
**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
ПОСВЯЩЕННЫЙ ПАМЯТИ Е. И. ЯБЛОЧНИКОВА**
SPECIAL ISSUE DEDICATED TO THE MEMORY OF E. I. YABLOCHNIKOV

УДК 65.01:621.9:658.5:65.011.56:004.9
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

К. П. Помпеев¹, О. С. Тимофеева^{1*}, Е. И. Яблочников¹, Е. Е. Волосатова²

¹ *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
**olga2957869@mail.ru*

² *Техприбор, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Рассматриваются вопросы информационной интеграции конструкторской и технологической подготовки производства. Предложена методика построения 3D-моделей деталей, основанная на использовании унифицированных и типовых конструктивно-технологических элементов с учетом их структурных уровней. Применение методики облегчает возможность трансформации моделей при решении технологических задач, в том числе для построения моделей операционных заготовок, расчета технологических размеров, разработки управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением. Предлагаемая методика наиболее эффективна при внедрении в производство многооперационных цифровых технологических процессов.

Ключевые слова: конструкторская подготовка производства, технологическая подготовка производства, единое информационное пространство, жизненный цикл изделия, цифровая модель изделия, 3D-модель детали, технологический процесс, 3D-модель операционной заготовки, станок с ЧПУ

Ссылка для цитирования: Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И., Волосатова Е. Е. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 7—15. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.

**AUTOMATED DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION
IN THE CONDITIONS
OF DIGITAL PRODUCTION**

K. P. Pompeev¹, O. S. Timofeeva^{1*}, E. I. Yablochnikov¹, E. E. Volosatova²

¹ *ITMO University, St. Petersburg, Russia*
olga2957869@mail.ru

² *JSC Techpribor, St. Petersburg, Russia*

Abstract. The problems of information integration of design and technological preparation of production are considered. A technique for constructing 3D models of parts based on the use of unified and standard structural and technological elements with the account of their structural levels and directed formation of each part model, is described. Application of the proposed methodology facilitates the possibility of transforming models when solving technological problems, including for construction of operational blanks models, calculating technological dimensions, and developing control programs for equipment with numerical control. The described method is most effective when introducing multi-operational digital technological processes into production.

Keywords: design preparation of production, technological preparation of production, unified information space, product life cycle, digital model of a product, 3D model of a part, technological process, 3D model of an operational workpiece, CNC machine

© Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И., Волосатова Е. Е., 2023

For citation: Pompeev K. P., Timofeeva O. S., Yablochnikov E. I., Volosatova E. E. Automated design and technological preparation in the conditions of digital production. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 1. P. 7—15 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-7-15.

Введение. Один из важнейших этапов жизненного цикла изделий — технологическая подготовка производства (ТПП). Службы предприятия, отвечающие за процесс ТПП, являются связующим звеном между конструкторскими и производственными подразделениями. Трехмерные модели изделий служат в данном случае средством интеграции специалистов различных подразделений.

На промышленных предприятиях достаточно обширна практика использования различных систем трехмерного моделирования. Переход на единую цифровую платформу требует значительных инвестиций и массового переобучения персонала. Поэтому основным направлением повышения эффективности интегрированных бизнес-процессов, использующих трехмерные модели, является создание методик и способов работы с такими моделями в разнородной среде.

Процессы проектирования, производства и контроля внутри предприятия могут быть организованы с использованием трехмерных моделей, аннотации которых содержат все необходимые технологические и технические требования. Решение этой задачи позволит кардинально сократить длительность производственных процессов и обеспечить лучшую готовность предприятия к использованию систем моделирования технологических процессов (ТП) и новых производственных технологий, в том числе аддитивных.

Цифровая модель изделия как основа организации и совершенствования конструкторско-технологической подготовки производства. Одним из важнейших направлений развития современной экономической модели является „цифровизация“ производственных и технологических процессов в различных отраслях промышленности. Переход к модели цифровой экономики связан с появлением такой важной ее составляющей, как „цифровое производство“ [1, 2], где центральную роль играет цифровая модель изделия совместно с моделями сборочных единиц (узлов) и деталей на всех этапах жизненного цикла изделий, для информационной интеграции которых используются PDM-системы [3].

В настоящее время активно рассматривается вопрос организации цифрового производства как множества взаимодействующих киберфизических систем (КФС) [1, 4]. Одной из таких систем является цифровой двойник операционной заготовки (ОЗ), который должен определять последующий производственный ресурс для обработки с учетом текущего состояния производственной системы. Таким образом, 3D-модель ОЗ будет играть главную интегрирующую роль при подготовке и организации производства (рис. 1).

Увеличение длительности процесса ТПП и снижение его качества происходит из-за низкой интеграции в работе конструкторов и технологов на уровне передачи и использования 3D-моделей. Обеспечить повышение интеграции можно при условии создания конструкторами 3D-моделей деталей с использованием принципов и методики, описанных в [5]. Повысить же качество работы технологов позволит применение методики создания перестраиваемых 3D-моделей ОЗ для многооперационных ТП [2]. При этом технолог-программист для разработки управляющих программ будет использовать переданные ему 3D-модели ОЗ, описывающие состояние изделия на входе проектируемой операции и на ее выходе. Основные задачи технолога в этом случае — выбор/определение режущего инструмента (в том числе, его материала) для обеспечения производительности при предварительной обработке заготовки [6—8] либо точности и шероховатости поверхностей, формируемых в результате окончательной обработки [9—14], а также определение структуры операции и режимов резания [6, 8, 15].



Рис. 1

Принципы создания 3D-моделей деталей на этапе конструкторской подготовки производства. В современных условиях исходной информацией для проектирования маршрутной технологии является конструкторская аннотированная 3D-модель изготавливаемой детали, которая может передаваться конструктором технологу через прямой интерфейс или обменные файлы в одном из стандартных форматов (igs, stp, dxf, dwg и др.).

3D-модель детали целесообразно конструировать из унифицированных и типовых элементов. Каждый конструктивный элемент (КЭ) имеет определенное назначение и набор параметров, характеристик и свойств, от сочетания которых зависит тот или иной способ его производства. При этом конструктору следует учитывать технологичность КЭ и возможность его изготовления в действующем производстве. Следовательно, можно уже говорить о конструктивно-технологических элементах, из которых следует конструировать 3D-модель детали.

При использовании технологом конструкторской 3D-модели детали могут возникать сложности ее трансформации в множество 3D-моделей ОЗ, вызванные одной из следующих причин:

а) конструкторская 3D-модель детали, переданная через обменный файл в одном из стандартных форматов, воспринимается САД-системой как единое целое без дерева построения;

б) конструкторская 3D-модель детали передана технологу через прямой интерфейс вместе с деревом ее построения, однако конструктором при проектировании не предусмотрена возможность такой трансформации.

Согласно [5, 16, 17] только при последовательном построении 3D-моделей деталей любого типа из простых унифицированных и типовых конструктивных элементов появляется возможность независимого управления их параметрами в ходе конструкторско-технологической подготовки производства. Следовательно, 3D-модели деталей должны быть разработаны конструктором с учетом следующих условий:

- возможность декомпозиции детали на элементы;
- возможность корректировки параметров отдельных элементов;
- строгая направленность формирования структуры детали из конструктивных элементов.

Это позволит сократить трудоемкость процессов трансформации и корректировки 3D-модели в соответствии с разработанной последовательностью технологического процесса ее изготовления „от детали к исходной заготовке“.

Согласно системному подходу [18], в структуре деталей типа тел вращения целесообразно выделить элементы вращения I, II и III уровней и плоскостные элементы, их ограничивающие [5]. Разделение элементов по уровням связано с учетом таких конструктивно-технологических признаков, как геометрическая характеристика элементов; топологическая связь элементов (положение, сопряжение, пересечение); заранее установленная последовательность формирования элементов в ходе изготовления детали.

Элемент вращения (ЭВ) условно обозначается как $ЭВ_n^N$, где N — номер уровня (I, II или III), n — порядковый номер элемента вращения внутри каждого уровня. Так, элементами I уровня являются наружные и внутренние цилиндрические поверхности деталей, открытые с одной или двух сторон и имеющие общую ось вращения — ось вращения детали. К элементам II уровня относятся поверхности деталей, которые топологически пересекаются или объединяются с элементами I уровня и имеют с ними общую ось вращения, — к ним относятся фаски, канавки, конусы, резьбы и пр. Остальные поверхности деталей являются элементами III уровня.

Система координат XYZ при „нулевом“ положении пространства построения модели является глобальной, от нее должно начинаться построение модели детали. Остальные системы координат, используемые для построения отдельных конструктивных элементов, локальные.

Разработку 3D-моделей деталей типа тел вращения в САД-системе следует проводить с соблюдением указанных ниже принципов.

1. Использование функций твердотельного моделирования для создания конструктивных элементов 3D-модели детали.

2. Соответствие приоритета создания элементов 3D-модели детали их уровню.

3. Строго определенное направление создания элементов детали — слева направо (снизу вверх) от главной плоскости XOY.

4. Плоскость эскиза для создания последующего элемента I уровня — смежная грань предыдущего элемента I уровня.

5. Создание групп элементов II или III уровня с использованием функции копирования эскизов.

Общий алгоритм построения 3D-моделей деталей типа тел вращения можно представить последовательностью:

— создание наружных элементов I уровня;

— создание внутренних элементов I уровня;

— создание элементов II уровня, расположенных на элементах I уровня;

— создание необходимых локальных систем координат и плоскостей, определяющих расположение элементов III уровня;

— создание элементов III уровня, расположенных на элементах I уровня;

— аннотирование 3D-модели детали.

Перечисленные принципы и представленный алгоритм построения 3D-моделей деталей типа тел вращения являются основой для автоматизации самого процесса моделирования и позволяют разработать такую модель детали, в которой можно управлять параметрами каждого отдельного КЭ при трансформации этой модели.

Методика построения 3D-модели детали. На основании представленных выше принципов и алгоритма была разработана методика построения 3D-модели.

1. Построение ряда вспомогательных плоскостей для моделирования наружной конфигурации детали, начиная от глобальной системы координат. Расположение плоскостей друг относительно друга должно соответствовать требуемой структуре конструкторских размеров.

2. Последовательное построение элементов детали путем добавления материала выдавливанием до соответствующих вспомогательных плоскостей.

3. Построение ряда вспомогательных плоскостей для моделирования внутренней конфигурации детали.

4. Последовательное построение внутренних элементов I уровня посредством удаления материала выдавливанием.

5. Последовательное построение слева направо элементов II уровня: сначала на наружных элементах I уровня, а затем на внутренних.

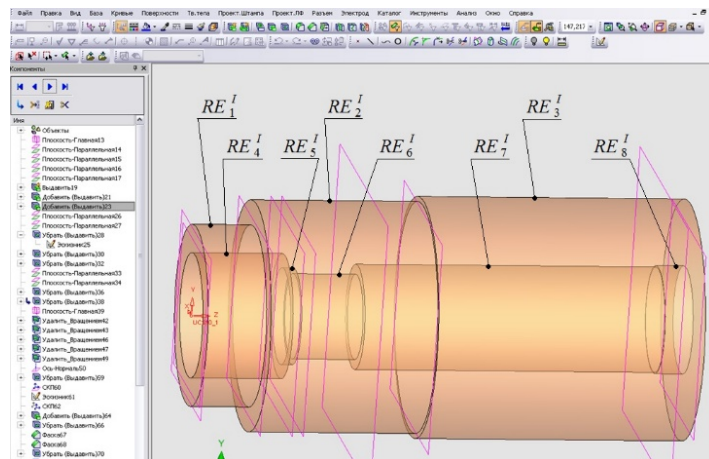
6. Построение необходимых локальных систем координат и вспомогательных плоскостей, определяющих расположение элементов III уровня.

7. Последовательное построение слева направо элементов III уровня: сначала на наружных элементах первого уровня, а затем на внутренних.

8. Аннотирование 3D-модели детали.

Данную методику авторы назвали „методикой направленного построения 3D-моделей деталей“. Для ее иллюстрации построена 3D-модель детали „корпус“ в CAD-модуле системы Cimatron. Использование вспомогательных плоскостей в качестве ссылки при построении модели дает возможность легко перестроить ее, если необходимо изменить структуру линейных размеров детали. Результат построения наружных и внутренних элементов I уровня (RE_{1-8}^I) приведен на рис. 2, а, а элементов II уровня — на рис. 2, б.

а)



б)

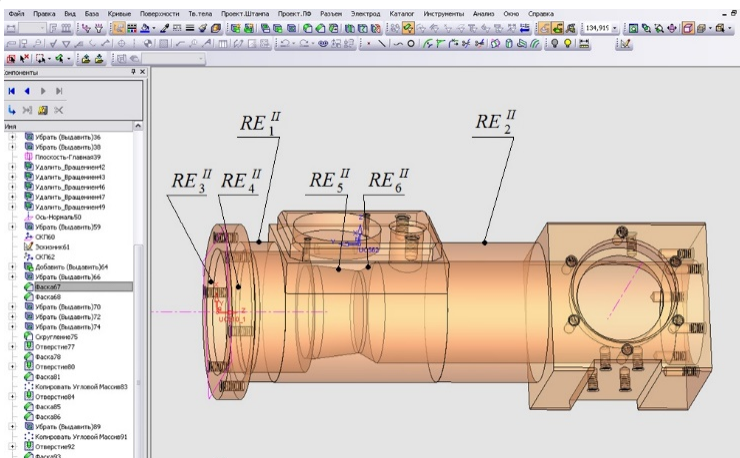


Рис. 2

Для построения элементов III уровня потребуется создание локальных систем координат, которые можно использовать при разработке управляющих программ в САМ-системе. Строго определенная направленность и очередность создания 3D-модели детали из унифицированных и

типовых КЭ позволяет формализовать процесс построения 3D-моделей и тем самым создать предпосылки для его автоматизации путем разработки программ их автоматического построения в CAD/CAM-системах средствами API (Application Programming Interface).

Предлагаемая методика построения 3D-моделей деталей типа тел вращения (которая, в сущности, применима к созданию 3D-моделей деталей, не являющихся телами вращения) позволяет конструктору создавать 3D-модели, пригодные для дальнейшего использования технологами, в частности для создания 3D-моделей ОЗ [2, 19, 20]. Также 3D-модели ОЗ и операционные эскизы или аннотированные 3D-модели ОЗ соответствующих операций передаются специалисту по программированию работы координатно-измерительной машины. Разработка программ измерений проводится по номиналам технологических размеров, указанных в операционных эскизах или в аннотациях 3D-моделей ОЗ. Предлагаемая методика позволяет технологу эффективно использовать 3D-модели ОЗ для различных целей, что существенно экономит рабочее время.

Принципы и методика построения 3D-моделей ОЗ с учетом результатов предварительно проведенного размерного анализа проектируемого ТП описаны в [2], а методика синтеза размерных схем ТП представлена в [18, 21, 22]. При этом автоматизированный расчет технологических линейных размерных цепей проводится на max-min по методу полной взаимозаменяемости [18], что позволяет:

- гарантировать обеспечение точности размеров и технических требований;
- исключить вероятность получения неисправимого брака;
- исключить или существенно снизить влияние человеческого фактора на качество изготовления деталей.

На рис. 3 перечислено множество моделей ОЗ в их логической последовательности согласно технологическому процессу. Для одной из операций ТП представлены модели ОЗ до выполнения операции (полупрозрачный вид) и после нее. Выбор двух последовательных моделей из перечня позволяет разработчику управляющей программы определить исходное и конечное (промежуточное) состояния заготовки.

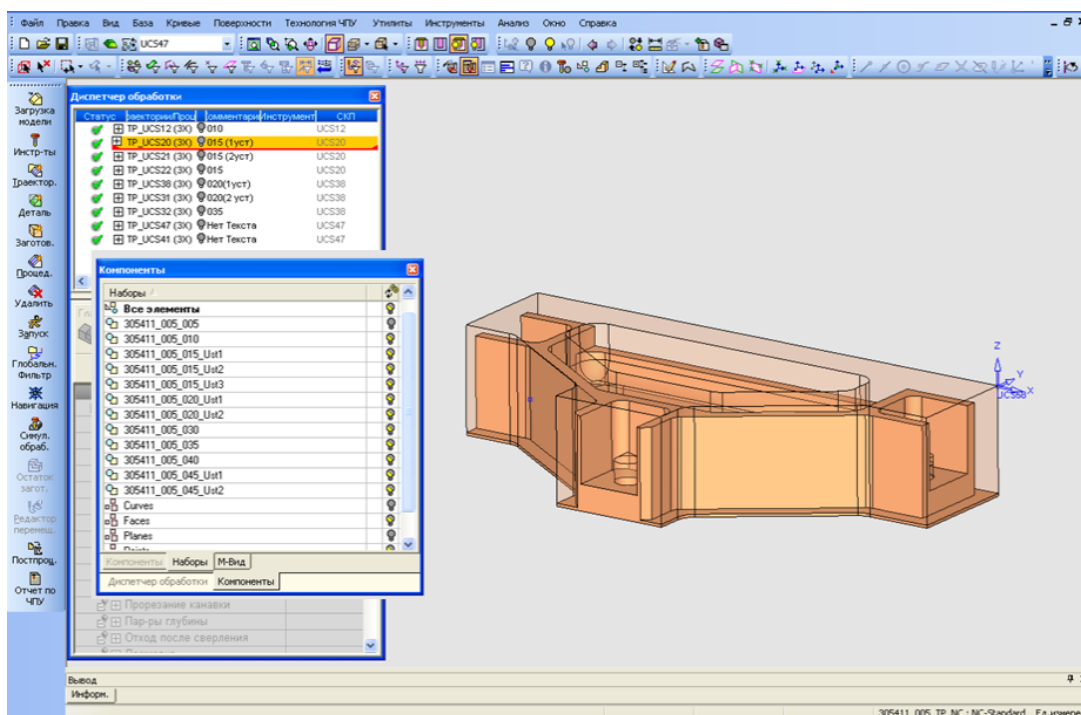


Рис. 3

Практическое использование описанной в [2] методики проектирования операций на станках с ЧПУ показало, что время разработки операций средней сложности, в которых задействовано 5...7 режущих инструментов, сокращается с 1,5...2 до 0,5 ч.

Заключение. Цифровая 3D-модель детали, с одной стороны, является информационным объектом в процессах проектирования и производства, а с другой — ключевым объектом для эффективной интеграции деятельности разных специалистов.

Цифровая 3D-модель детали может быть представлена в разных форматах и соответственно использоваться в различных САПР ТП, CAD/CAM/CAE- и PDM-системах, системах верификации для осуществления различных преобразований. В ходе таких преобразований создаются цифровые модели операционных заготовок, которые имеют непосредственную связь с цифровыми моделями оснастки и инструмента. При этом создается большой объем технологических данных, разрабатываются различные модели объектов и процессов, формируется информация о ресурсообеспечении. Таким образом, формируется цифровой технологический процесс, состоящий из цифровых моделей детали (изделия), операционных заготовок и связанных с ними технологической оснастки и инструмента. Кроме того, цифровой технологический процесс включает совокупность управляющих программ обработки заготовок и программ измерений. Это согласуется с концепцией построения „умного производства“, реализация которой связана с требованиями повышения уровня автоматизации, коммуникаций в производственной системе, ухода человека от рутины в область инженерного творчества и др. Для этого требуется более детально разрабатывать модели и процессы на основе унификации и стандартизации. Формируемая на этапе конструкторской подготовки производства цифровая модель детали рассматривается с точки зрения интеграции работы конструкторов, технологов и контролеров. Предложенная методика построения 3D-моделей деталей наиболее эффективна при внедрении в производство многооперационных цифровых технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*. Berlin: VDE Verlag, 2017. 302 s.
2. Помпеев К. П., Абрамян К. В., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Технологическая подготовка производства деталей на станках с ЧПУ с использованием перестраиваемых 3D-моделей операционных заготовок // *Металлообработка*. 2020. № 4(118). С 50—59. DOI: 10.25960/мо.2020.4.50.
3. ZuMin Wang, AiLing Wang, Wei Liu. PDM system study based on web // *Mech. Manage. Develop.* 2004. N 02. P. 72—73.
4. Абрамян К. В., Помпеев К. П., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Применение систем моделирования при формировании инженерных компетенций в области цифрового производства // *Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф.* СПб: Политех-пресс, 2019. С. 3—14.
5. Принципы разработки трехмерных моделей деталей вращения для их использования в технологическом проектировании / В. И. Аверченков, К. П. Помпеев, Л. В. Одинцова, В. К. Лопарев // *Информационные технологии на транспорте: Сб. науч. тр.* СПб: Политехника, 2003. С. 3—11.
6. Mavliutov A. R., Zlotnikov E. G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. N 327(4). P. 042069.
7. Maksarov V., Khalimonenko A. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // *Intern. Review of Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 12, iss. 5. P. 437—441.
8. Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism // *CMES — Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2018. Vol. 116, iss. 3. P. 365—389.
9. Das S. R., Panda A., Dhupal D. Analysis of surface roughness in hard turning with coated ceramic inserts: Cutting parameters effects, prediction model, cutting conditions optimization and cost analysis // *Ciencia e Tecnica Vitivinicola*. 2017. Vol. 32. P. 127—154.
10. Bezyazychny V. F., Sutyagin A. N., Bolotein A. N. Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. N 194(2). P. 022005.

11. *Joshi V., Kumar H.* Optimization of CNC Lathe Turning: A Review of Technique, Parameter and Outcome // *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Singapore, 2021. P. 963—973.
12. *Kovač P.* et al. Modelling and Optimization of Surface Roughness Parameters of Stainless Steel by Artificial Intelligence Methods // *Proc. of the Intern. Symp. for Production Research (ISPR). Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham, 2019. P. 3—12.
13. *Jha H., Panpalia A., Suneja D., Ashpilya G., Kumar H., Gautam V.* () Estimation of Surface Roughness in Turning Operations Using Multivariate Polynomial Regression // *Advances in Industrial and Production Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Singapore, 2021. P. 947—957.
14. *Andreev Y. S., Isaev R. M., Lubiviy A. V.* Improvement of piezoelectric vibration sensors' performance characteristics via optimization of details' functional surfaces roughness // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2018. Vol. 1015. P. 052010.
15. *Jamaludin Z., Shamshol Ali N. A., Rafan N. A., Abdullah L.* Effect of Cutting Forces on Surface Roughness for Varying Depth of Cut and Feed Rates in Milling Machining Process // *Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SympoSIMM. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Singapore, 2019. P. 195—203.
16. *Бабанин В. С.* Методика создания конструкторско-технологической модели детали в среде CAD-системы // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2014. Т. 57, № 8. С. 21—25.
17. *Chlebus E., Krot K.* CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes // *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2016. Vol. 16, iss. 1. P. 20—29. DOI: 10.1016/j.acme.2015.09.008.
18. *Валетов В. А., Помпеев К. П.* Технология приборостроения: Учеб. пособие СПб: СПбГУ ИТМО, 2013. 234 с.
19. *Бабанин В. С.* Параметрическое моделирование операционных заготовок // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“.* СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 577—584.
20. *Kulikov D., Yablochnikov E., Vostropyatov A., Arnst A.* Method of automated design of operating the workpieces in a CAD system environment // *IEEE 15th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN).* 2017. P. 96—102. DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104753.
21. *Pompeev K. P., Pleshkov A. A., Borbotko V. A.* Interactive Synthesis of Technological Dimensional Schemes // *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* 2021. P. 122—135.
22. *Помпеев К. П.* Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“.* СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 600—609.

Сведения об авторах

Кирилл Павлович Помпеев

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: kir-pom@mail.ru

Ольга Сергеевна Тимофеева

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: olga2957869@mail.ru

Евгений Иванович Яблочников

— канд. техн. наук, доцент

Елена Евгеньевна Волосатова

— Техприбор, бюро CAD/CAM-технологий; начальник бюро; E-mail: ee.volosatova@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 30.11.2022.

REFERENCES

1. Manzei C., Schleupner L., Heinze R. *Industrie 4.0 im internationalen Kontext*, Berlin, VDE VERLAG, 2017, 302 s.
2. Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Metalloobrabotka*, 2020, no. 4(118), pp. 50—59, DOI 10.25960/mo.2020.4.50. (in Russ.)
3. ZuMin Wang, AiLing Wang, Wei Liu, *Mech. Manage. Develop.*, 2004, no. 02, pp. 72—73.
4. Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. *Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye: materialy* (Modern Engineering: Science and Education), Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2019, pp. 3—14. (in Russ.)
5. Averchenkov V.I., Pompeev K.P., Odintsova L.V., Loparev V.K. *Informatsionnyye tekhnologii na transporte* (Information Technology in Transport), Collection of scientific papers, St. Petersburg, 2003, pp. 3—11. (in Russ.)

6. Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 4(327), pp. 042069.
7. Maksarov V., Khalimonenko A. *International Review of Mechanical Engineering*, 2018, no. 5(12), pp. 437–441.
8. Yang Y. *CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2018, no. 3(116), pp. 365–389.
9. Das S.R., Panda A., Dhupal D. *Ciencia e Tecnica Vitivinicola*, 2017, vol. 32, pp. 127–154.
10. Bezyazychny V.F., Sutyagin A.N., Bolotein A.N. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 2(194), pp. 022005.
11. Joshi V., Kumar H. *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2021, pp. 963–973.
12. Kovač P. et al. *Proceedings of the International Symposium for Production Research, ISPR 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, 2020, pp. 3–12.
13. Jha H., Panpalia A., Suneja D., Ashpilya G., Kumar H., Gautam V. *Advances in Industrial and Production Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2021, pp. 947–957.
14. Andreev Y.S., Isaev R.M., Lubiviy A.V. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, pp. 052010.
15. Jamaludin Z., Shamshol Ali N.A., Rafan N.A., Abdullah L. *Intelligent Manufacturing and Mechatronics. SympoSIMM 2019, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Singapore, 2020, pp. 195–203.
16. Babanin V.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8, pp. 21–25. (in Russ.)
17. Chlebus E., Krot K. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, no. 1(16), pp. 20–29, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>.
18. Valetov V.A., Pompeev K.P. *Tekhnologiya priborostroyeniya (Instrumentation Technology)*, St. Petersburg, 2013, 234 p. (in Russ.)
19. Babanin V.S. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye (Modern Mechanical Engineering. Science and Education)*, Materials of the Third International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 577–584. (in Russ.)
20. Kulikov D., Yablochnikov E., Vostropyatov A., Arnst A. *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2017, pp. 96–102, DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104753.
21. Pompeev K.P., Pleshkov A.A., Borbotko V.A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 122–135.
22. Pompeev K.P. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye (Modern Mechanical Engineering. Science and Education)*, Materials of the Third International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 600–609. (in Russ.)

Data on authors

Kirill P. Pompeev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: kir-pom@mail.ru
Olga S. Timofeeva	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: olga2957869@mail.ru
Evgeny I. Yablochnikov	—	PhD, Associate Professor
Elena E. Volosatova	—	JSC Techpribor, CAD/CAM Technologies Bureau; Head of the Bureau; E-mail: ee.volosatova@gmail.com

Received 22.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 30.11.2022.