

УДК 621:658.512.4:004.9:004.418

doi:10.18720/SPBPU/2/id-169

К.П. Помпеев<sup>1</sup>, М.К. Тимофеев<sup>2</sup>

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ТП ПО ЭЛЕМЕНТАМ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕТАЛИ ИЗ ПРОКАТА**



<sup>1</sup>Кирилл Павлович Помпеев,  
Университет ИТМО  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru



<sup>2</sup>Михаил Кириллович Тимофеев,  
Университет ИТМО  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: +79313481842, E-mail: timofeev.mixail.0@mail.ru.

### **Аннотация**

В работе рассмотрены вопросы автоматизации построения схем биений в рамках технологической подготовки производства деталей типа тел вращения. Описан разработанный программный комплекс, реализующий интерактивный синтез схем с учётом операций, установов и требований взаимного расположения поверхностей. Программный комплекс был апробирован на примере конкретной детали. Внедрение предлагаемого подхода позволяет не только сократить временные затраты на проектирование, но и повысить точность технологических решений благодаря снижению влияния человеческого фактора [1-3], что непосредственно сказывается на точности изготовления деталей [3-5]. Применение графовых моделей и алгоритмических расчётов подтверждено как в отечественной, так и в зарубежной литературе [3, 6-9].

*Ключевые слова:* биение, цифровое производство, припуски, требования взаимного расположения, автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства.

## Введение

Современная цифровизация производственных процессов и развитие концепции Индустрии 4.0 ставят задачу повышения точности проектирования технологических процессов в центр внимания [9, 10], обеспечивающих такие параметры качества, как производительность [11-13], точность размеров [1, 3, 5, 6], шероховатость поверхностей [14-16] и требования их взаимного расположения [1, 6, 17, 18]. Одним из критически важных этапов в разработке технологических маршрутов является построение схем биений, что существенно влияет на итоговую точность изготовления осесимметричных деталей. Традиционные методы построения размерных схем, как правило, требуют высокой квалификации технолога и сопряжены с риском ошибок, что приводит к завышенным припускам и дополнительным затратам [3, 5].

Несколько исследований, в том числе работы [1, 17, 18], подтверждают необходимость автоматизации процессов при проведении размерно-точностного анализа и синтеза биений. Внедрение компьютеризированных методов, таких как использование графовых моделей для анализа технических параметров, позволяет эффективно решать задачи оптимизации технологической подготовки [13, 20]. Цель данной работы связана с разработкой программного комплекса, реализующего интерактивный синтез схем биений, с целью ускорения проектирования и повышения точности технологических решений. Для решения указанных задач, связанных с автоматизацией построения и расчёта схем биений с учётом операций, установов, типов поверхностей и параметров припусков были сформированы следующие основные требования к системе:

- Обеспечить интерактивный ввод технологической информации: загрузка эскиза детали и поэтапное добавление данных об операциях и поверхностях.
- Реализовать автоматизированную визуализацию схемы биений и УНП по мере ввода данных.
- Выполнить расчёт удвоенных неравномерностей припусков (УНП) для учёта остаточных биений на переходах [3, 17].
- Автоматически формировать требования взаимного расположения поверхностей (ТВР) в соответствии с данными чертежа.
- Интегрировать расчет биений на каждом установе и выдачу числовых результатов для последующего анализа.

## Методы

В качестве теоретической основы использовалась методика размерноточностного анализа ТП по деталям типа тела вращения, разработанная в СЗТУ [3], сущность которой заключается в том, что специальным образом подготовленный эскиз детали с учетом припусков на обработку ее поверхностей используется для построения схемы биений поверхностей заготовки, возникающих в ходе выполнения ТП ее обработки. Векторы биений, возникающих на каждой операции (каждом установе) ТП строятся в определенной последовательности.

При наличии исходной штампованной или литой заготовки на схеме указывают векторы биений ее поверхностей. Далее для каждой механообрабатывающей операции (установа) строят вектор биения базовой поверхности, а за ним векторы биений наружных и внутренних поверхностей заготовки до и после их обработки с указанием удвоенной неравномерности припуска (УНП). В конце схемы указывают векторы заданных конструктором требований взаимного расположения (ТВР) поверхностей, выполнение которых следует проверить.

После формирования схемы биений проводят их расчет в зависимости от их функций по формулам, указанным в [3, 17], и с использованием справочных данных, приведенных в [3, 6, 17, 19], а также осуществляют проверку возможности обеспечения ТВР.

Если ТВР не могут быть выполнены, то проводят корректировку параметров, влияющих на величины рассчитываемых биений. Такими параметрами являются: точность базовой поверхности; класс точности приспособления и/или его тип [2]. Либо корректируют структуру самого ТП – структуру операций и последовательность их выполнения. Корректировку проводят до тех пор, пока не будет получен удовлетворительный результат, либо будет установлено, что по рассматриваемому ТП ТВР не могут быть обеспечены автоматически, то есть для их обеспечения нужна выверка заготовки на операциях ТП.

Если ТВР могут быть обеспечены автоматически без выверки заготовки (или с использованием ее выверки) проводится расчет УНП, величины которых используются при расчете промежуточных диаметральных размеров поверхностей табличным методом, представленным в [3, 17].

## Результаты

Разработанный программный комплекс был протестирован на примере осесимметричной детали — «Крышка под клапан», эскиз которой представлен на рисунке 1.

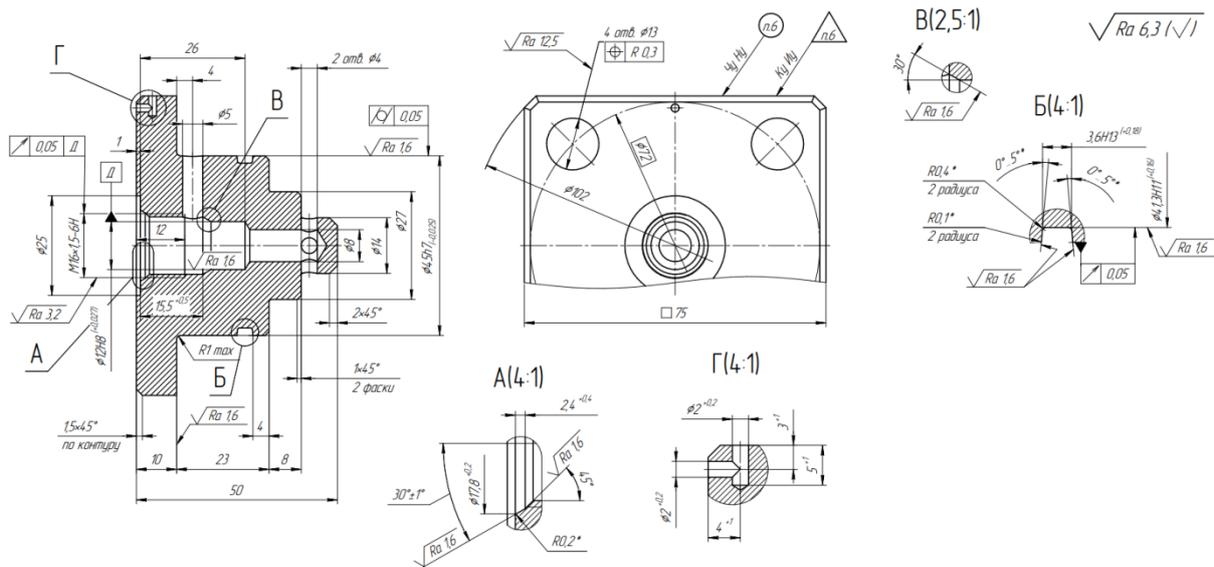


Рис. 1. Эскиз детали «Крышка под клапан»

Система позволяет поэтапно построить схему биений и провести расчет биений и припусков, начиная от исходной заготовки до финального состояния поверхности, требуемого по чертежу. Тестирование комплекса показало его эффективность по сравнению с традиционными методами – как по точности, так и по скорости выполнения операций.

Функциональность комплекса базируется на реализованном алгоритме, представленном на рисунке 2, обеспечивающем автоматизацию построения схем биений и последовательное выполнение всех этапов ТП. Алгоритм включает следующие ключевые этапы:

**1. Загрузка эскиза.** На первом этапе пользователь загружает заранее подготовленный эскиз детали. Как правило, это JSON-файл, содержащий информацию о геометрии осесимметричной детали. После загрузки программа автоматически масштабирует изображение: сжимает его по оси X и растягивает по оси Y. Это делается для того, чтобы условные горизонтальные линии, соответствующие разным поверхностям, не перекрывали друг друга на финальной схеме биений, облегчая визуальное восприятие и анализ.

**2. Задание номеров поверхностям.** После отображения эскиза пользователь последовательно указывает номера поверхностей. Нумерация необходима для корректного связывания поверхностей с технологическими операциями, установками, а также для построения требований взаимного расположения (ТВР) и расчета биений.

**3. Добавление операций.** Каждая операция представляет собой отдельный этап обработки заготовки (например, токарная, сверлильная и др.). Пользователь добавляет новую операцию, указывает её номер, вид,

тип приспособления и его класс точности. На этом этапе создаётся логическая структура будущей схемы биений.

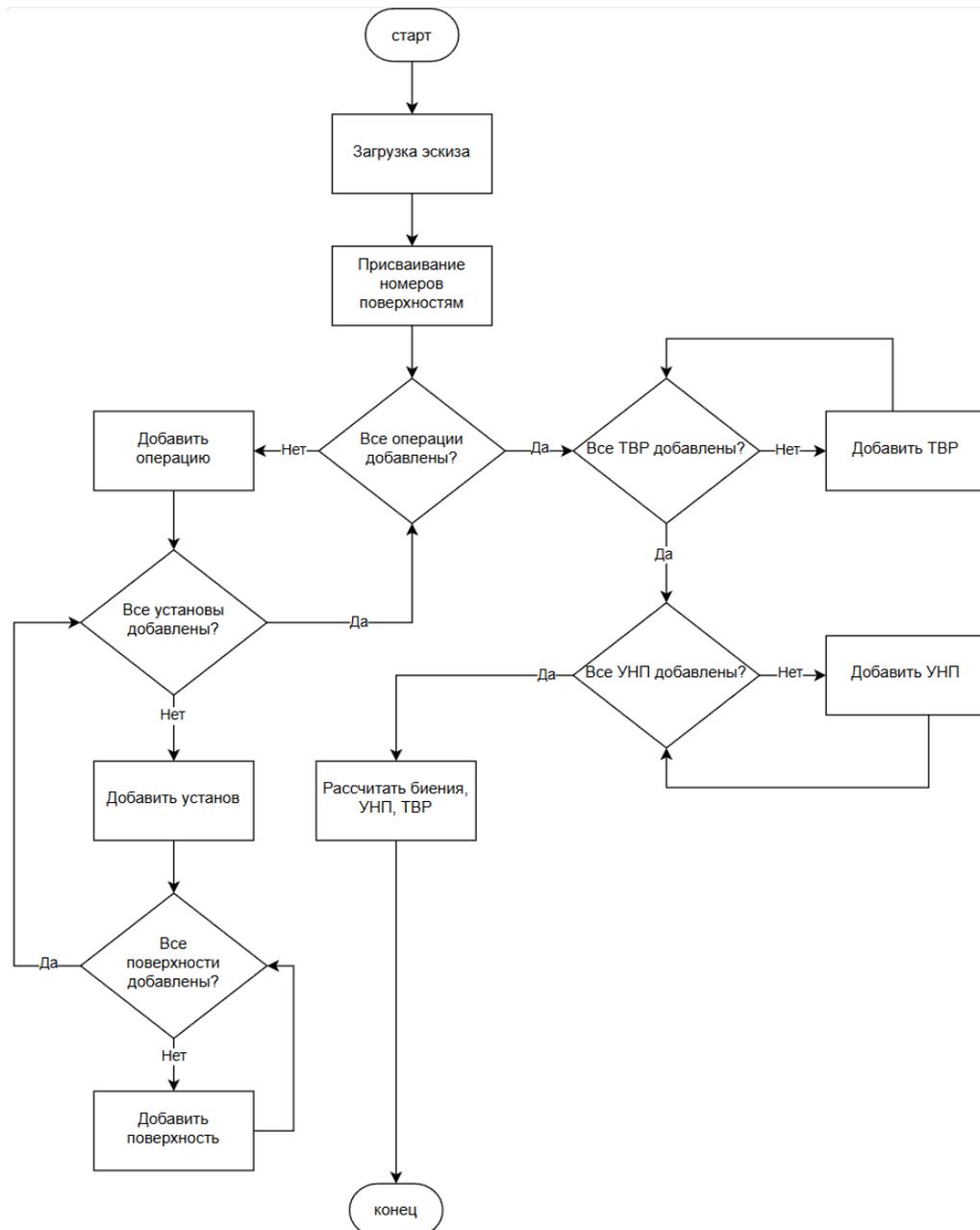


Рис. 2. Алгоритм построения схемы биений

**4. Добавление установов.** Добавление информации об установе необходимо для дальнейшего определения способа закрепления заготовки на нем.

**5. Добавление поверхностей.** Следующим шагом является привязка конкретных поверхностей к каждой операции: указываются базовые, обрабатываемые и обработанные элементы. Программа требует от пользователя указать функцию поверхности (база, обрабатываемая, обработанная) и её тип (вал, отверстие), а для базовой поверхности

указываем дополнительно предполагаемый номинальный размер, верхнее и нижнее отклонения, длину участка, неиспользуемого для базирования заготовки на операции.

**6. Добавление ТВР.** После задания всех поверхностей пользователь переходит к построению требований взаимного расположения. Это связи между базовыми и зависимыми поверхностями, которые задаются либо конструкторской документацией, либо при необходимости технологом вручную. Программа автоматически отрисовывает связи, фиксируя условные обозначения, направление и допуски.

**7. Добавление УНП.** На данном этапе формируются связи между обрабатываемыми и обработанными поверхностями, учитывая остаточные биения. Для каждой пары система рассчитывает удвоенную неравномерность припуска (УНП). Эти значения учитываются при расчёте припусков для определения промежуточных диаметральных размеров.

**8. Расчет биений.** На завершающем этапе осуществляется автоматический расчёт биений для всех операций и установов. Пользователь выбирает вид заготовки (прокат, литьё, штамповка) и указывает её длину. Все расчёты выполняются по эмпирическим формулам и алгоритмам. Результаты автоматически экспортируются в Excel-файл, а схема визуализируется в интерактивной графической форме.

Таким образом, представленный алгоритм охватывает все этапы подготовки схемы биений: от загрузки эскиза до расчета биений. Реализация алгоритма была выполнена в виде программного комплекса, обладающего графическим интерфейсом, адаптированным под работу технолога. Интерфейс разработан с приоритетом на пошаговую логику и визуальную понятность. Пользователь проходит в интерактивном режиме каждый этап построения схемы биений, видя промежуточные результаты на экране.

Каждое действие сопровождается визуализацией: при нумерации поверхностей – номера автоматически отображаются на эскизе, при добавлении операций – появляются линии обработки и подписи кодов, при построении ТВР – отображаются направленные связи с допусками.

На рисунке 3 представлена схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в программе.

Для оценки эффективности комплекса было выполнено сравнение с традиционным подходом – построение схемы биений и последующий её расчет вручную с использованием Компас 3D. Как результат, построение заняло от 40 до 60 минут, требовало постоянной перекомпоновки схемы при любых изменениях и требовало расчета биений, ТВР и УНП вручную, что существенно увеличило вероятность допуска ошибок в расчетах.

Схема биений, построенная в САД-системе КОМПАС-3D, представлена на рисунке 4.

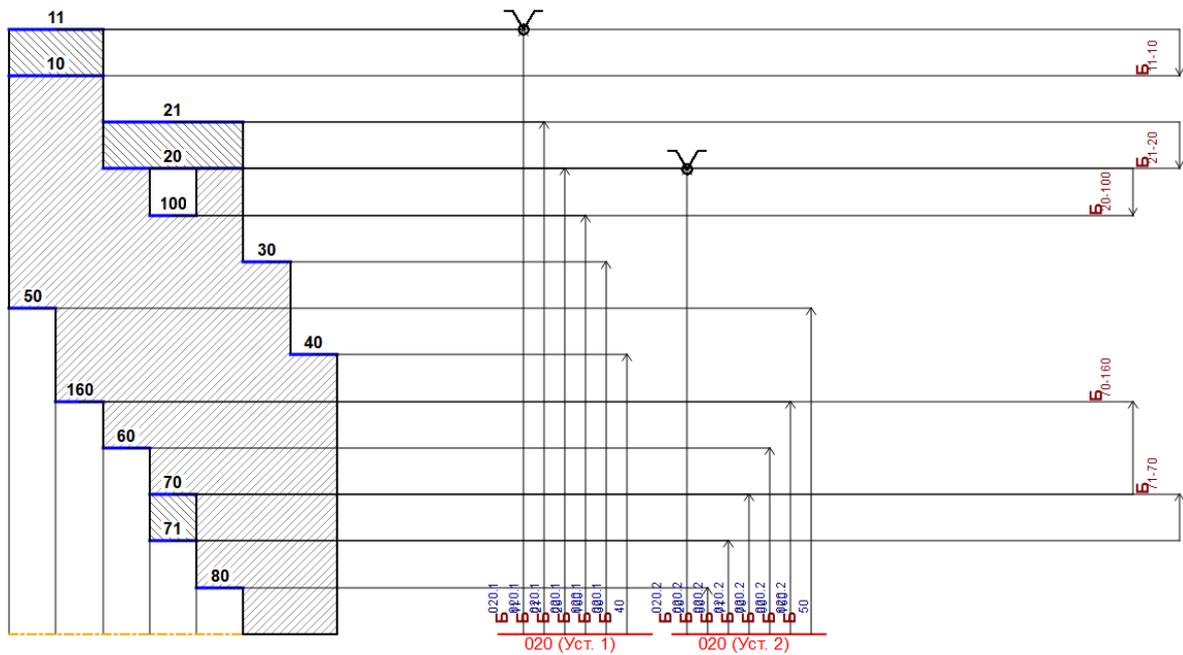


Рис. 3. Схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в предлагаемом программном комплексе

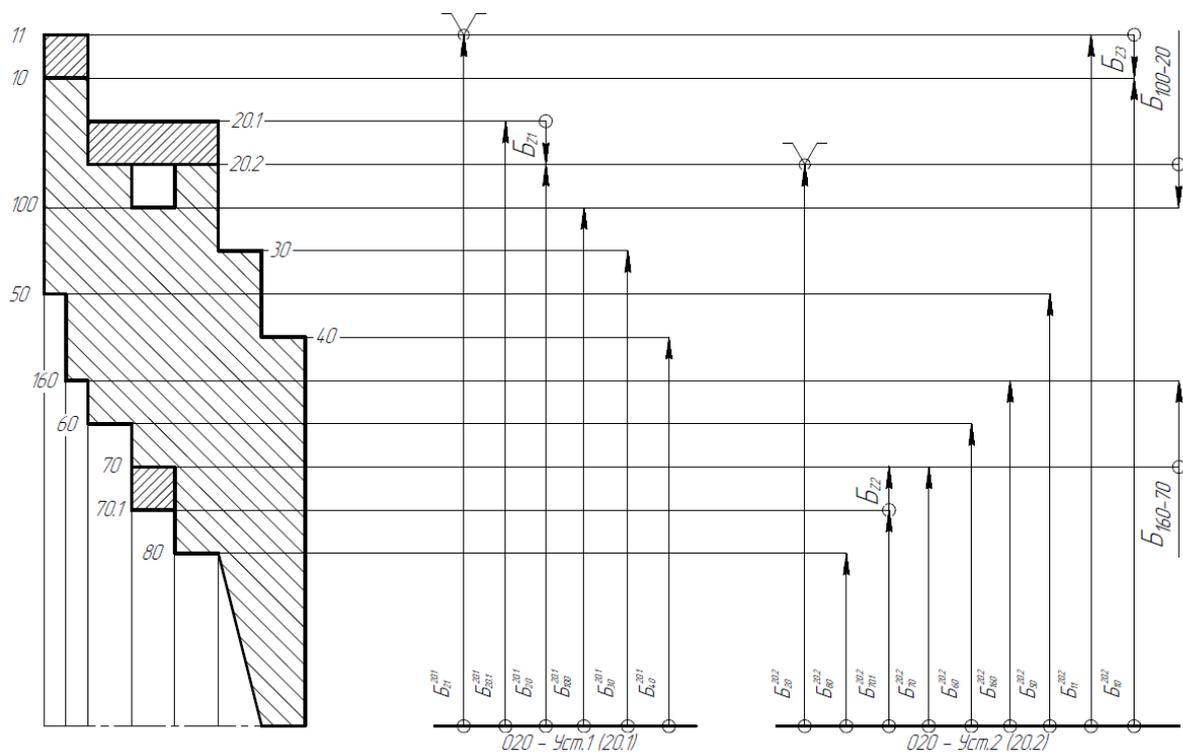


Рис. 4. Схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в САД-системе КОМПАС-3D

## Обсуждение

Сравнение ручного и автоматизированного метода построения схемы биений представлено в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнение ручного и автоматизированного способов построения схем биений

Критерий	Ручной метод	Программный комплекс
Время построения схемы	60 минут	10 минут
Гибкость при изменениях	Низкая (вся схема перестраивается)	Высока (автоперестройка)
Автоматический расчет УНП	Нет	Да
Автоматический расчет ТВР	Нет	Да
Автоматический расчет биений	Нет	Да
Проверка корректности связей	Только визуально	Автоматическая
Визуализация результата	Частично (статичная схема)	Интерактивная
Обновляемость схемы	Только вручную	Автоматическая

Результаты экспериментов свидетельствуют о значительном сокращении времени подготовки технологических схем и повышении точности анализа биений благодаря использованию автоматизированного подхода. Сравнение с ручным методом, реализованным в системе КОМПАС-3D, показало, что ручной расчёт требует постоянной перекомпоновки схемы, что ведёт к появлению ошибок и значительным временным затратам. Кроме того, исключение человеческого фактора при расчётах ТВР и УНП существенно повышает достоверность итогового технологического процесса. Применение графовых моделей для анализа взаиморасположения поверхностей уже подтверждено в ряде исследований [3, 6, 17, 20], что делает предложенный подход актуальным для различных отраслей машиностроения, приборостроения и даже микромеханики. Выявленные преимущества методики позволяют рекомендовать её для интеграции с цифровыми производственными платформами и системой контроля качества.

Расширенная функциональность комплекса и возможность оперативного обновления схемы открывают перспективы для дальнейшего развития, включая реализацию модуля расчёта линейных размерных цепей [3, 17]. Данная интеграция позволит не только улучшить контроль технологических процессов, но и повысить конкурентоспособность производства на мировом рынке.

## Заключение

Разработанный программный комплекс демонстрирует перспективность подхода автоматизированного построения схем биений. Система позволяет:

- ускорить процесс проектирования ТП;
- повысить точность и надёжность решений;
- обеспечить интеграцию с цифровыми производственными платформами.

Перспективой дальнейшего развития является расширение базы шаблонов для типовых операций, а также внедрение модуля расчёта линейных размерных цепей. Практическая значимость разработанного подхода подтверждается как отечественными, так и зарубежными исследованиями, что открывает широкие перспективы для его применения в различных отраслях машиностроения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Помпеев К.П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надёжных технологий // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 600–609.
- [2] Помпеев К.П., Одинцова Л.В. Выбор приспособлений при автоматизированном проектировании надёжных технологий // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 187–192.
- [3] Вороненко А.Е. и др. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2010.
- [4] Халимоненко А.Д., Вьюшин Р.В. Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащённым сменными керамическими пластинами // Записки горного института, 2014. Т. 209, С. 99–103.
- [5] Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010.
- [6] Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
- [7] Asiltürk I., Çunkaş M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method, 2011, Expert Systems with Applications.
- [8] Asiltürk I., Çelik L., Canlı E., Önal G. Regression modeling of surface roughness in grinding, 2011, Advanced Materials Research.

- [9] Asiltürk I. Application of artificial intelligence to predict surface roughness, 2014, Experimental Techniques.
- [10] Bezyazychny V.F., Sutyagin A.N., Bolotein A.N. Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning, 2018, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 194(2), 022005.
- [11] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, 2017, Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 86–90.
- [12] Maksarov V., Khalimonenko A. Quality assurance during milling of precision elements of machine components with ceramic cutting tools, 2018, International Review of Mechanical Engineering, Vol. 12, Iss. 5, pp. 437–441.
- [13] Yang Y. Machining parameters optimization of multipass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, 2018, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365–389.
- [14] Asiltürk I., Akkuş H. Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method, 2011, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation.
- [15] 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, 2017, Ciencia e Tecnica Vitivinicola, Vol. 32, pp. 127–154.
- [16] Andreev Y.S., Isaev R.M., Lubiviy A.V. Improvement of piezoelectric vibration sensors' performance characteristics via optimization of details' functional surfaces roughness, 2018, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1015, 052010.
- [17] Валетов В.А. Технология приборостроения. Учеб. пособие / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
- [18] Помпеев К.Р., Lazarev E.E., Pinaev D.S. Interactive synthesis and calculation of runout // Proceedings of the Tenth Session of the International Scientific School “Fundamental and Applied Problems of Reliability and Diagnostics of Machines and Mechanisms,” dedicated to the memory of V.P. Bulatov, VPB–11. St. Petersburg: IPMash RAS, 2011. – pp. 334–340.
- [19] Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003.
- [20] Клевцов В.А. О роли методологии в развитии технических знаний и обучении // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013.

**AUTOMATION OF DIMENSIONAL AND ACCURACY ANALYSIS OF  
TECHNOLOGICAL PREPARATION BASED ON ROTATIONAL  
ELEMENTS IN THE MANUFACTURING OF AN AXISYMMETRICAL  
PART FROM ROLLED STOCK**

ITMO University, Russia

**Abstract**

The paper addresses the automation of constructing runout schemes as part of the technological preparation for manufacturing parts of revolution. A software package has been developed that implements an interactive synthesis of schemes, taking into account the requirements for mutual positioning of surfaces. The software was tested on a specific part example. Implementation of the proposed approach not only reduces the time spent on design, but also increases the accuracy of technological decisions by minimizing the influence of the human factor [1-3], which directly affects the manufacturing precision of parts [3-5]. The use of graph models and algorithmic calculations is supported by both domestic and international literature sources [3, 6-9].

*Keywords:* runout, digital manufacturing, allowances, mutual positioning requirements, design automation, manufacturing process planning

**REFERENCES**

- [1] Pompeev, K.P. Dimensional and Accuracy Analysis in the Automated Design of Reliable Technologies. Proc. 3rd Int. Sci.-Pract. Conf. "Modern Mechanical Engineering: Science and Education", St. Petersburg: Polytechnic Univ. Press, 2013, pp. 600–609. (rus.)
- [2] Pompeev, K.P., Odintsova, L.V. Selection of Fixtures in the Automated Design of Reliable Technologies. Instrumentation and Technologies, 2004, No. 17–18, pp. 187–192. (rus.)
- [3] Voronenko, A.E. et al. Fundamentals of Mechanical Engineering Technology: A Textbook. St. Petersburg: SZTU, 2010. (rus.)
- [4] Khalimonenko, A.D., Vyushin, R.V. Accuracy of Machining in the Turning of Workpieces with Cutting Tools Equipped with Replaceable Ceramic Inserts. Proceedings of the Mining Institute, 2014, Vol. 209, pp. 99–103. (rus.)
- [5] Matalin, A.A. Technology of Mechanical Engineering: A Textbook for Universities. 3rd ed., St. Petersburg: Lan, 2010. (rus.)
- [6] Ivashchenko I.A. Technological dimensional calculations and methods for their automation. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 222 p. (rus.)

- [7] Asiltürk, I., Çunkaş, M. Modeling and Prediction of Surface Roughness in Turning Operations Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Method. *Expert Systems with Applications*, 2011.
- [8] Asiltürk, I., Çelik, L., Canli, E., Önal, G. Regression Modeling of Surface Roughness in Grinding. *Advanced Materials Research*, 2011.
- [9] Asiltürk, I. Application of Artificial Intelligence to Predict Surface Roughness. *Experimental Techniques*, 2014.
- [10] Bezyazychny, V.F., Sutyagin, A.N., Bolotein, A.N. Modeling a 3D Surface Roughness of Mating Parts Produced with Lathe Turning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Vol. 194(2), 022005.
- [11] Maksarov, V., Khalimonenko, A. Forecasting Performance of Ceramic Cutting Tools. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 736, pp. 86–90.
- [12] Maksarov, V., Khalimonenko, A. Quality Assurance During Milling of Precision Elements of Machine Components with Ceramic Tools. *Int. Rev. of Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 12, No. 5, pp. 437–441.
- [13] Yang, Y. Machining Parameters Optimization of Multi-pass Face Milling Using a Chaotic Imperialist Competitive Algorithm. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2018, Vol. 116, No. 3, pp. 365–389.
- [14] Asiltürk, I., Akkuş, H. Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method. *Measurement*, 2011.
- [15] Das, S.R., Panda, A., Dhupal, D. Analysis of Surface Roughness in Hard Turning with Coated Ceramic Inserts. *Ciencia e Tecnica Vitivinicola*, 2017, Vol. 32, pp. 127–154.
- [16] Andreev, Y.S., Isaev, R.M., Lubiviy, A.V. Improving Performance of Piezoelectric Vibration Sensors by Optimizing Functional Surface Roughness. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, 052010.
- [17] Valetov V.A. Technology of instrument making: study guide / V.A. Valetov, K.P. Pompeev. – SPb.: NRU ITMO, 2013. – 234 p. (rus.)
- [18] Pompeev, K.P., Lazarev, E.E., Pinaev, D.S. Interactive Synthesis and Calculation of Runout. *Proc. 10th Int. School “Reliability and Diagnostics of Machines and Mechanisms” (VPB-11)*, St. Petersburg: IPMash RAS, 2011, pp. 334–340.
- [19] Reference technologist-machine builder. In 2 vols. V.1 / Ed. A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov. – 5th ed., Revised. – M.: Mechanical Engineering-1, 2003. (rus.)
- [20] Klevtsov, V.A. On the Role of Methodology in the Development of Technical Knowledge and Education. *Proc. 3rd Int. Sci.-Pract. Conf. “Modern Mechanical Engineering: Science and Education”*, St. Petersburg: Polytechnic Univ. Press, 2013. (rus.)