

#### REFERENCES

1. Averchenkov, A.V., Terehov, M.V., Zaikin, V.S. Increasing industrial efficiency based on developing an automated production planning system // Automation and modeling in design and management. 2021, Vol. 2 (12),

PP. 49-57.

2. Suslov, A.G. Engineering product quality control at all stages of product life// Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 3 (81), PP. 22-25.

3. Reshetnikova, E.P., Bochkarev, P.Yu. Improvement of the planning system of multi-nomenclature technological processes of parts processing based on a set of control and measurement procedures // FRITME-2019, Moscow, 2019, PP. 341-343.

4. Reshetnikova, E.P. Digital transformation of machining workshop's manufacturing system // Journal of Physics: Conference Series. 2021, Vol. 2131(3), PP. 032099.

5. Reshetnikova, E.P., Bochkarev, P.Yu. Parts grouping concept of machining production at efficient route formation of engineering process of their manufacturing// Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2021, Vol. 3 (117), PP. 19-25.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.05.2022; одобрена после рецензирования 11.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.

The article was submitted 27.06.2022; approved after reviewing 11.06.2022; assepted for publication 15.06.2022.

