

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-217-224>

УДК 551.13.15.21.19

Снижение стоимости изделия путем оптимизации конструкторских размерных цепей

Кандидаты техн. наук, доценты Ю. Б. Спесивцева, С. С. Соколовский,
докт. техн. наук, проф. В. Л. Соломахо, студенты Д. С. Кубрин, А. И. Лужинская

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Цель расчета размерных цепей заключается в обеспечении точности замыкающего звена, необходимой для функционирования объекта. Традиционно применяемые методы назначения допусков на составляющие звенья размерной цепи ориентированы на обеспечение их точностной эквивалентности без связи процесса проектирования с производством. На практике точность конструктивных элементов деталей определяет стоимость обработки соответствующих поверхностей, поэтому различные варианты распределения точности замыкающего звена среди составляющих звеньев приводят к различной стоимости изготовления всего комплекта деталей, входящих в размерную цепь. В работе решается задача оптимизации конструкторских размерных цепей по критерию минимальной себестоимости. Комплексный подход решения этой задачи включает методику определения зависимостей «допуск – стоимость», формирование необходимой информационной базы и непосредственно алгоритм оптимизации допусков составляющих звеньев размерной цепи. Определение зависимостей «допуск – стоимость» базируется на методике укрупненного расчета технологической себестоимости с помощью коэффициентов относительной стоимости технологической операции и времени ее выполнения. Полученные зависимости аппроксимируются степенной функцией. Задача оптимизации решается на основе необходимого и достаточного условия существования экстремума с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа. Зависимости для определения оптимизированных допусков звеньев размерных цепей получены для методов «максимума-минимума» и вероятностного. Формирование информационной базы для определения зависимостей «допуск – стоимость» основано на классификации и типизации конструктивных элементов деталей по признакам, определяющим вид обработки и технологическое оборудование. Оптимизация конструкторских размерных цепей на базе предложенного подхода может применяться в условиях массового производства как один из путей снижения себестоимости изделия и обеспечения его конкурентоспособности.

Ключевые слова: конструкторская размерная цепь, минимизация себестоимости, зависимость «допуск – стоимость», оптимизированные допуски, классификация звеньев размерной цепи

Для цитирования: Снижение стоимости изделия путем оптимизации конструкторских размерных цепей / Ю. Б. Спесивцева [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 3. С. 217–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-217-224>

Reducing Cost of Product by Optimizing Design Dimensional Chains

Yu. B. Spesivtseva, S. S. Sokolovsky, V. L. Solomakho, D. S. Kubrin, A. I. Luzhinskaya

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of calculating dimensional chains is to ensure the accuracy of the closing link necessary for the functioning of the object. Traditionally used methods of assigning tolerances to the component links of the dimension chain are aimed at ensuring their accuracy equivalence without linking the design process with production. In practice, the accuracy of the structural elements of the parts determines the cost of processing the corresponding surfaces, therefore, different options for distributing the accuracy of the master link among the component links lead to different costs for manufacturing

Адрес для переписки

Спесивцева Юлия Борисовна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
spesivtseva@bntu.by

Address for correspondence

Spesivtseva Yulija B.
Belorussian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 331-11-20
spesivtseva@bntu.by

the entire set of parts included in the dimensional chain. The paper solves the problem of optimizing design dimensional chains according to the criterion of minimum cost. An integrated approach to solving this problem includes a method for determining the tolerance-cost dependencies, the formation of the necessary information base and directly an algorithm for optimizing the tolerances of the component links of the dimensional chain. The definition of the “tolerance - cost” dependencies is based on the method of aggregated calculation of technological cost using the coefficients of the relative cost of the technological operation and the time of its execution. The obtained dependencies are approximated by power functions. The optimization problem is solved on the basis of the necessary and sufficient condition for the existence of an extremum using the method of indefinite Lagrange multipliers. Dependencies for determining optimized tolerances of links of dimensional chains are obtained for the maximum-minimum and probabilistic methods. The formation of an information base for determining the “tolerance - cost” dependencies is based on the classification and typification of structural elements of parts according to features that determine the type of processing and technological equipment. Optimization of design dimensional chains based on the proposed approach can be used in mass production conditions as one of the ways to reduce the cost of a product and ensure its competitiveness.

Keywords: design dimension chain, cost minimization, “tolerance – cost” relationship, optimized tolerances, classification of links of the dimension chain

For citation: Spesivtseva Yu. B., Sokolovsky S. S., Solomakho V. L., Kubrin D. S., Luzhinskaya A. I. (2025) Reducing Cost of Product by Optimizing Design Dimensional Chains. *Science and Technique*. 24 (3), 217–224. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-217-224> (in Russian)

Введение

Качество изделий продукции машино- и приборостроения, формируемое на этапе производства отдельных деталей и сборочных единиц, во многом определяется требованиями к точности, устанавливаемыми в ходе проектирования. Размерные цепи, являясь универсальным инструментом формализованного представления взаимосвязи структурных единиц изделия любой сложности, используются на многих этапах его создания. Однако особенно значительную роль они играют на этапе проектирования [1]. В общем случае расчет размерных цепей при учете влияющих факторов является гарантией того, что по завершении процесса проектирования будет получен необходимый качественный результат.

Традиционно применяемые на практике методы определения точности составляющих звеньев таких цепей (методы равных допусков, одинаковых квалитетов, пробных расчетов и др.) ориентированы на обеспечение их точностной эквивалентности [2]. В основу этих методов положено допущение, что равноточные звенья цепей характеризуются и одинаковой технологической себестоимостью их реализации. Сам принцип решения прямой задачи расчета размерных цепей традиционным путем не является эффективным в технико-экономическом отношении, поскольку не связывает процесс проектирования допусков размеров с их технологическим обеспечением.

Анализ подходов к расчету размерных цепей

Поиск возможности учета затрат на обработку элементов деталей, определяющих составляющие звенья размерных цепей при решении прямой задачи, ведется давно [3]. Большинство исследований по данной тематике направлено на создание математических алгоритмов формирования базы данных в виде зависимостей допусков размеров от затрат на их обеспечение и оптимизации на этой основе норм точности составляющих звеньев цепей. Как правило, зависимости «точность – стоимость» являются нелинейными, имеют гиперболический характер и описываются разными математическими выражениями, что существенно влияет на выбор метода оптимизации и получаемые результаты. При решении рассматриваемой задачи оптимизации допуски размеров считаются независимыми друг от друга, но существуют подходы, где в той или иной степени учитывается и возможная корреляция допусков, что особенно актуально для селективной сборки [4]. Кроме того, существуют комбинированные расчеты, в которых не только допуски, но и номинальные размеры рассматриваются как переменные [5]. В большинстве случаев допуски в зависимостях «точность – стоимость» рассматриваются как дискретные величины, и если есть непрерывные параметры, то смешанный характер переменных усложняет задачу оптимизации.

Алгоритмы оптимизации могут быть классифицированы как детерминированные и стохастические [6]. Стохастические методы эффективны при использовании сложных функций и учета многих факторов, таких как конкретные операции технологического процесса, припуски на обработку поверхностей деталей и др. Параллельно развивается подход, базирующийся на использовании вычислительного интеллекта в трех основных разновидностях (нейронные сети, эволюционные алгоритмы и нечеткая логика). Многочисленные исследования сосредоточены только на совершенствовании математического алгоритма оптимизации затрат.

Ключевым элементом оптимизации является зависимость «точность – стоимость». Руководствуясь стремлением смоделировать ее как можно точнее, были попытки, кроме учета непосредственно расходов на технологическое воспроизведение элементов деталей, включать также затраты, не имеющие непосредственного отношения к этому процессу и возникающие на протяжении всего жизненного цикла изделия. Рассматривались затраты на контроль, связанные со стоимостью используемых средств измерений и временем измерения, а также с неправильной разбраковкой деталей, обусловленной неопределенностью измерения [7]. Этап технического обслуживания предполагает изменение характеристик изделия после ввода его в эксплуатацию, предлагалось моделировать потери качества на этом временном промежутке и учитывать их при проектировании допусков [8]. Еще один подход к оптимизации допусков рассматривает не только денежные потери для производителя и потребителя, но и воздействия на окружающую среду. Была сформулирована задача двухцелевой оптимизации для минимизации экономических и экологических затрат [9]. В целом такие модели являются неоправданно усложненными, так как многие затраты не поддаются прямому измерению и значительно усложняют алгоритм оптимизации.

Наличие достоверных эмпирических данных о затратах на изготовление отдельных поверхностей деталей различной точности является необходимым условием для создания

адекватной модели зависимости «допуск – стоимость». Большинство исследований базируется на ориентировочных данных, опубликованных в небольшом количестве изданий [10–13]. Не в последнюю очередь производственные данные ограничены по причине их конфиденциальности. Доступная информация о допусках и затратах ограничена и, как правило, касается изготовления конкретных деталей.

Таким образом, общим и наиболее существенным недостатком всех предлагаемых способов экономического обоснования допусков является отсутствие универсальной методики количественной оценки технологической себестоимости и трудоемкости изготовления различных элементов деталей, определяющих составляющие звенья размерных цепей в зависимости от их точности на этапе проектирования.

Технологическая себестоимость и трудоемкость обработки связаны с точностью параметра зависимостями гиперболического вида, так что при увеличении допуска стоимость и трудоемкость обработки уменьшается, причем это уменьшение носит нелинейный характер. Допуски на составляющие звенья определяют стоимость обработки соответствующих определяющих поверхностей, поэтому различные варианты распределения точности замыкающего звена среди составляющих звеньев цепи приводят к разной стоимости изготовления всего комплекта деталей, входящих в расчетную схему. При нормировании точности составляющих звеньев встает задача определения оптимальных значений их допусков. Для ее решения необходим эффективный механизм количественной оценки себестоимости воспроизведения составляющих звеньев размерных цепей в зависимости от назначенных допусков. Традиционные методики количественной оценки себестоимости изготовления деталей являются трудоемкими и, как правило, не подходят для этапа проектирования, так как основываются на детальной информации о технологических процессах (применяемом технологическом оборудовании и оснастке, квалификации персонала, режимах резания и др.).

Комплексный подход решения задачи оптимизации размерных цепей

Комплексный подход к решению задачи оптимизации конструкторских размерных цепей предполагает наличие методики определения зависимостей «допуск – стоимость» и необходимой информационной базы для построения таких зависимостей по предлагаемой методике, а также непосредственно алгоритма и соответствующего математического обеспечения оптимизации допусков составляющих звеньев размерной цепи.

На первом этапе формулируется задача, для решения которой рассчитывается размерная цепь, определяется метод расчета (метод «максимума-минимума» или вероятностный). Выявляется замыкающее звено на основе требований к точности, которым должно удовлетворять изделие или сборочная единица, назначается его номинальный размер и допускаемые отклонения. При вероятностном расчете выбирается процент риска выхода замыкающего звена за пределы интервала (поля) допуска. Выявляются составляющие звенья размерной цепи, для каждого из которых определяется возможный диапазон допусков, исходя из принципа экономической целесообразности.

Определение зависимостей «допуск – стоимость» основывается на методике укрупненно-го расчета технологической себестоимости получения поверхностей, определяющих звенья размерной цепи различных уровней точности.

Для выполнения таких расчетов предлагается использовать следующее общее уравнение:

$$C = \sum_{i=1}^n q_i t_i,$$

где C – технологическая себестоимость получения элемента конструкции детали; q_i – коэффициент относительной стоимости i -й технологической операции, приведенный к единице времени; t_i – время, затрачиваемое на выполнение i -й технологической операции; n – общее количество операций технологического процесса получения элемента конструкции детали.

Для определения коэффициентов q_i рекомендуется применение обобщенного подхода, базирующегося на использовании предварительно рассчитанных укрупненных нормативов себестоимости использования необходимого технологического оборудования (станочного, контрольно-измерительного и пр.) соответствующих типоразмеров [14]. В общем случае нормативы должны учитывать затраты, приходящиеся на один час работы оборудования: на заработную плату (с отчислениями) основных и вспомогательных рабочих; амортизацию и ремонт оборудования; вспомогательные материалы, необходимые для обслуживания оборудования; амортизацию и ремонт приспособлений; амортизацию, ремонт и заточку режущего инструмента; содержание зданий; общие цеховые расходы. Для построения оценочной шкалы рассматриваемых коэффициентов предлагается выбрать станок-представитель и принять его за базу с коэффициентом, равным единице. Коэффициенты относительной стоимости технологических операций, выполняемых на других станках, определяются отношением

$$q_i = \frac{C_i}{C_6},$$

где C_i , C_6 – нормативы затрат, приходящихся на один час работы базового и i -го оборудования.

Необходимым условием для получения достоверных оценок таких коэффициентов является сопоставимость стоимостных показателей, для чего они должны относиться к одному и тому же временному интервалу.

Для оценки времени, затрачиваемого на выполнение i -й технологической операции, рекомендуется использовать нормативы штучного времени технологических переходов [15], так как они содержат все подлежащие учету составляющие, зависящие от размеров, конфигурации, материала и точности обрабатываемого элемента: время основное, вспомогательное и затрачиваемое на отдых и организационно-техническое обслуживание.

Полученные зависимости «допуск – стоимость» предлагается аппроксимировать с использованием степенной функции

$$F(\delta) = A + B\delta^p,$$

где δ – допуск, определяющий требование к точности рассматриваемого элемента; A, B, p – параметры аппроксимирующей функции, определение значений которых при установлении практически реальных границ допусков по методу наименьших квадратов сводится к нелинейной задаче оптимизации.

Оптимизационный расчет размерной цепи

Целью расчета является минимизация суммарной технологической себестоимости C воспроизведения размерной цепи при условии, что допуск замыкающего звена δ_Σ равен сумме допусков составляющих звеньев δ_i .

Допустимая область изменения управляемых параметров δ_i задается ограничением в виде равенства, зависящего от выбранного метода расчета:

– для метода «максимума-минимума»

$$\delta_\Sigma - \sum_{i=1}^n \delta_i = 0;$$

– для вероятностного метода

$$\delta_\Sigma - \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 \delta_i^2} / k_\Sigma = 0,$$

где k_Σ, k_i – коэффициенты относительного рассеяния размеров, определяющих замыкающее и составляющие звенья размерной цепи.

Наличие обобщенного аналитического описания для искомых зависимостей позволяет получить решение поставленной задачи оптимизации, используя известное необходимое и достаточное условие существования экстремума (первая производная функции в этой точке равна нулю, вторая производная – больше нуля). В нашем случае, поскольку функциональные ограничения заданы в виде равенств, переход к задаче безусловной оптимизации можно осуществить с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа. На основе целевой

функции $F(\delta_i)$ и функциональных ограничений формируется новая функция $L(\delta, \lambda)$

$$L(\delta, \lambda) = F(\delta_i) + \lambda\Psi,$$

где $L(\delta, \lambda)$ – функция Лагранжа; λ – множитель Лагранжа; $\Psi = 0$ – ограничение в виде равенства, соответствующее методу расчета размерной цепи.

В нашем случае вектор управляемых параметров образуют допуски составляющих звеньев $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, выражение для $F(\delta_i)$ представляет собой функцию зависимости суммарной стоимости воспроизведения размерной цепи от допусков составляющих ее звеньев, ограничение Ψ только одно, и им является равенство суммы допусков составляющих звеньев допуску замыкающего звена. Множитель λ по этой причине будет единственным.

Чтобы найти значение неизвестного множителя λ , должна быть решена система алгебраических уравнений, выражающих необходимые условия экстремума функции Лагранжа:

$$\frac{dL(\delta_i, \lambda)}{d\delta_i} = \frac{F(\delta_i)}{d\delta_i} + \frac{\Psi}{d\delta_i} = 0.$$

Функция Лагранжа $L(\delta, \lambda)$ и целевая функция $F(\delta_i)$ имеют точку пересечения в области допустимых их значений, так как $\Psi = 0$. Поэтому если оптимальное значение функции Лагранжа найдено, то оно будет одновременно и условным оптимумом целевой функции $F(\delta_i)$.

Полученные зависимости для определения оптимизированных допусков звеньев конструкторских размерных цепей имеют вид:

– для метода «максимума-минимума»

$$\delta_i = e^{\frac{1}{p_i-1} \ln\left(\frac{\lambda}{B_i p_i}\right)},$$

– для вероятностного метода

$$\delta_i = \frac{k_\Sigma}{k_i} \sqrt{e^{\frac{1}{p_i/2-1} \ln\left[\frac{\lambda}{B_i k_\Sigma^{p_i} p_i} / 2k_i^{p_i}\right]}}.$$

Координаты середин полей допусков составляющих звеньев размерной цепи назначают таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$em_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (em_i + \alpha_i \delta_i) - \alpha_{\Sigma} \delta_{\Sigma},$$

где em_i , em_{Σ} – средние отклонения составляющих и замыкающего звеньев; α_i , α_{Σ} – коэффициенты относительной асимметрии распределений составляющих и замыкающего звеньев.

Формирование информационной базы для определения зависимостей «допуск – стоимость»

Формирование информационной базы основано на классификации и типизации конструктивных элементов деталей, определяющих составляющие звенья размерных цепей, по признакам, необходимым для выбора возможных вариантов технологических операций их обработки, к которым в первую очередь можно отнести: типы поверхностей конструктивных элементов деталей, определяющих звено, их размеры, твердость обрабатываемых поверхностей, серийность производства.

В качестве базовых при этом предлагается принимать звенья с единичной протяженностью и «средней» твердостью. Необходимые модификации базового звена могут быть получены за счет использования определенного набора корректирующих коэффициентов, учитывающих отличительные особенности каждого реального звена по отношению к базовому его варианту. Каждое составляющее звено размерной цепи может состоять из одной или нескольких элементарных поверхностей, точность размеров, формы и расположения которых определяют точность звена. Определение себестоимости воспроизведения составляющих звеньев различных уровней точности может быть сведено к нахождению суммы себестоимостей получения типовых поверхностей, определяющих звенья.

Классификация и типизация звеньев по конструктивно-технологическим признакам

должны в той или иной степени отражать все существенные индивидуальные особенности деталей, количество которых велико. Нами предлагается в основу построения такой системы классификации положить критерии, определяющие вид обработки и необходимое технологическое оборудование, а именно:

- вид параметра, определяющего звено (линейный размер, угловой размер, отклонение формы поверхности, отклонение расположения поверхностей);
- вид детали, элемент конструкции которой входит в размерную цепь (тело вращения, не тело вращения);
- размеры детали (несколько размерных групп);
- форму поверхности, определяющей звено (плоская, цилиндрическая, коническая);
- наличие ограничительных элементов.

Разделение звеньев по номинальным размерам на группы логично осуществлять в соответствии с общепринятым делением на размерные интервалы нормируемых элементов деталей в рамках Единой системы допусков и посадок, принятой в машиностроении в трех диапазонах: малые размеры – до 1 мм, средние размеры – свыше 1 до 500 мм и большие размеры – свыше 500 до 3150 мм. За параметры резания (глубина, подача и скорость) предлагается принимать усредненные значения для некоторого диапазона размеров, например диаметров – для цилиндрических деталей, ширины фрезерования – для плоских.

В основу классификации звеньев по точности наиболее рационально положить существующие градации уровней точности конструктивных элементов деталей по линейным и угловым размерам (качества точности линейных размеров по ГОСТ 25346–2013, степени точности углов по ГОСТ 8908–81), а также отклонениям формы и расположения поверхностей (степени точности по ГОСТ 24643–81).

Твердость материала определяет выбор параметров технологического процесса и сказывается на себестоимости воспроизведения обрабатываемых поверхностей деталей, поэтому звенья также необходимо группировать по обрабатываемости их определяющих элементов.

ВЫВОДЫ

1. Оптимизация конструкторских размерных цепей по критерию обеспечения требуемой точности замыкающего звена при минимальной стоимости изготовления комплекта деталей, входящих в размерную цепь, остается актуальной задачей. Для ее решения предложен комплексный подход, включающий методику определения зависимостей «допуск – стоимость», принципы формирования необходимой информационной базы и соответствующее математическое обеспечение.

2. Методика определения зависимостей «допуск – стоимость» конструктивных элементов деталей, являющихся звеньями размерных цепей, основана на укрупненном нормировании затрат, приходящихся на один час работы оборудования и нормативах штучного времени технологических переходов.

3. Полученные аналитические выражения для определения допусков звеньев размерных цепей могут быть использованы для методов расчета «максимума-минимума» и вероятностного.

4. Формирование информационной базы основано на классификации конструктивных элементов деталей по признакам, определяющим выбор технологических операций.

5. Снижение затрат на изготовление деталей, входящих в размерную цепь, может рассматриваться как существенное конкурентное преимущество в условиях серийного и массового производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев, П. Ф. Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. М.: Иновационное машиностроение, 2021. 400 с.
2. Размерный анализ конструкций: справ. / С. Г. Бондаренко, О. Н. Чередников, В. П. Губий, Т. М. Игнатцев; под общ. ред. С. Г. Бондаренко. Киев: Тэхника, 1989. 150 с.
3. Roth, M. From Tolerance Allocation to Tolerance-Cost Optimization: A Comprehensive Literature Review / M. Roth, B. Schleich, S. Wartzack // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 107. P. 4859–4912. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05254-5>.

4. Chen, M. S. Optimising Tolerance Allocation for Mechanical Components Correlated by Selective Assembly / M. S. Chen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1996. Vol. 12. P. 349–355. <https://doi.org/10.1007/bf01179810>.
5. Rout, B. K. Simultaneous Selection of Optimal Parameters and Tolerance of Manipulator Using Evolutionary Optimization Technique / B. K. Rout, R. K. Mittal // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. Vol. 40. P. 513–528. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0368-2>.
6. Siddique, N. Nature Inspired Computing: An Overview and Some Future Directions / N. Siddique, H. Adeli // *Cognitive Computation*. 2015. Vol. 7. P. 706–714. <https://doi.org/10.1007/s12559-015-9370-8>.
7. Moroni, G. Early Cost Estimation for Tolerance Verification / G. Moroni, S. Petro, T. Tolio // *CIRP Annals*. 2011. Vol. 60, No 1. P. 195–198. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.010>.
8. Zhao, Y. M. Optimal Tolerance Design of Product Based on Service Quality Loss / Y. M. Zhao, D. S. Liu, Z. J. Wen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 82. P. 1715–1724. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7480-9>.
9. Hoffenson, S. Tolerance Optimization Considering Economic and Environmental Sustainability / S. Hoffenson, A. Dagman, R. Söderberg // *Journal of Engineering Design*. 2014. Vol. 25, No 10–12. P. 367–390. <https://doi.org/10.1080/09544828.2014.994481>.
10. Trucks, H. E. *Designing for Economical Production* / H. E. Trucks. Rochester: Society of Manufacturing Engineers, 1974. 221 p.
11. Dieter, G. E. *Engineering Design: A Materials and Processing Approach* / G. E. Dieter. New York: McGraw-Hill, 1983. 592 p.
12. Johnson, R. C. The Cost of Finishes and Tolerances / R. C. Johnson // *Journal of the American Society of Naval Engineers*. 1958. Vol. 70, No 4. P. 607–614. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1958.tb01777.x>.
13. Jamieson, A. *Introduction to Quality Control* / A. Jamieson. Reston: Reston Publ. Co, 1982. 237 p.
14. Великанов, К. М. Расчеты экономической эффективности новой техники: справ. / К. М. Великанов. Л.: Машиностроение, 1989. 430 с.
15. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Ч. 1. Нормативы времени. Дата актуализации 01.01.2021.

Поступила 10.03.2025

Подписана в печать 21.05.2025

Опубликована онлайн 30.05.2025

REFERENCES

1. Dunaev P. F., Lelikov O. P. (2021) *Calculation of Dimensional Tolerances*. Moscow, Innovatsionnoe Mashinostroenie Publ. 400 (in Russian).

2. Bondarenko S. G., Cherednikov O. N., Gubii V. P., Ignatsev T. M. (1989) *Dimensional Analysis of Structures*. Kiev, Tekhnika Publ. 150 (in Russian).
3. Roth M., Schleich B., Wartzack S. (2020) From Tolerance Allocation to Tolerance-Cost Optimization: A Comprehensive Literature Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 4859–4912. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05254-5>.
4. Chen M. S. (1996) Optimising Tolerance Allocation for Mechanical Components Correlated by Selective Assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12. P. 349–355. <https://doi.org/10.1007/bf01179810>.
5. Rout B. K., Mittal R. K. (2009) Simultaneous Selection of Optimal Parameters and Tolerance of Manipulator Using Evolutionary Optimization Technique. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 40, 513–528. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0368-2>.
6. Siddique N., Adeli H. (2015) Nature Inspired Computing: An Overview and Some Future Directions. *Cognitive Computation*, 7, 706–714. <https://doi.org/10.1007/s12559-015-9370-8>.
7. Moroni G., Petro S., Tolio T. (2011) Early Cost Estimation for Tolerance Verification. *CIRP Annals*, 60 (1), 195–198. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.010>.
8. Zhao Y. M., Liu D. S., Wen Z. J. (2016) Optimal Tolerance Design of Product Based on Service Quality Loss. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1715–1724. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7480-9>.
9. Hoffenson S., Dagman A., Söderberg R. (2014) Tolerance Optimization Considering Economic and Environmental Sustainability. *Journal of Engineering Design*, 25 (10–12), 367–390. <https://doi.org/10.1080/09544828.2014.994481>.
10. Trucks H. E. (1974) *Designing for Economical Production*. Rochester, Society of Manufacturing Engineers. 221.
11. Dieter G. E. (1983) *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*. New York, McGraw-Hill. 592.
12. Johnson R. C. (1958) The Cost of Finishes and Tolerances. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 70 (4), 607–614. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1958.tb01777.x>.
13. Jamieson A. (1982) *Introduction to Quality Control*. Reston, Reston Publ. Co. 237.
14. Velikanov K. M. (1989) Calculations of Economic Efficiency of New Technology. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 430 (in Russian).
15. General Machine-Building Standards for Cutting Time and Modes for Standardizing Work Performed on Universal and Multi-Purpose Machines with Numerical Control. Part 1. Time standards. Update date: 01.01.2021.

Received: 10.03.2025

Accepted: 21.05.2025

Published online: 30.05.2025