

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9 (159). С.25-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (159). P. 25-32.

Научная статья  
УДК 621.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-25-32

### Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки

**Петр Юрьевич Бочкарев**, д.т.н.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Камышин, Россия  
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии инженерии имени  
Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия  
bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

**Аннотация.** Представлены методические принципы создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов (ТП), направленных на решение таких существующих в настоящее время проблем технологической подготовки механообрабатывающих производств, как субъективный характер принятия проектных решений, недостаточный уровень автоматизации, отсутствие возможности учета складывающейся производственной ситуации. Объективными причинами в необходимости совершенствования подходов к разработке ТП выступают длительный цикл периода технологической подготовки, невысокое качество разрабатываемых технологических процессов, невозможность корректировки ТП на этапе реализации. Описаны основные структурные элементы системы планирования многономенклатурных ТП. На основе системного подхода объединены все этапы работ по технологическому обеспечению производственных систем, что обеспечивает в короткие временные рамки использование информационных массивов данных о реальном состоянии производственной системы и оперативных сведениях о производственных заданиях. Приведены результаты теоретических работ, позволившие описать процесс создания ТП как системы, объединяющей проектирование и реализацию технологии с учетом влияния изменений производственной ситуации. В процессе апробации и использования представленных методических подходов, определены значимые области исследований, без которых получение в полной мере поставленных результатов является затруднительным, что позволило сформировать пути развития системы. Среди них: установление взаимодействия с конструкторской подготовкой производства; детализация данных о исходных заготовках во взаимосвязи с выбором структуры ТП и назначением рационального комплекта технологической оснастки; определение требований к средствам технологического оснащения, ориентированных на обеспечение гибкости их использования; определение корреляционных связей между многовариантным проектированием ТП изготовления деталей и требованиями, предъявляемыми к точностным показателям при сборке изделий. Разработанные формализованные модели выполнения этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств являются предпосылкой полной автоматизации проектирования ТП и обеспечения высокоэффективного функционирования машиностроительных комплексов.

**Ключевые слова:** машиностроительные производства, технологическая подготовка производства, многономенклатурные производственные системы технологические процессы механообработки, системы автоматизированного проектирования

*Для цитирования:* Бочкарев П.Ю. Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 25–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-25-32

## Development of the theory and principles for planning multiproduct manufacturing activity of machining and assembly

**Pyotr Yu. Bochkarev**, D. Eng.  
Kamyshin Technological Institute of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia  
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after  
N.I. Vavilov (Vavilov University), Saratov, Russia  
bpy@mail.ru

**Abstract.** *Instructional guidelines for planning a multiproduct manufacturing activity (MA) for machining and assembly aimed at solving currently existing problems of machining industries process design, i.e. subjectivity of making design decisions, insufficient automation, and inability of the observing of current production situation are presented. The objective reasons for the need to improve approaches to the development of MA are the long cycle of the process design period, the low quality of the processes operation, and the impossibility to adjust MA at the implementation stage. The main structural elements of multiproduct manufacturing activity planning are described. Based on a systematic approach, all stages of work on technological support of production systems are combined, making possible to use the information arrays of data on the real state of the production system and operational information on production tasks in a short time frame. The results of theoretical work provide for the process of making MA as a system that combines the design and implementation of technology, taking into account the impact of changes in the production situation. In the process of approbation and use of the presented methodological approaches, significant areas of research were identified, smoothing away difficulties connected with the performance targets, enabling the development path of the system. Among them: the interaction with the design preparation of production; detailing data on the initial workpieces in connection with the choice of the MA structure and the appointment of a rational set of technological equipment; determining the requirements for technological equipment, focused on ensuring the flexibility of their use; determining the correlations between the multiple-path design of parts manufacturing process and the requirements for accuracy indicators in the assembly of products. The developed formalized models for the implementation of the stages of technological preparation of machining industries are a background for full automation of MA design and highly efficient functionality of machine-building complexes.*

**Keywords:** machine-building industries, technological preparation of production, multiproduct production systems, technological processes of machining, computer-aided design systems

**For citation:** Bochkarev P.Yu. Development of the theory and principles for planning multiproduct manufacturing activity of machining and assembly / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 25–32. doi: 10.30987/2223-4608-2024-25-32

### Введение

Усиленное внимание к формированию базовых научных направлений отечественного машиностроения определяется современными задачами в обеспечении перспектив конкурентоспособности мировым производителям, развития и создания фундаментальных положений, обеспечивающих постоянно нарастающие темпы в создании и высокоэффективном изготовлении высококачественной, надежной и удобной в эксплуатации продукции.

Глобальные критерии эффективности работы производственных систем, связаны с удовлетворением потребности и общественной значимостью изготавливаемых изделий, запросами технической и национальной безопасности государства. В настоящее время они напрямую взаимосвязаны с частотой модернизацией и сменяемостью выпускаемой продукции, быстрым переходом на новый вид и расширением номенклатуры, резкому возрастанию потребности гибкости и эффективного использования функциональных возможностей производственных систем.

Другими определяющими критериями являются экономические показатели, позволяющие спрогнозировать и снизить себестоимость изготовления деталей и изделий [1 – 5]. Они не всегда совпадают с глобальными и в отдельных аспектах несообразны им. В качестве причин этого могут рассматриваться отдельные традиционно используемые методологические положения, заложенные в конструкторско-технологической подготовке и организационном функционировании машиностроительных производств. В связи с этим, одним из важных научных направлений в развитии технологии машиностроения, является совершенствование и создание новых принципиальных подходов к технологической подготовке, отличающихся степенью адаптации принимаемых проектных решений к реалиям внешних и внутренних производственных факторов. Принципиально важной является разработка таких подходов к управлению производственными системами, которые позволяли бы создать автоматизированные системы реализации технологических процессов и представляли бы собой единое целое с системами технологической подготовки производства, обеспечивающих резкое сокращение времени на разработку технологий, учитывающих конкретные особенности отдельной механообрабатывающей системы, и эффективное управление реализацией этих технологий.

### **Материалы и методы**

Анализ особенностей и возможностей современных автоматизированных продуктов для технологической подготовки производства с позиций вышеописанных требований [6 – 10] позволил сформулировать их основные недостатки, такие как субъективный характер принятия проектных решений, низкий уровень автоматизации, отсутствие возможности учета складывающейся производственной ситуации, являющиеся причинами длительного периода технологической подготовки производства, невысокого

качества разрабатываемых технологических процессов, невозможность корректировки ТП на этапе реализации. Следует отметить, что в используемых системах автоматизированного проектирования остаются нерешенными задачи преимущественно высокоинтеллектуального характера, в тоже время являющимися определяющими качество проектных решений. Проектировщику свойственен субъективизм, основанный на его опыте и личностных подходах к решению поставленных задач. Кроме этого физиологические особенности, не позволяют человеку конкурировать с вычислительной техникой по быстродействию и объему обрабатываемой информации, что является объективными причинами в острой необходимости создания формализованных моделей проектных процедур для всех этапов технологической подготовки машиностроительных производств, обеспечивающих в короткие временные рамки с использованием больших информационных массивов данных о реальном состоянии производственной системы и оперативных сведениях о производственных заданиях выполнения всего комплекса технологического обеспечения.

В соответствии с обоснованием требований, предъявляемых технологической подготовки механообрабатывающих производств, предложена концепция системы планирования технологических процессов (ТП), объединяющая на основе системного подхода основные этапы работ по технологическому обеспечению многономенклатурных производственных систем. Выполнена разработка системы на всех уровнях с привлечением методологической базы теории многоуровневых иерархических систем, основные теоретические положениями которой включают:

– создание технологии, охватывающей не только этапы проектирования, но и реализацию ТП и определяющей термином «планирование технологических процессов». Проектирование ТП ведется с учетом характера производства и оперативной возможностью корректировки ТП в

зависимости от изменения производственной ситуации, что во многом предопределяет эффективность работы производственной системы;

– технологию изготовления каждой детали, которая строится с учетом ТП всех деталей, изготавливаемых в производственной системе в рассматриваемый интервал времени. Процесс создания ТП протекает параллельно для всех изготавливаемых деталей с обменом информацией между ними и критериальными оценками, характеризующими эффективную работу производственной системы в целом.

Результаты работ по созданию системы наиболее полно в части развития теоретических исследований представлены в ряде диссертационных работ (рис. 1). Проведенные работы позволили развить методы подготовки и принятия решений на всех этапах технологической подготовки механообрабатывающих производств. В соответствии со сформированными концептуальными положениями, включающими учет технологической совместимости деталей и рациональной реализации процесса изготовления на основе ситуационной перестройки ТП на различных этапах, создаются условия для функционирования производственных систем с наивысшими показателями. Основные, отличительные от традиционных подходов, положения системы планирования многономенклатурных ТП, позволяют создать формализованные модели для всех этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств. Описание базовых математических моделей и методические решения по выполнению указанных проектных процедур, содержатся в следующих работах [11 – 13].

В процессе апробации и использования представленных методических подходов создания системы планирования многономенклатурных ТП выявились значимые области исследований, без которых получение в полной мере поставленных результатов является затруднительным, что позволило сформировать пути развития системы. Среди них:

– установление взаимодействия с конструкторской подготовкой производства;

– решение вопросов детализации информационного обеспечения сведений об исходных заготовках во взаимосвязи с выбором структуры ТП и назначения рационального комплекта технологической оснастки;

– создание требования к средствам технологического оснащения, ориентированных на обеспечение гибкости их использования;

– определение корреляционных связей между многовариантным проектированием ТП изготовления деталей и требованиями, предъявляемыми к точностным показателям при сборке изделий.

Предъявляемые к условиям функционирования современных машиностроительных комплексов требования напрямую связаны с уровнем установления взаимосвязей между конструктивными особенностями деталей и конкретными условиями производства, основанных на обеспечении производственной технологичности изготавливаемых изделий. Разработаны дополнительные количественные показатели производственной технологичности, позволяющие спрогнозировать технико-экономические показатели реализации ТП [14], отражающие: многовариантность при обработке деталей, уровня загрузки технологического оборудования, степень концентрации при формировании структур операций, соблюдения принципов единства и постоянства баз на этапах разработки ТП, однородности используемого технологического оборудования и др. Предложена методика на основе анализа влияния на производительность установления относительных весовых характеристик количественных показателей технологичности, что позволяет в автоматизируемом режиме дать заключение и рекомендации по совершенствованию конструктивных характеристик деталей, сформированной комплектности производственной программы, соответствию состава выбранного технологического обеспечения.

**Бочкарев П.Ю.**

«Совершенствование метода проектирования технологических процессов в ГПС на основе построения системы унифицированных технологических элементов» (к.т.н.)

«Теория и принципы создания системы планирования гибких технологических процессов в условиях многономенклатурных производственных систем механообработки» (д.т.н.)

**Пластинкин А.В.**

«Совершенствование технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе создания методики и автоматизированной подсистемы формирования схем обработки поверхностей деталей типа тел вращения в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

**Кочадаев А.В.**

«Повышение качества проектных решений технологической подготовки многономенклатурных производственных систем механообработки на основе разработки моделей и автоматизированной подсистемы формирования последовательностей коротежей технологических переходов» (к.т.н.)

**Митин С.Г.**

«Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств при проектировании операций фрезерной обработки» (к.т.н.)

«Синтез технологических операций со сложной структурой в многономенклатурных системах механообработки» (к.т.н.)

**Бокова Л.Г.**

«Совершенствование оценивания производственной технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

**Назарьев А.В.**

«Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств на основе учета требований к сборке высокоточных изделий» (к.т.н.)

**Шалунов В.В.**

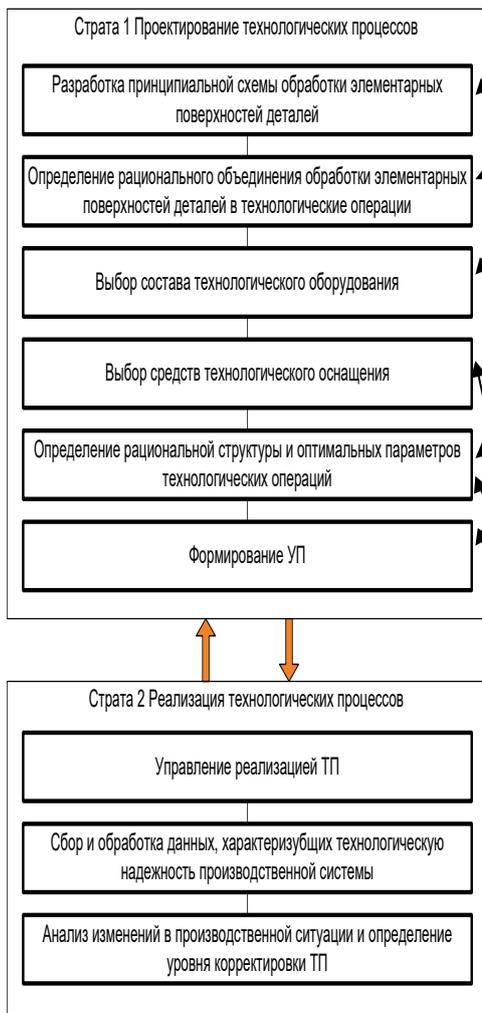
«Разработка методики и автоматизированной подсистемы проектирования технологических операций токарной обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

**Решетникова Е.П.**

«Повышение эффективности изготовления деталей со сложнопольными поверхностями на основе разработки комплекса контрольно-измерительных процедур в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

**Иванов А.А.**

«Разработка моделей и алгоритмов проектных процедур управления производством в системе планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки» (к.т.н.)



**Рис. 1. Планирование многономенклатурных ТП механообработки как система принятия решений**

**Fig. 1. Planning of multiproduct machining centers as a decision-making system**

Для обеспечения разработки рациональных ТП в условиях комплексов с быстроменяющейся производственной ситуацией предложено комплексное решение [15–17], включающее учет реальных, а не усредненных, размерных характеристик заготовок и назначения комплекта контрольно-измерительных средств методом группирования с позиции

Изменение предлагаемой концептуальной ориентации к разработке ТП не может не отразиться на таком аспекте, как исследования вопросов обоснования требований к средствам технического оснащения в условиях функционирования производства по гибкой технологии, оценки уровня принимаемых проектных решений на основе соответствия их свойствам многономенклатурных ТП. Функциональные возможности средств технологического оснащения не должны быть жестко фиксированными, а выбираться в зависимости от обстоятельств.

Разработанные критерии для оценки эффективности вариантов ТП, позволяют определить направления совершенствования технологического оборудования и оснастки, в первую очередь отвечающих характерным особенностям многономенклатурного производства (однородность, устойчивость качества, альтернативность параметров реализации, универсальность, инвариантность и др.). При этом, наиболее актуальным является вопрос поддержки интеллектуальной деятельности проектировщика, особенно в аспекте технического творчества, что обеспечивает нахождение новых, более эффективных технических решений, в том числе на уровне изобретений. Примеры результатов логического построения эволюционных процедур создания новых объектов технического обеспечения ТП, отвечающих условию согласования с критериями используемыми при планировании ТП реализованы в объектах интеллектуальной собственности (патенты № 2059193, 2084327, 1717936, 2210484, 2212979, 2516326, 2807252, 2805690, 2793666, 2801501).

Методологической основой поиска новых технических решений является анализ, который включает процесс изучения структуры, свойств, функций отдельных элементов или объекта в целом с позиций расширения требования гибкости, значение которого в условиях многономенклатурного производства становится преобладающим. Расчет показателей гибкости позволяет дать более объективную и точную оценку. На основе данных о реально действующем производстве показатели обеспечивают выполнение детальных исследований для каждого используемого средства, определение соответствия конструкторской схемы или технологического способа требованиям гибкости и в какой мере.

Для решения проблемы обеспечения качества сборки высокоточных изделий, разработан комплексный подход к технологической подготовке производства, устанавливающей связь между проектными процедурами механообрабатывающего и сборочного производств на основе выбора из множества ТП обработки деталей варианты, учитывающие требования последующей сборки. На основе конструкторского размерного анализа сборочного узла и входящих в него деталей выполняется расчет размерных цепей в координатных направлениях плоскостей с предельными заданными параметрами замыкающих звеньев [18]. Совмещение полученного графа и графа вариантов ТП позволяет представить геометрическую и созданную на ее основе математическую модель. Обеспечивается проведение выбора рационального ТП методом многокритериальной оптимизации с применением генетического алгоритма для определения весовых коэффициентов критериев. В качестве критериев используются: получение максимально возможного числа сборочных комплектов, однородность используемого технологического оборудования, количество технологических операций и переходов для каждого из ТП.

### Заключение

Описан комплексный подход, базирующийся на единой методологической основе и объединяющий все этапы технологической подготовки механообрабатывающих производств, с позиции обеспечения максимальной производительности и эффективности использования возможностей основного оборудования и средств технологического оснащения.

Представлены принципы и методические решения, заложенные при создании системы планирования многономенклатурных ТП, отличительной чертой которых является наличие возможности учета реально складывающейся производственной ситуации и одновременной разработке ТП для комплекта деталей, входящих в заданную программу выпуска.

Сформированы направления развития исследований, включающих совершенствование моделей информационного обеспечения системы, заключающихся в расширенном представлении конструктивных характеристик деталей, параметров технологического оснащения, требований сборочных процессов, и позволяющих выполнять комплекс проектных процедур, анализируя операционные и межоперационные связи разрабатываемых ТП. Разработанные формализованные модели выполнения всей последовательности этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств, включая наиболее трудоемкие и интеллектуально содержательные, открывают перспективу полной автоматизации проектирования ТП с высоким качеством решений и обеспечением высокоэффективного функционирования машиностроительных комплексов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога / под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Базров Б.М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография. М.: КУРС, 2023. 324 с.

3. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
4. **Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И.** Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
5. **Сулов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И.** Фундаментальные основы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Вестник Брянского государственного технического университета. 2020; 2(87). С. 4–10.
6. **He В., Bai К.Ж.** Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Adv. Manuf.* 2021. Vol. 9. P. 1–21.
7. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживаение // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* 2022. № 8 (134). С. 39–48.
8. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2021. № 1 (248). С. 15–18.
9. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access.* 2018. Vol.5. P. 20418–20427.
10. **Chakraborty S., Chowdhury R.** Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // *Journal of Engineering Mechanics.* 2019. Vol. 145. № 12. P. 04019105.
11. **Бочкарёв П.Ю.** Проектирование маршрутов многономенклатурных технологических процессов механообработки. Саратов: Саратов. гос.техн.ун-т, 1996. 104 с.
12. **Бочкарёв П.Ю., Королёв А.В.** Принципы создания системы планирования гибких технологических процессов // *Доклады Российской академии естественных наук.* 1999. № 1. С. 172–184.
13. **Бочкарёв П.Ю.** Системное представление планирования технологических процессов механообработки // *Технология машиностроения.* 2002. № 1. С. 10–14.
14. **Бочкарев П.Ю., Королев Р.Д., Бокова Л.Г.** Расширение информационного обеспечения оценки производственной технологичности изделий // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* 2021. № 9 (123). С. 36–41.
15. **Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Азиков Н.С.** Метод генерации структур технологических операций для оборудования сверлильной группы // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 2. С. 69–74.
16. **Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю.** Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных

процедур в системе автоматизированного планирования производства // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 11 (137). С. 25–31.

17. **Иванов А.А., Бочкарев П.Ю.** Оперативное планирование в многономенклатурном производстве. Методы и алгоритмы взаимодействия: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 с.

18. **Nazariev A.V., Bochkarev P.Y.** Technological support of assembly based on the principles of identifying critical requirements for high-precision products // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024. Т. 24, № 1. С. 66–77.

## REFERENCES

1. *Technologist's handbook / under the general editorship of A.G. Suslov*. М.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.

2. **Bazrov B.M.** The basis of technological preparation of machine-building production: monograph. М.: COURSE, 2023. 324 p.

3. *Handbook of a machine-building technologist*. In 2 vols. Vol.2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin. 6th ed., reprint. and additional. М.: Innovative mechanical engineering, 2018. 818 p.

4. **Vasiliev A.S., Dalsky A.M., Zolotarevsky Y.M., Kondakov A.I.** Directional formation of properties of machine-building products / ed. by A.I. Kondakov. - М.: Mashinostroenie, 2005. 352s.

5. **Suslov A.G., Fedonin O.N., Petreshin D.I.** Fundamental principles of ensuring and improving the quality of mechanical engineering and aerospace engineering products. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2020; 2(87). pp. 4–10.

6. **He B., Bai K.J.** Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Adv. Manuf.* 2021. Vol. 9. P. 1–21.

7. **Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M.** Digitalization of machine-building production: technological preparation, production, tracing // *High-tech technologies in mechanical engineering*. 2022. No. 8 (134). pp. 39–48.

8. **Ingemansson A.R.** The main provisions of the methodology of technological preparation of production and adaptive management in digital production systems for

mechanical processing // *Izvestiya Volgograd State Technical University*. 2021. No. 1 (248). pp. 15–18.

9. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access*. 2018. Vol. 5. P. 20418–20427.

10. **Chakraborty S., Chowdhury R.** Graph-theoretical-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // *Journal of Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 145. No. 12. P. 04019105.

11. **Bochkarev P.Yu.** Designing routes of multi-nomenclature technological processes of machining. Saratov: Sarat. State Technical University Univ., 1996. 104 p.

12. **Bochkarev P.Yu., Korolev A.V.** Principles of creating a planning system for flexible technological processes // *Reports of the Russian Academy of Natural Sciences*. 1999. No. 1. pp.172–184.

13. **Bochkarev P.Yu.** System representation of planning of technological processes of mechanical processing // *Technology of mechanical engineering*. 2002. No. 1. pp.10–14.

14. **Bochkarev P.Yu., Korolev R.D., Bokova L.G.** Expansion of information support for assessing the production manufacturability of products // *High-tech technologies in mechanical engineering*. 2021. No. 9(123). P. 36–41.

15. **Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Azikov N.S.** Method of generating structures of technological operations for drilling group equipment // *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2018. No. 2. pp. 69–74.

16. **Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu.** Principles of formation of a complex of control and measuring procedures in the automated production planning system // *High-tech technologies in mechanical engineering*. 2022. No. 11 (137). pp. 25–31.

17. **Ivanov A.A., Bochkarev P.Y.** Operational planning in multi-nomenclature production. Methods and algorithms of interaction: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 p.

18. **Nazariev A.V., Bochkarev P.Y.** Technological support of assembly based on the principles of identifying critical requirements for high-precision products // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024. Vol. 24, No. 1. pp. 66–77.

Статья поступила в редакцию 14.04.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 14.04.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 23.04.2024.