

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.01: 621.9-11: 621.9.044: 621.9.08

doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-20-33

СТРУКТУРА РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ КОНФИГУРАЦИЮ ДЕТАЛИ

Ольга Валерьевна Колесникова^{1✉}, Владимир Егорович Лелюхин², Антон Аркадьевич Давыдов³, Андрей Олегович Горшков⁴, Мохаммад Дабалез⁵

^{1,2,3,4} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

¹ miis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8372-4228>

² lelvo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5097-7261>

³ davydov.aa1999@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7266-6839>

⁴ gorshkov.ao@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0840-6554>

⁵ dabalez.mo@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1048-7102>

Аннотация

Как показывает практика регламенты ЕСКД при конструировании деталей и технологий изготовления допускают неоднозначное трактование, что позволяет по-разному интерпретировать инженерные задачи и приводит к различным их решениям. Скрытое многообразие результатов в размерном анализе, порождающее вариативность при выявлении и выборе размерных цепей позволяет конструкторам и технологам использовать разные размерные цепи в пределах одной детали, что ведет к изменению конфигурации и снижению эффективности её изготовления.

Цель исследования состоит в изучении влияния структуры размерных связей на конфигурацию, корректности использования методов размерного анализа при изготовлении деталей, предложении методов формального проектирования эффективного технологического процесса на основе геометрии неидеальных объектов.

Основная проблема в развитии теории комплексного размерного анализа заключается в использовании трехмерного линейного пространства, не позволяющего однозначно описывать геометрическую конфигурацию реальных объектов. Поэтому в работе использовались методы и инструменты геометрии неидеальных объектов, позволяющей комплексно рассматривать существование и взаи-

модействие размерных связей в шестимерном пространстве с линейной и угловой метриками.

Новизна работы заключается в построении интегрированной модели структуры геометрической конфигурации детали, т.е. полного набора размерных связей в каждом геометрическом направлении, включающем все возможные размерные цепи.

Установленные в результате исследований закономерности влияния структуры размерных связей на схемы порождения объектов определяют формальную основу формирования эффективных конструкторских и технологических решений. Предложенный подход комплексного анализа размерных связей детали с применением графов позволяет решить задачи существования и воспроизводимости геометрической конфигурации детали, а также создания альтернативных конфигураций.

Выводы. Разработанные принципы работы со структурой размерных связей детали позволяют избежать множественности решений задач размерного анализа, неопределенности в принятии решений и дают возможность разработки формальных алгоритмов оценки конфигурации и проектирования технологического процесса обработки деталей.

Ключевые слова: цепи, связи, конфигурация, деталь, проектирование, технологический процесс.

Ссылка для цитирования:

Колесникова О.В. Структура размерных связей и её влияние на геометрическую конфигурацию детали / О.В. Колесникова, В.Е. Лелюхин, А.А. Давыдов, А.О. Горшков, М. Дабалез // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 6. – С. 20-33. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-20-33.

Original article

Open Access Article

STRUCTURE OF DIMENSIONAL CONNECTIONS AND ITS IMPACT ON THE GEOMETRIC CONFIGURATION OF THE PART

Olga Valeryevna Kolesnikova^{1✉}, Vladimir Egorovich Lelyukhin², Anton Arkadyevich Davydov³, Andrey Olegovich Gorshkov⁴, Mohammad Dabalez⁵

^{1,2,3,4} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

¹ miis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8372-4228>

² lelvo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5097-7261>

³ davydov.aa1999@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7266-6839>

⁴ gorshkov.ao@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0840-6554>

⁵ dabalez.mo@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1048-7102>

Abstract

According to practical experience, ESCD regulations allow ambiguous interpretation when designing parts and manufacturing technologies. This results in different interpretations of engineering tasks and leads to different solutions. The hidden variety of results in dimensional analysis, which generates variability in the identification and selection of dimensional circuits, allows designers and engineers to use different dimension chains within the same part, which leads to configuration changes and reduced manufacturing efficiency.

The study objective is to identify the influence of the structure of dimensional connections on the configuration, the correctness of using dimensional analysis methods for manufacturing parts, and to propose methods for the formal design of an effective technological process based on the geometry of non-ideal objects.

The main problem in the development of the theory of complex dimensional analysis is the use of three-dimensional linear space, which does not allow unambiguously describing the geometric configuration of real objects. Therefore, methods and tools of the geometry of non-ideal objects are used in the paper, which makes it possible to comprehensively consider the existence and interaction of dimensional connections

in a six-dimensional space with linear and angular metrics.

The novelty of the work is the construction of an integrated model of the structure of the part geometric configuration, i.e. a complete set of dimensional connections in each geometric direction, including all possible dimension chains.

Influence regularities of the structure of dimensional connections on the patterns of object generation found as a study result determine the formal basis for forming effective design and technological solutions. The proposed approach to a comprehensive analysis of part dimensional connections using graphs allows solving the problems of existence and reproducibility of the geometric configuration of the part, as well as creating alternative configurations.

Conclusions. The developed principles of working with the structure of dimensional connections of a part make it possible to avoid multiple solutions to problems of dimensional analysis, uncertainty in decision-making and make it possible to develop formal algorithms for evaluating the configuration and designing the technological process of machining parts.

Keywords: chains, connections, configuration, part, design, technological process.

Reference for citing:

Kolesnikova OV, Lelyukhin VE, Davydov AA, Gorshkov AO, Dabalez M. Structure of dimensional connections and its impact on the geometric configuration of the part. *Transport Engineering*. 2026;6:20-33. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-20-33.

Введение

Обеспечение качественной сборки узлов машиностроительных изделий основывается на выдерживании размерных связей детали-сборочных единиц. Учитывая количественную и пространственную сложность задачи формирования схемы размерных связей в процессе конструирования, разработана и успешно применяется теория размерных цепей. Методы расчета размерных цепей используются для определения и распределения допусков между деталь-сборочными единицами, а также при изготовлении деталей [1-4].

Геометрическая сложность машин, агрегатов, узлов и отдельных деталей при запуске новых изделий свидетельствует о необходимости наличия научно обоснованных методов конструирования и технологического анализа и производственных непротиворечивых рекомендаций, а также требует совершенствования существующих механизмов и методов размерного анализа [2, 5, 6, 7, 8].

Значительное число отечественных и зарубежных исследований в области размерных связей и размерного анализа по-

священо процессам сборки узлов [1, 5, 9, 10, 11, 12]. Анализ публикаций демонстрирует широкий спектр различных методов, моделей и инструментов. Например, в [1] предлагается концепция обеспечения точности размеров и показателей надежности узлов с использованием некоторых критериев повышения технологичности конструкции.

Методика выявления размерных цепей, определение обоснованных требований к точности, выбора эффективных методов достижения точности при выполнении техпроцесса и получение оптимального решения на основе расчета размерных связей узла рассматривается в [9, 13]. Примером объемного разложения узла с использованием контактных элементов между деталями, является построение графа смежности элементов при условии сохранения связности модели, где дерево элементов генерируется путем разложения детали и восстановления простых подэлементов [5]. Многие авторы уделяют внимание необходимости автоматизации методов размерного анализа, что позволяет повысить точность расчетов, снизить вероятность появления ошибок, а также использовать более сложные модели [10, 14, 15].

Рассмотренные подходы и методы успешно применяются в инженерной практике, однако необходимость выявления размерных цепей в функционально различных механизмах, корректное определение критериев эффективности и обоснованных требований к точности осложняют формализацию процессов конструирования и технологического проектирования [5, 6, 11, 12, 16]. Многообразие предлагаемых подходов свидетельствует об отсутствии единой теоретической базы, а многочисленные публикации об актуальности рассматриваемой тематики и необходимости выполнения дальнейших исследований.

При проектировании сборочных узлов и расчете размерных цепей возникает необходимость оценки не только сопряжения, но и геометрической конфигурации самих деталей. Но при переносе методов размерного анализа на детали, возникает

ряд трудностей из-за отличий специфики проектирования и изготовления. В существующей научной парадигме трехмерного линейного геометрического пространства исследователи довольно часто ограничиваются рассмотрением линейных размерных цепей, которые анализируются только в одном координатном направлении [1, 3]. Иногда рассматриваются комбинации плоских размерных цепей, где припуски на обработку принадлежат двум размерным цепям [13, 17, 18].

Таким образом, методы расчета размерных цепей предоставляют эффективные инструменты расчета и анализа замыкающих звеньев в локально выявленных размерных цепях. Однако, в отечественной и зарубежной практике пока отсутствует теоретическая основа интегрированного описания комплекса размерных связей, объединяющих линейные и угловые характеристики [6, 11, 14, 16, 19].

Также, стоит отметить, что прямая и обратная задачи механизма расчета размерных цепей часто некорректно применяется при проектировании технологических процессов механической обработки деталей, что приводит к необоснованному ужесточению допусков, необходимости введения дополнительных операций или даже невозможности изготовления детали. Кроме того, любое изменение размерных связей, заданных конструктором, изменяет геометрическую конфигурацию и приводит к изготовлению совершенно иной детали [6, 7, 16].

По мнению авторов, основная проблема в развитии теории комплексного размерного анализа заключается в том, что существующий инструментарий современной геометрии, использующий трехмерное линейное пространство, не позволяет однозначно описывать геометрическую конфигурацию реальных объектов [6, 7, 16]. Поэтому для решения этой задачи в работе использовались методы и инструменты геометрии неидеальных объектов, которая позволяет комплексно рассматривать существование и взаимодействие размерных связей в шестимерном пространстве с линейной и угловой двойной метрикой [6, 7, 14, 16, 20].

Цель данной работы: исследование влияния структуры размерных связей на конфигурацию детали, корректности использования методов размерного анализа при изготовлении деталей, а также пред-

ложение методов формального проектирования эффективного технологического процесса механической обработки на основе положений геометрии неидеальных объектов.

Вариативность решений в задачах размерного анализа

Конструирование детали и проектирование технологического процесса ее изготовления в инженерной деятельности относятся к сложным творческим задачам, основанным не только на теоретических знаниях, но, в большей степени, на опыте, индивидуальных знаниях и умениях конструктора и технолога.

Геометрические параметры деталей существенно влияют на функциональные свойства изделий. Важное значение при этом имеет набор и структура размерных связей, определяющих взаимное расположение поверхностей [6, 9, 16].

Как показывает практика регламенты единой системы конструкторской документации (ЕСКД) в ряде вопросов разработки конструкций деталей и технологий изготовления допускают неоднозначное трактование, что позволяет по-разному интерпретировать одну и ту же инженерную задачу и приводит к различным её решениям. Примером могут служить правила (рекомендации) нанесения размеров на чертежах [23]. Так в п. 4.2 указано: «Общее количество размеров должно быть минимальным, но достаточным для изготовления и контроля изделия», однако при этом совершенно не существует каких-либо сведений о методах или критериях определения этой самой «достаточности». Также следует отметить, что методической основой расчета размерных цепей являются действующие на сегодня [24].

Первоначальным шагом построения любой размерной цепи является выявление замыкающего звена, которое носит исключительно субъективный характер и особенно осложняется при наличии связанных размерных цепей, а также если в одной размерной цепи присутствуют как линейные, так и угловые размеры [2, 9, 13, 18].

Сложности «выявления» замыкающего звена порождаются вариативностью принятия решений, поскольку в каждой

размерной цепи при числе поверхностей более трех имеется множество замыкающих звеньев. На Рис. 1 показан эскиз вала с пятью торцами, связанными линейными размерами обозначенными сплошными размерными линиями в нижней части эскиза. Как видно на Рис. 1 для заданной размерной цепи объективно существует шесть замыкающих звеньев ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$).

Этот пример показывает, что в любом рассматриваемом измерении число замыкающих звеньев соответствует предельному количеству возможных размерных цепей (как линейных, так и угловых). Поскольку любая корректная размерная цепь полностью соответствует связанному ациклическому графу (граф-дерево), а как известно, количество ребер (размерных связей) графа-дерева с n вершинами равно $n - 1$. Учитывая, что число ребер в полном графе определяется как $n(n - 1)$, количество ребер дополнения графа-дерева до полного графа и соответственно число замыкающих звеньев в размерной цепи можно определить следующим образом

$$K_d = (n - 2)(n - 1) / 2. \quad (1)$$

Таким образом, количество вариантов замыкающих звеньев существенно возрастает (почти в квадрате) с увеличением числа связываемых поверхностей.

Кроме того, вариативность принятия решения при выявлении и выборе размерных цепей накладывается на коллективную работу в процессе конструкторско-технологической подготовки производства, на каждом этапе которой специалисты могут принимать индивидуальные решения в соответствии с рассматриваемыми задачами, возможностями и своим видением ситуации. Результатом может стать несогласованность решений конструкторов и технологов. Одним из примеров может служить процедура перерасчета размерных

цепей при проектировании технологического процесса изготовления детали.

В размерном анализе при расчете размерных цепей рассматриваются две задачи: прямая задача, в которой по заданным параметрам замыкающего звена требуется определить параметры составляющих звеньев, и обратная задача, в которой по известным параметрам составляющих

звеньев определяются параметры замыкающего звена [2, 9, 13, 21]. Инструмент для решения прямой задачи является весьма эффективным при определении допусков в сборочных размерных цепях. Однако, его использование при изготовлении деталей не только нежелательно, но и приводит к значительным проблемам, а также повышению затрат.

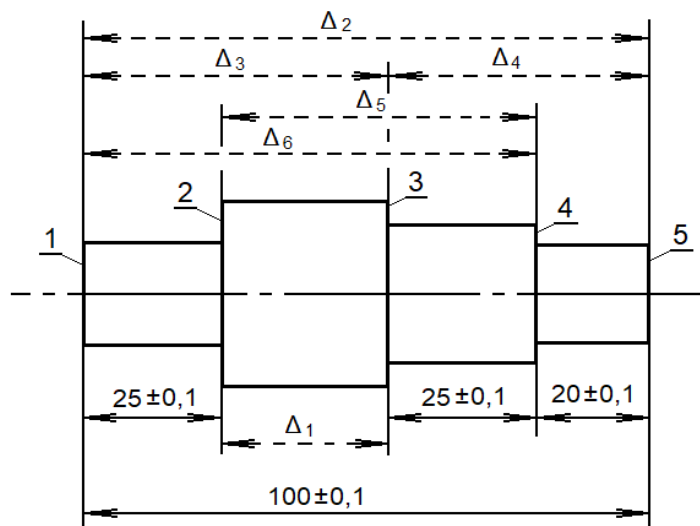


Рис. 1. Эскиз детали с полным набором замыкающих звеньев размерной цепи
 Fig. 1. Complete set of master links in the dimension chain on a sketch of a part

Рассмотрим простой пример. Предположим необходимо изготовить вал, имеющий несколько ступеней (рис. 1). При этом, заданная конструктором конфигурация детали требует выдерживания размера между поверхностями 1 и 5 ($100 \pm 0,1$ мм). Проектируя технологический процесс изготовления, технолог решил, что измерить этот размер будет проблемно и поэтому счёл необходимым изменить размерную цепь, сделав звено 1 – 5 замыкающим, а звено 2 – 3 составляющим. Чтобы сохранить неизменным заданный конструктором размер, технологу пришлось пересчитать размерную цепь, т.е. решить прямую задачу, распределив допуск замыкающего звена 1 – 5 на составляющие 1 – 2, 2 – 3, 3 – 4 и 4 – 5. Как известно, допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев [2, 8, 13, 18, 22]. Учитывая, что в рассматриваемом примере величины составляющих звеньев лежат в одном интервале номинальных размеров (18...30 мм), рациональным является про-

порциональное распределение допуска размера Δ_2 (100 мкм) между ними
 $\Delta_i = 100 / 4 = 25$ (мкм).

Таким образом, допуск изготовления для каждого составляющего звена уменьшился (ужесточился) в 4 раза, что соответствует увеличению точности с 10-го до 7-го качества [25]. Этот пример наглядно демонстрирует не только возможность принятия необоснованных технологических, а иногда и конструкторских решений, но и допускаемую существующими регламентами неоднозначность восприятия между конструкторами и технологами.

Общая тенденция увеличения трудоемкости обработки деталей при повышении точности наглядно продемонстрирована на диаграмме, приведенной в учебнике проф. А.Г. Сулова [21, с. 149]. Если взять трудоемкость обработки с точностью, соответствующей 10 качеству, за 100 %, то увеличение точности до 7 качества повышает трудоемкость в 3 раза (рис. 2).

Получаемые в результате перерасчета размерных цепей значения допуска существенно повышают точность размеров, что в свою очередь может привести к необходимости решения следующих вопросов:

– подбор оборудования, дающего более высокую точность;

– привлечение рабочего более высокой квалификации;

– изменение технологического процесса и добавление дополнительных операций (шлифовка, полировка и др.);

– в случае отсутствия необходимого оборудования, поиск подрядчика для выполнения работы.

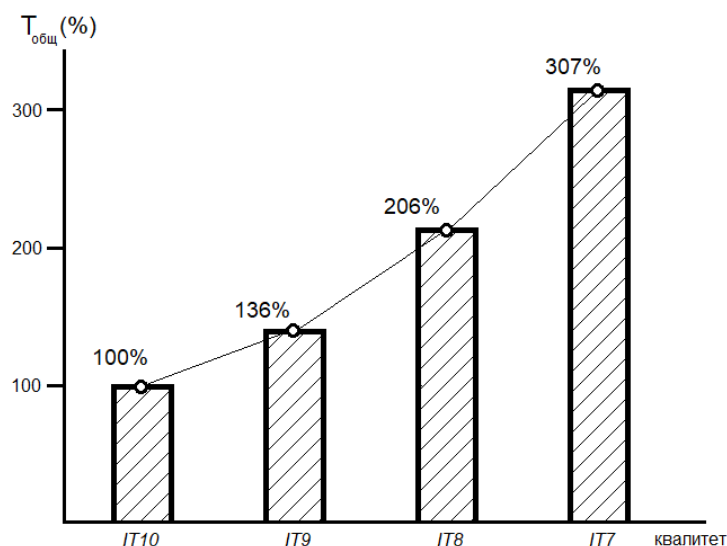


Рис. 2. Зависимость трудоемкости обработки от требуемой точности [21]

Fig. 2. Dependence of labor intensity of processing on the required accuracy

Решение каждой из приведенных выше проблем повышает как стоимость, так и время изготовления детали, что соответствующим образом снижает эффективность.

Кроме снижения эффективности изготовления детали, необходимо отметить неочевидный, но существенный факт: любой перерасчет размерной цепи приводит к изменению конфигурации детали.

Параметры, определяющие геометрическую конфигурацию детали

Многолетние исследования авторов в вопросах формализации и автоматизации проектирования технологических процессов механической обработки деталей привели к разработке геометрии неидеальных объектов [6, 7, 20]. Разрабатываемая авторами геометрия неидеальных объектов изучает реальные объекты в шестимерном биметрическом пространстве. Каждый объект представляется в виде совокупности поверхностей и размерных связей. Важные особенности этой геометрии: рассмотрение геометрии материальных объектов с учетом их неидеальности, наличия структуры размерных связей; формирование принципов и способов порождения геометрии объектов; разработка формаль-

ных моделей и алгоритмов изучения и порождения материальных объектов.

В соответствии с этой геометрией машиностроительные объекты (детали, сборочные единицы, комплексы) рассматриваются как модели материальных объектов, имеющих погрешности при изготовлении, т.е. не идеальных, в отличие от существующих геометрий. Каждый объект имеет геометрическую конфигурацию.

Геометрическая конфигурация детали может быть представлена как совокупность набора поверхностей и взаимосвязей между ними [6, 7, 16, 20]: $G(S, D)$, где G – геометрическая конфигурация; S – множество поверхностей; D – множество взаимосвязей между поверхностями.

Рассмотренный выше пример показывает, что изменение или замена любой размерной связи (элемента множества D) приводит к изменению геометрической конфигурации.

Объединение всех обозначенных на чертеже размерных связей в каждом геометрическом направлении в единый комплекс формирует интегрированную модель размерных связей, что позволит не ограничиваться анализом выявляемых размерных цепей, а рассматривать полный набор размерных связей. Это создаст возможность для реализации принципа сохранения неизменности геометрической конфигурации на протяжении жизненного цикла изделия, начиная от конструирования, технологической подготовки производства, управления производственным процессом, эксплуатацией и заканчивая его утилизацией.

Рассмотрим следующий пример. На рис. 3 представлены три геометрически подобные (похожие), но конструктивно различные конфигурации детали. Расположение плоскостей 1, 2 и 3 относительно друг друга определяется тремя линейными размерами l_1 , l_2 и l_3 . При изготовлении реальных деталей могут быть получены три

различные конфигурации в зависимости от расположения замыкающего звена размерной цепи, построенной на этих трех размерах.

Как показано на рис. 3а, заданными для изготовления являются размеры l_1 и l_3 , а размер l_2 образуется (получается) «сам собой», как результат расположения плоскостей 2 и 3. При этом погрешность Δ_2 «замыкающего» размера l_2 равна сумме погрешностей «составляющих» размеров l_1 и l_3 , т.е. $\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_3$. Аналогично получаются погрешности $\Delta_3 = \Delta_1 + \Delta_2$ и $\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3$ размеров l_3 , и l_1 , для конфигураций, изображенных на рис. 3б и 3в соответственно [6, 7, 16].

Таким образом, изменение замыкающего звена в определенной размерной цепи, приводит к изменению конфигурации детали, иными словами фактически осуществляется подмена детали. Тогда, возвращаясь к вопросу перерасчета размерных цепей, необходимо подчеркнуть, что любой перерасчет размерной цепи ведет к изменению конфигурации, заданной конструктором, и изготовлению совершенно другой детали.

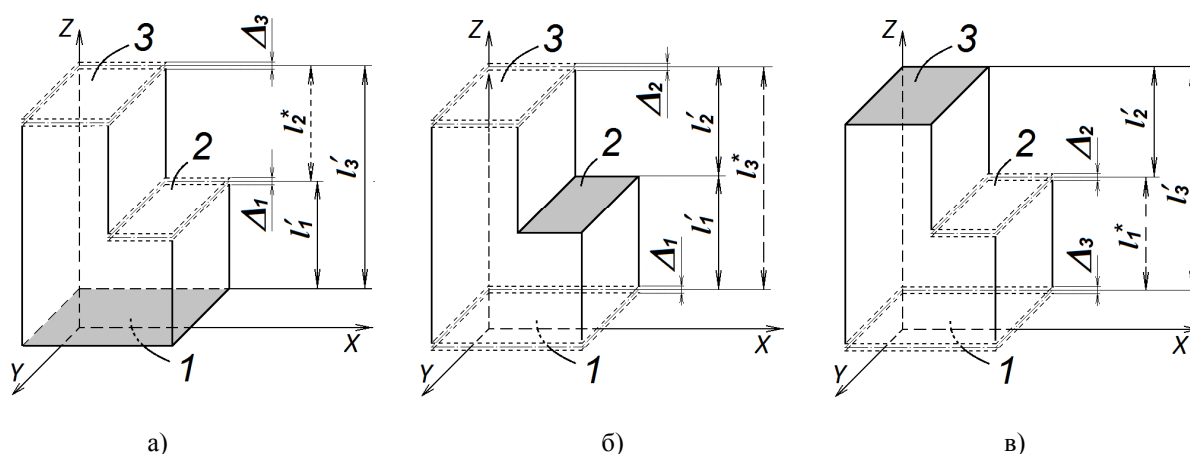


Рис. 3. Варианты геометрической конфигурации реальной детали [10]

Fig. 3. Variants of geometric configuration of a real part

Представление комплекса размерных связей

Для преодоления проблем, связанных с вариативностью конструкторских и технологических решений, авторы предлагают не ограничиваться анализом выявляемых размерных цепей, а рассматривать

полный набор размерных связей в каждом геометрическом направлении. Комплекс размерных связей в пределах каждого геометрического направления фактически

представляет интегрированную модель структуры геометрической конфигурации. Установленные в результате исследований закономерности влияния структуры размерных связей на схемы порождения и функциональность геометрической конфигурации объектов определяет формальную основу формирования эффективных конструкторских и технологических решений [6, 14, 16, 22].

Визуализацию геометрической структуры удобно представлять в виде графов, обозначая множеством вершин состав поверхностей детали, а ребрами – размерные связи, определяющие ориентацию поверхностей друг относительно друга. Использование плоских графов позволяет однозначно описывать множество

возможных структур, задаваемых линейными и угловыми размерными связями.

На рис. 4 показана структура размерной цепи для детали, изображенной на рис. 1. Здесь регламентированная чертежом размерная цепь, в виде графа-дерева показана на рис. 4а, а рис. 4б демонстрирует эту же цепь с полным набором замыкающих звеньев (показаны пунктирными линиями) в виде дополнения до полного графа. Изображение размерных связей в виде графа дает также возможность удобно и наглядно рассчитывать допуски замыкающих звеньев. Например, допуск замыкающего звена Δ_1 равен сумме допусков составляющих звеньев размерной цепи $2 - 1 - 5 - 4 - 3$:

$$\Delta_1 = (\pm 0,1) + (\pm 0,1) + (\pm 0,1) + (\pm 0,1) = \pm 0,4(\text{мм})$$

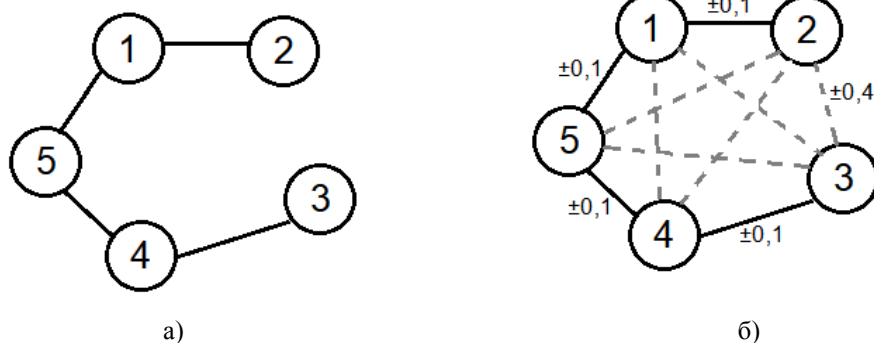


Рис. 4. Отображение размерных связей детали рис. 1: а - в виде графа размерных связей, б - граф размерных связей с замыкающими звеньями (дополнение до полного графа)

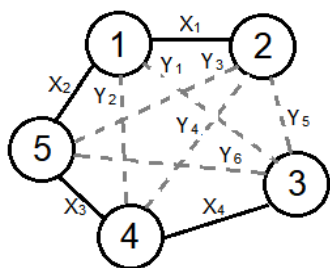
Fig. 4. Display of dimensional relationships of a part in Fig. 1: a) in the form of a graph of dimensional relationships, b) a graph of dimensional relationships with closing links

Использование графов, с одной стороны, позволяет наглядно представить структуру размерных связей конфигурации, с другой стороны, дает возможность формализовать это представление и использовать математическую теорию графов для решения конструкторско-технологических задач. Например, условие связности графа свидетельствует о наличии необходимых для изготовления детали размерных связей, а ацикличность – о достаточности, отсутствии избыточных размерных связей, которые могли бы вызвать неопределенность при изготовлении детали. Дополнение графа до полного (рис. 4б)

обеспечивает возможность определить весь набор замыкающих звеньев, число которых характеризует наличие всех возможных размерных цепей в рассматриваемом измерении. Для формального описания возможного множества размерных цепей может быть использована матрица фундаментальных циклов. Матрица фундаментальных циклов включает в себя все циклы, которые образуются при добавлении ребра к основному графу и формирует базис пространства циклов. Размерность пространства циклов графа равна числу ребер, не входящих в его остов, иными словами, количеству ребер дополнения

остовного графа (1). В рассматриваемом примере матрица фундаментальных циклов будет включать шесть строк и четыре столбца. Построение матрицы изображено на рис. 5. Обозначим ребра остовного графа x_1, x_2, x_3, x_4 , а ребра дополнения $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$ (рис. 5а). Добавление любого ребра к остову будет образовывать цикл. Строки матрицы (рис. 5б) соответствуют

циклам, образующимся при добавлении ребра. Так при добавлении ребра y_1 образуется цикл x_2, x_3, x_4, y_1 . В строке матрицы единицами указаны ребра, входящие в цикл. Построение и использование матрицы фундаментальных циклов позволяет формально описать возможные размерные цепи и соответствующие им замыкающие звенья.



	x_1	x_2	x_3	x_4
y_1	0	1	1	1
y_2	0	1	1	0
y_3	1	1	0	0
y_4	1	1	1	0
y_5	1	1	1	1
y_6	0	0	1	1

	x_1	x_2	x_3	x_4	
y_1	0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$
y_2	0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	0	$\pm 0,2$
y_3	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	0	0	$\pm 0,2$
y_4	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	0	$\pm 0,3$
y_5	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$
y_6	0	0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$

а)

б)

в)

Рис. 5. Построение матрицы фундаментальных циклов: а - граф с обозначенными ребрами, б - матрица фундаментальных циклов; в) матрица с указанными значениями допусков

Fig. 5. Construction of a fundamental cycle matrix: a) graph with designated edges, b) fundamental cycle matrix; c) matrix with specified tolerance values

Если же указать в матрице вместо единиц размер допуска, то это позволит автоматически рассчитать допуск замыкающего звена, просуммировав значения в строках (рис. 5в). Например, допуск замыкающего звена y_1 будет равен сумме значений в первой строке и составит $\pm 0,3$.

На рис. 1-4 рассмотрены только линейные размерные связи и только в одном направлении. Реальные детали характеризуются размерами не только в одном измерении и не только линейными.

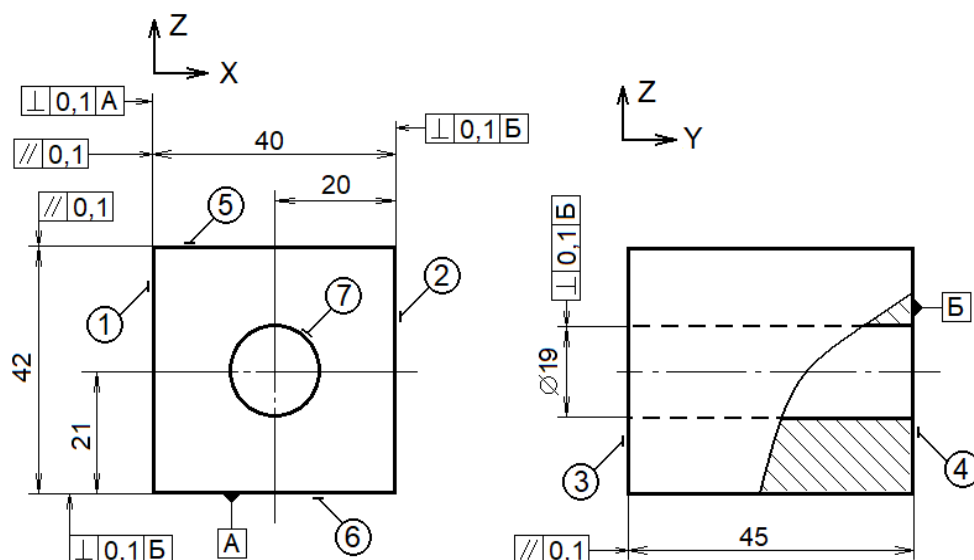
Структура геометрической конфигурации детали

Геометрия неидеальных объектов, рассматривая детали, оперирует шестью измерениями: тремя линейными e_x, e_y, e_z , соответствующими осям координат x, y, z и тремя угловыми $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$, описывающими повороты вокруг осей координат. Использование шести измерений позволяет изучить все возможные размерные связи детали и их взаимное влияние на конфигурацию [6, 16, 22].

Принципы формирования и анализа размерных связей в шестимерном геометрическом пространстве с двумя неоднородными метриками (линейная и угловая) рассмотрим на примере построения плоских графов размерных связей для каждого измерения [6, 16]. На Рис. 6 показан чертеж детали с указанными линейными (ли-

нейные размеры) и угловыми [26] (не параллельность и неперпендикулярность) размерными связями, на которых цифрами в кружочках обозначены номера поверхностей.

Для чертежа (Рис. 6) построим графы размерных связей, обозначив их $e_x, e_y, e_z, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$, в соответствии с наименованием координатных направлений. Граф размерных связей e_x содержит линейные размерные связи в направлении e_x . В соответствии с нумерацией поверхностей данный граф будет содержать вершины, соотносящиеся с поверхностями 1, 2, 7 и размерные связи между этими поверхностями. На Рис. 7 представлены графы размерных связей детали (рис. 6) во всех шести измерениях.



Неуказанные допуски размеров $\pm 1/2 IT9$

Рис. 6. Чертеж детали
Fig. 6. Drawing of the part

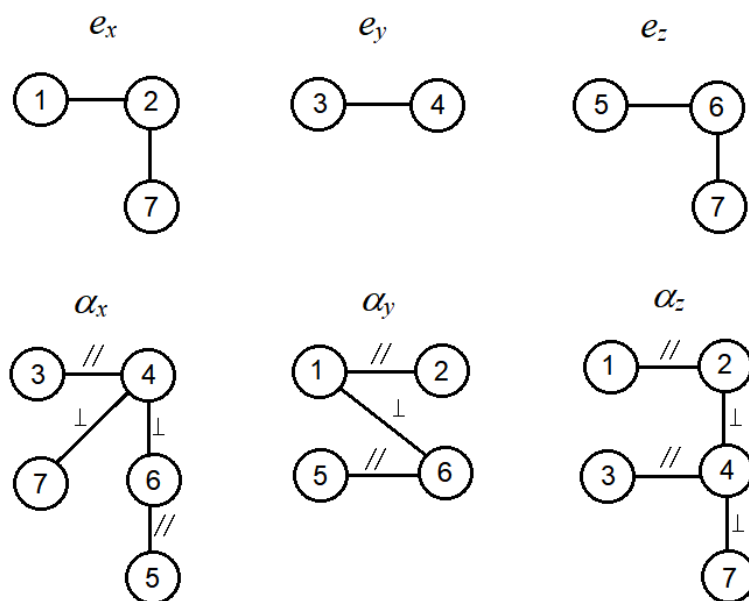


Рис. 7. Графы размерных связей детали (рис. 6)
Fig. 7. Graphs of dimensional relationships of the part (Fig. 6)

Представленное семейство графов (Рис. 7) содержит все без исключения варианты размерных цепей, а также полностью и однозначно описывает геометрическую структуру детали изображенной на Рис. 6. Определим число возможных вариантов размерных цепей для этой детали, учитывая, что оно равно количеству замыкающих звеньев. Графы в линейных измерениях e_x и e_z имеют по одному замыкающему звену, а число замыкающих звеньев

для измерения e_y равно нулю (1). Для угловых измерений α_x , α_y и α_z , число размерных цепей равно 6, 3 и 6 соответственно. Таким образом, даже для сравнительно простой детали, имеющей в составе семь поверхностей, при строго заданной структуре размерных связей общее количество размерных цепей равно семнадцати.

Предложенный в статье анализ графов размерных связей (рис. 7) в шести

геометрических измерениях позволяет сделать следующие выводы о конфигурации детали и сформулировать основные условия корректного существования и воспроизводимости структуры геометрической конфигурации (рис. 6):

– связность всех графов говорит о наличии всех необходимых для изготовления детали размерных связей (условие необходимости) [6, 7];

– ацикличность графов говорит об отсутствии лишних размерных связей, которые могли бы вызвать неопределенность при изготовлении детали (условие достаточности) [6, 7, 14];

– представление размерных связей в виде графов можно использовать для формального алгоритма построения последовательности обработки поверхностей дета-

ли, иными словами, для автоматического проектирования технологического процесса механической обработки (условие формализуемости) [6, 16];

– анализ совместимости графов размерных связей между собой позволяет оценить качество и возможность воспроизведения конфигурации, т.е. возможность изготовления детали заданной конфигурации (условие воспроизводимости) [16];

– графы размерных связей можно использовать для определения всех возможных замыкающих звеньев и расчета их допусков (условие определенности).

Кроме того, графы размерных связей могут помочь в формировании новых конфигураций деталей с необходимыми функциональными свойствами.

Обсуждение/Заключение

Проведенное исследование показало, что применение инструмента размерных цепей при изготовлении деталей требует пересмотра и доработки. Использование прямой задачи теории размерных цепей удобное при рассмотрении технологических процессов сборки категорически не применимо для изменения размерных цепей и перерасчета допусков при изготовлении неразъемных деталей. Авторы считают, что регламентированные конструктором размерные связи не должны подвергаться изменениям при проектировании технологического процесса и изготовлении детали. Предложенный подход комплексного анализа размерных связей детали с применением графов размерных связей позволяет решить, как задачи определения существования конфигурации и ее воспроизводимости, так и задачи конструирования альтернативных конфигураций.

Разработанные в геометрии неидеальных объектов принципы работы со структурой размерных связей детали позволяют избежать множественности решений задач размерного анализа, неопределенности в принятии конструкторских и технологических решений.

Применение положений геометрии неидеальных объектов дает возможность разработки формального алгоритма оценки конфигурации и разработки технологического процесса механической обработки деталей. Разработанные авторами правила, положения и алгоритмы могут быть использованы для создания автоматизированных и автоматических компьютерных систем проектирования технологических процессов механической обработки деталей, а также конструирования робототехнических систем полного автоматического цикла от проектирования технологического процесса до изготовления детали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Польский Е.А., Сорокин С. П. Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6(132). С. 38-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48.

2. Суслов 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. С. 4 –10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10.

3. Харламов Ю. А. Размерный анализ технологических процессов восстановления деталей машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 5. С. 37–47.
4. Ионов П. А. Определение номинальных значений размеров и допускаемых отклонений ответственных деталей агрегатов зарубежной техники // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32. № 4. С. 520–538. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.520-538>.
5. Li C., Hou W. Analysis of Assembly Tolerance Based on Assembly Constraint Information Model // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. 7438966, 18 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/7438966>.
6. Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V., Permyakova K.N. Geometry Problems in Formalizing the Creation of Machining Processes on Machine Tools. *Digital Manufacturing Technology*. 2023, 3(2): 91–105. <https://doi.org/10.37256/dmt.3220232865>.
7. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Геометрия неидеальных объектов в судостроении и судоремонте // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2020. № 1, с. 31-42 DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-31-44.
8. Кашуба Л.А. 2021. Современный взгляд на геометрию реальных поверхностей деталей изделий машиностроения. // Системный анализ в науке и образовании. 1 (сен. 2021), 1–17. извлечено от <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/145>.
9. Тимирязев В.А., Левчук В.И., Авдюшин И.В. Выявление и расчет размерных связей механизма для определения методов достижения точности при его сборке и точности размеров комплектующих деталей // Вестник МГТУ «Станкин». 2024. № 1 (68). С. 87-95.
10. Lealin, S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues // *Journal of Engineering Science* 2023, 30 (4): 20-30. [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(4\).02](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(4).02).
11. Goetz, S., Roth, M., Schleich, B. Early Robust Design—Its Effect on Parameter and Tolerance Optimization // *Applied Sciences*. 2021.11. 9407. 10.3390/app11209407.
12. Li J., Horber D., Graubeger P., Goetz S., Wartzack S., Matthiesen S. Supporting early robust design for different levels of specific design knowledge: an adaptive method for modeling with the Embodiment Function Relation and Tolerance model. *Design Science*. 2024:10.1017/dsj.2024.48.
13. Бейлин А. Б., Царфин Б. А. Исследование и расчет связанных размерных цепей на примере обеспечения показателей точности поворотных делительных столов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. No 3. С. 5–11. 10.37313/1990-5378-2020-22-3-5-1121.
14. Kolesnikova O. V., Lelyukhin V. E., Ignatev F. Yu. Formation of Schemes Generating Geometric Structure of Machine Parts. A. A. Radionov et al. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019.p. 355-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_38.
15. Tlija M., Korbi A., Louhichi B., Benamara A. A Novel Model for the Tolerancing of Nonrigid Part Assemblies in Computer Aided Design // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2019. 19(4). <https://doi.org/10.1115/1.4043528>.
16. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Формальное проектирование единичных технологий обработки деталей на металлорежущих станках // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24. № 4. С. 55–73. DOI: 10.14529/engin240405.
17. Гаер М.А., Журавлев Д.А. Моделирование и анализ технологических размерных цепей сборок // Вестник ИрГТУ. 2014. №11(94). с. 33-38.
18. Масыгин В.Б., Мухолзоев, А.В. Исследование особенностей размерного анализа технологических процессов изготовления изделий, имеющих угловые элементы, с учетом погрешностей углов наклона // Вестник машиностроения. 2017. №1. с. 20-23.
19. Armillotta, A. Estimation of cost reduction by tolerance optimization // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024:134. 1-15. 10.1007/s00170-024-14227-x.
20. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Антоненкова Т.В., Дренин А.С., Кузьминова Т.А. Геометрия неидеальных объектов при конструировании и производстве морской техники // *Морские интеллектуальные технологии*. №4 (46) Т.2 2019. с.46-52.
21. Суслов, А. Г. Технология машиностроения: учебник для студентов вузов. Москва: Машиностроение. 2007. 429 с. ISBN 978-5-217-03371-3.
22. Lelyukhi, V. E., Kolesnikova O. V., Ponkratova O. M. Formation Automation of Geometric Configuration of Real Machine Parts. A. A. Radionov et al. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. pp. 111-119. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_13.
23. ГОСТ 2.307-2011. ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений. Москва. Стандартинформ. 2020. 28 с.
Д 50-635-87 Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. (взамен ГОСТ 16319-80 и ГОСТ 16320-80).
25. ГОСТ 25346-2013. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. Москва: Стандартинформ, 2019. 41 с.
ОСТ 2.308-2011. ЕСКД. Указания допусков формы и расположения поверхностей. М.: Стандартинформ, 2023. 29 с.

REFERENCES

1. Polsky EA, Sorokin SP. Improving the reliability of mechanical engineering products by improving the precision analysis of dimensional chains. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2022;6(132):38-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48.
2. Suslov AG, Fedonin ON, Petreshin DI. Basic fundamentals to ensure and increase quality of mechanical engineering and aerospace products. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2020;2:4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10.
3. Kharlamov YuA. Dimensional analysis of technological processes for reconditioning machine parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;5:37-47.
4. Ionov P. A. Dimensions and permissible variations in dimensions of critical parts of foreign machinery units. *Engineering Technologies and Systems [Internet]*. 2022;32(4):520-538. Available from: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.520-538>.
5. Li C, Hou W. Analysis of Assembly Tolerance Based on Assembly Constraint Information Model. *Mathematical Problems in Engineering [Internet]*. 2021;7438966. Available from: <https://doi.org/10.1155/2021/7438966>.
6. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV, Permyakova KN. Geometry Problems in Formalizing the Creation of Machining Processes on Machine Tools. *Digital Manufacturing Technology [Internet]*. 2023;3(2):91-105. Available from: <https://doi.org/10.37256/dmt.3220232865>.
7. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV. Geometry of real objects in shipbuilding and ship repair. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:31-42. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-31-44.
8. Kashuba LA. A modern look at the geometry of real surfaces of mechanical engineering parts. *System Analysis in Science and Education [Internet]*. 2021:1-17. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/145>.
9. Timiryazev VA, Levchuk VI, Avdyushin IV. Identification and calculation of dimensional relationships of a mechanism to determine methods for achieving accuracy during its assembly and dimensional accuracy of component parts. *Vestnik MSTU "Stankin"*. 2024;1(68):87-95.
10. Lealin S. Comparison and evaluation of classical methods of dimensional chains theory and their modern analogues. *Journal of Engineering [Internet]*. 2023;30(4): 20-30. Available from: [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(4\).02](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(4).02).
11. Goetz S, Roth M, Schleich B. Early Robust Design—Its Effect on Parameter and Tolerance Optimization. *Applied Sciences*. 2021;11:9407. 10.3390/app11209407.
12. Li J, Horber D, Grauberger P, Goetz S, Wartzack S, Matthiesen S. Supporting early robust design for different levels of specific design knowledge: an adaptive method for modeling with the Embodiment Function Relation and Tolerance model. *Design Science*. 2024:10.1017/dsj.2024.48.
13. Beylin AB, Tsarfin BA. Research and calculation of the connected dimensional chains by the example of providing indicators of rotary indexing tables accuracy. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;22(3):5-11. 10.37313/1990-5378-2020-22-3-5-1121.
14. Kolesnikova OV, Lelyukhin VE, Ignatev F. Yu. Formation of Schemes Generating Geometric Structure of Machine Parts. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering [Internet]*; 2019. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_38.
15. Tlija M, Korbi A, Louhichi B, Benamara A. A Novel Model for the Tolerancing of Nonrigid Part Assemblies in Computer Aided Design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering [Internet]*. 2019; 19(4). Available from: <https://doi.org/10.1115/1.4043528>.
16. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV. Generative method creating the technology of part machining by cutting. *Bulletin of SUSU. Mechanical Engineering Industry*. 2024;24(4):55-73. DOI: 10.14529/engin240405.
17. Gaer MA, Zhuravlev D.A. Modeling and analysis . 2014;11(94):33-38.
18. Masyagin VB, Mukholzoev AV. Research of features of dimensional analysis of technological processes of products manufacturing, having angular elements, taking into account errors of inclination angles. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2017;1:20-23.
19. Armillotta A. Estimation of cost reduction by tolerance optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;134:1-15. 10.1007/s00170-024-14227-x.
20. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV, Antonenkova TV, Drenin AS, Kuzminova TA. Geometry of non-ideal objects in the design and manufacture of marine facilities. *Marine Intellectual Technologies*. 2019;4(46):46-52.
21. Suslov AG. *Technology of mechanical engineering: textbook for university students*. Moscow: Mashinostroenie; 2007.
22. Lelyukhin VE, Kolesnikova OV, Ponkratova OM. Formation Automation of Geometric Configuration of Real Machine Parts. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering [Internet]*. 2019:111-119. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_13.
23. GOST 2.307-2011. Unified system of design documentation. Drawing of dimensions and limit deviations. Moscow: Standartinform; 2020.
24. RD 50-635-87 Methodological guidelines. Dimensional chains. Basic concepts. Calculation methods for linear and angular chains.

25. GOST 25346-2013. Basic norms of interchangeability. Geometrical product specifications. Code system for tolerances on linear sizes. General provisions, tolerances, deviations and fits. Moscow: Standartinform; 2019.

26. GOST 2.308- 2011. Unified system of design documentation. Representation of limits of forms and surface lay-out on drawings. Moscow: Standartinform; 2023.

Информация об авторах:

Колесникова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, профессор Департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Политехнического института Дальневосточного федерального университета. тел. +79146529780, Scopus-Author ID 57197834906, Research- ID-Web of Science AGF-8364-2022, Author-ID-РИНЦ 703297.

Лелюхин Владимир Егорович – кандидат технических наук, доцент, профессор Департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Политехнического института Дальневосточного федерального университета. тел.

Kolesnikova Olga Valeryevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Computer-Integrated Production Systems, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University. Phone: +79146529780, Scopus-Author ID 57197834906, Re-search-ID-Web of Science AGF-8364-2022, Au-thor-ID-RSCI 703297.

Lelyukhin Vladimir Egorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Computer-Integrated Production Systems at Polytechnic Institute of Far Eastern Federal

+79147235257, ID 57197830453, Research- ID-Web of Science AAE-4074-2022, Author-ID-РИНЦ 654151.

Давыдов Антон Аркадьевич – аспирант Политехнического института Дальневосточного федерального университета.

Горшков Андрей Олегович – аспирант Политехнического института Дальневосточного федерального университета.

Дабалез Мохаммад – аспирант Политехнического института Дальневосточного федерального университета.

University. Phone: +79147235257, Scopus-Author ID 57197830453, Research-ID-Web of Science AAE-4074-2022, Author-ID-RSCI 654151.

Davydov Anton Arkadyevich – Postgraduate Student of Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University.

Gorshkov Andrey Olegovich – Postgraduate Student of Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University.

Dabalez Mohammad – Postgraduate Student of Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 17.02.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Польский Е.А., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 17.02.2026; approved after review on 05.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Polsky E.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.