

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №6 (132). С. 38-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №6 (132). P. 38-48.

Научная статья  
УДК 621.9.04  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48

## **Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей**

**Евгений Александрович Польский<sup>1</sup>**, к.т.н.,  
**Сергей Владимирович Сорокин<sup>2</sup>**, к.т.н.

<sup>1,2</sup> *Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия*  
<sup>1,2</sup> polski.eugene@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Предложена концепция конструкторско-технологического обеспечения точности конструктивных размеров и корректировки точности функциональных размеров отдельных деталей, а также обеспечения показателей надежности узлов по критериям повышения технологичности конструкции.*

***Ключевые слова:** размерный анализ, надежность, эксплуатационные свойства, параметры качества*

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

Original article

## **Improving the reliability of mechanical engineering products by improving the precision analysis of dimensional chains**

**Evgeny Alexandrovich Polski<sup>1</sup>**, Can. Sc. Tech.,  
**Sergey Vladimirovich Sorokin<sup>2</sup>**, Can. Sc. Tech.,  
*Bryansk State Technical University,*

<sup>1,2</sup> polski.eugene@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Abstract:** the article proposes the concept of design and technological provision of the accuracy of the design dimensions and the adjustment of the accuracy of the functional dimensions of individual parts, as well as ensuring the reliability indicators of the units according to the criteria for improving the manufacturability of the design.*

***Keywords:** dimensional analysis, reliability, performance, quality parameters*

***For citation:** Polski E.A., Sorokin S.V. Improving the reliability of mechanical engineering products by improving the precision analysis of dimensional chains. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.6 (132), pp. 38-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48*

Одним из основных направлений повышения конкурентоспособности изделия является сокращение сроков подготовки производства, при одновременном повышении требований к качеству проектирования. Это приводит к необходимости в рамках конструкторско-технологической подготовки производства параллельной разработки конструкторской и технологической документации с одновременным согласованием параметров точности и качества поверхностей деталей между проектировщиками и технологическими подразделениями.

Вследствие вышесказанного создаются предпосылки реализации принципиально нового подхода проектирования – технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств машин и показателей их надежности при одновременном проектировании технологии механической обработки с уточнением параметров сборки, а также корректировке предельных отклонений функциональных размеров в конструкторской документации. Такой подход при реализации этапов разработки и постановки продукции на производство предполагает управление параметрами точности и качества функциональных поверхностей деталей узла элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Принцип параллельного проектирования конструкции узла и этапов его изготовления актуален при любом типе производства и любой сложности технического проекта [1].

В настоящее время общепризнанными являются два направления технологического обеспечения качества машин и его основного показателя надежности: двухступенчатое через нормирование параметров точности и качества поверхностей деталей на этапе конструкторской подготовки производства и последующего назначения методов и режимов обработки при проектировании технологического процесса обработки и одноступенчатое через назначение способа формирования поверхностного слоя, обеспечивающего установленное оптимальное соотношение параметров точности и качества функциональных поверхностей по критерию достижения эксплуатационных свойств [2].

Одним из критериев качества изделия является его технологичность, отработка которой на всех стадиях жизненного цикла включена в обязательные требования стандартов серии ISO 9000.

Основным инструментом обеспечения технологичности взаимосвязанных деталей и, соответственно, определения технологической рациональности конструкторских решений являются анализ и синтез размерных связей. Для достижения установленных показателей надежности требуется обеспечить параметры точности и качества функциональных поверхностей отдельных деталей, которые регламентируются на этапе проектирования изделия и обеспечиваются во время их изготовления.

Одним из направлений сокращения сроков освоения и улучшения качества выпускаемых машин является широкое применение в практике конструирования расчетных принципов определения качественных показателей изделий. Эти показатели (надежность; долговечность; наработка на отказ и др.) в значительной мере зависят от правильного выбора характера сопряжения, допусков размеров, формы и расположения поверхностей или элементов деталей. Поэтому важной задачей, решаемой в процессе проектирования машин, является установление связей между геометрическими характеристиками машины и ее служебным назначением и разработка норм точности на отклонение этих характеристик.

Анализ размерных связей является одним из основных инструментов как для расчета геометрической точности конструкций машин с определением номинальных значений размеров, их отклонений и допусков, так и для анализа правильности простановки размеров и отклонений на рабочих чертежах деталей, расчета межоперационных размеров, припусков, определения необходимой точности приспособлений и т.д.

Традиционным считается выполнения анализа размерных связей при проектировании в два этапа: расчет конструкторских размерных цепей и расчет технологических размерных цепей [1].

Главным недостатком исследований в области анализа размерных связей является отсутствие научно обоснованных рекомендаций, учитывающих изменение фактических сопряжений с учетом условий и особенностей эксплуатации узлов и изделий. Несомненно, что при эксплуатации размерные связи не остаются постоянными [3]. В этой связи необходимо учитывать воздействие на изменение формы и размеров сопрягаемых поверхностей внутренних (механические свой-

ства материала) и внешних (параметры качества поверхностного слоя) факторов.

Для решения этой задачи вводим в расчетные схемы дополнительные размеры – эксплуатационные. Они описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия [4].

Проанализировав несколько подходов к решению размерных связей и методик в области этих исследований зарубежных и отечественных ученых, для решения размерных цепей был выбран метод прямой линеаризации (Direct Linearization Method) использующий описание сборки как цепи векторов.

В векторной форме уравнение размерной цепи в общем случае представляется в простейшем виде [5]:

$$\vec{A}_\Delta = \sum_i^n \vec{A}_i \text{ и } \vec{T}_\Delta = \sum_i^n \vec{T}_i,$$

где  $n$  – количество составляющих размеров в цепи.

В пространственную размерную цепь могут входить не только линейные, но и угловые размеры, поэтому общее векторное уравнение следует раскладывать на линейные проекции и на угловые.

В общем виде, используя матричную форму представления, это можно записать в виде выражения:

$$\{T_\Delta\} = [A_{ji}] \cdot \{T\},$$

где  $[A_{ji}]$  – матрица, содержащая частные производные, описанные выше;  $\{T_\Delta\}$  – вектор-столбец, содержащий допуск замыкающего звена;  $\{T\}$  – вектор-столбец, содержащий допуски составляющих размеров цепи.

Для того чтобы учесть влияние на точность замыкающего звена различных эксплуатационных свойств сопрягаемых функциональных поверхностей, вводим в размерную цепь новые составляющие размеры, которые будут описывать изменение размерных связей в процессе работы узла и машины в целом [6].

Уравнение такой размерной цепи имеет вид:

$$\vec{T}_\Delta = \sum_i^n \vec{T}_i + \sum_j^m \vec{T}_{\text{эк},j},$$

где  $T_{\text{эк}}$  – допуски на эксплуатационные размеры, существенно воздействующие на точность замыкающего звена.

В общем виде допуск линейного замыкающего звена складывается из допусков составляющих звеньев в каждой из проекций с учетом угловых размеров

$$T_\Delta \geq \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^\mu + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\text{эк},k})^\mu} \right)^2},$$

где  $t$  – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений звена за пределы допуска;  $\lambda$  – коэффициенты относительного среднеквадратичного отклонения;  $\beta$  – коэффициент расширения допуска;  $\mu$  – коэффициент степени, учитывающий метод расчета размерных цепей.

При обеспечении точности замыкающего звена в пространственной размерной цепи методом максимума минимума ( $\mu = 1$ ) выражение принимает вид:

$$\begin{aligned} T_\Delta &= \frac{1}{\beta} \sqrt{\sum_i^3 \left( \sum_j^{n-1} B_{ij} T_j + B_{y_{ei}} T_{y_{e}} \right)^2} = \\ &= \frac{1}{\beta} \sqrt{\sum_i^3 \left( d_i^2 + 2d_i B_{y_{ei}} T_{y_{e}} + B_{y_{ei}}^2 T_{y_{e}}^2 \right)}. \\ T_\Delta^2 \beta^2 &= \sum_i^3 d_i^2 + 2T_{y_{e}} \sum_i^3 B_{y_{ei}} d_i + T_{y_{e}}^2 \sum_i^3 B_{y_{ei}}^2, \end{aligned}$$

где  $d_i = \sum_j^{n-1} B_{ij} T_j$ .

Наиболее сложным и трудоемким процессом в рамках расчета размерных цепей является назначение технически обоснованных допусков на составляющие звенья (задача синтеза). На практике применяют несколько основных методов назначения допусков: попыток, равного качества, равного допуска, пропорционального влияния и метод экономически обоснованных допусков. Для решения задачи оптимизации проектирования технологического процесса в большей степени подходит метод экономически обоснованных допусков. Его суть заключается в обеспечении минимальной себестоимости изготовления всего комплекта составляющих размеров для заданной точности исходного (замыкающего) звена [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\text{эк}k})^{\mu}} \right)^2} \leq T_{\Delta}, \\ \sum_{i=1}^{n+m} S_i \rightarrow \min \end{array} \right.$$

где  $S_i$  – функция себестоимости выполнения  $i$ -го составляющего размера;  $n$  – количество конструктивных составляющих размеров;  $m$  – количество эксплуатационных составляющих размеров.

Другим возможным методом решения прямой задачи является назначение допусков составляющих размеров с учетом вероятности безотказной работы  $P(t)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{\text{эк}k})^{\mu}} \right)^2} \leq T_{\Delta}, \\ 1 - P(t) \leq [Q], \end{array} \right.$$

где  $[Q]$  – величина допустимого брака.

$$P(t) = 0,5 + \hat{\sigma} \left( \frac{T_{\Delta} - T_0 - \gamma_{\text{нб}} t}{\sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \sigma_{\gamma}^2(t)^2}} \right),$$

где  $t$  – срок службы машины, в течение которого необходимо обеспечить вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;  $\Phi(x)$  – стандартное нормальное распределение функции;  $T_0$  – допуск замыкающего звена после изготовления и сборки машины, равный допуску составляющих размеров на этот момент времени;  $\gamma$  – скорость изменения размера замыкающего звена во времени;  $\sigma$  – средне-квадратические отклонения соответствующих параметров.

Из проанализированных схем формирования точности замыкающего звена видно, что уравнение размерной цепи можно представить в форме:

$$T_{\Delta} = \sum_i^n c_i T_i + \sum_j^m c_j k_{\text{внут}j} k_{\text{внеш}j} k_{T_{\text{эк}j}},$$

где  $c$  – коэффициент передаточного отношения;  $k_{\text{внеш}j}$  – коэффициент, характеризующий зависимость допуска  $j$ -го эксплуатационного размера от внешних факторов;  $k_{\text{внут}j}$  – коэффициент, характеризующие зависимость допуска  $j$ -го эксплуатационного размера от

внутренних факторов;  $k_{T_{\text{эк}}}$  – коэффициент учитывающий погрешности расчетной модели определения эксплуатационных свойств.

В случае решения прямой задачи по назначению номинальных размеров, допусков, верхних и нижних отклонений размеров, когда отказ в форме выхода параметра точности за определенную границу (выброс) не приводит к значительным отрицательным последствиями, регламентироваться может параметр потока отказов  $\mu$ . При известной плотности совместного распределения параметра состояния  $z(t)$  и скорости его изменения во времени  $v(t)$  усредненный параметр потока отказов, определяющий число выбросов за границы в единицу времени [7]:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int_0^{\infty} \phi(R_2, v/t) v dv + \int_{-\infty}^0 \phi(R_1, v/t) v dv \right] dt$$

В общем случае надежность объекта, качество его функционирования определяется не одним, а совокупностью  $s$  выходных параметров состояния  $z, z_1, \dots, z_s$ , которые можно считать компонентами некоторого вектора  $Z$ . Тогда пространство состояний некоторой граничной поверхностью  $\omega$  можно разделить на две области: область  $\Omega$  работоспособных состояний и область отказов. Показатели надежности, в частности безотказность, в этом случае определяется как вероятность того, что за время функционирования системы  $T$  параметры состояния не выходят за соответствующие границы  $R_{i1}$  и  $R_{i2}$ :

$$P(T) = P\{Z \in \Omega / t \leq T\} = P\{R_{11} < z_1 < R_{12}, \\ R_{21} < z_2 < R_{22}, \dots, R_{s1} < z_s < R_{s2} / t \leq T\}$$

Наиболее общий случай, когда исходное качество всех объектов неоднородно, условия эксплуатации переменны, средняя скорость процесса зависит от времени функционирования. Неоднородность качества может быть вызвана рассеянием начальных размеров, а так же различием параметров качества у контактирующих поверхностей, приводящих к варьированию средней скорости процесса каждой реализации [4].

Для описания дополнительных эксплуатационных звеньев размерной цепи преобразованы известные зависимости соотношения параметров качества поверхности и эксплуатационных показателей. Так в плоском контакте сопряженных деталей и при наличии

между ними небольших осциллирующих движений, например вследствие вибраций, происходит изнашивание. При этом величина внедрения  $U_1$  и  $U_2$  и возможный перекося поверхностей можно описать уравнением плоскости в пространстве:

$$U_1 + U_2 = \beta_1 x + \beta_2 y + U_{\min},$$

где  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – коэффициенты уравнения плоскости, соответствующие тангенсам углов наклона плоскости износа к соответствующим осям;  $U_{\min}$  – минимальное сближение в контакте.

Коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и параметр  $U_{\min}$  для такой расчетной схемы можно определить

$$\beta_1 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{ab^3}(b - 2l_{px});$$

$$\beta_2 = \frac{6P(k_1 + k_2)Vt}{a^3b}(a - 2l_{py});$$

$$U_{\min} = \frac{P(k_1 + k_2)Vt}{a^2b^2}(6al_{px} + 6bl_{py} - 7ab).$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты износа, характеризующие фрикционные свойства;  $P$ ,  $V$ ,  $t$ ,  $l_{px}$ ,  $l_{py}$  – параметры эксплуатации сопряжения;  $a$ ,  $b$  – геометрия сопряжения [3].

Из полученных выражений выделяются параметры характеризующие внешние факторы эксплуатационных размеров  $k_{\text{внеш } j}$ . Аналогичным образом выделяются параметры определяющие внутренние факторы  $k_{\text{внут } j}$  и далее относительно определенного единичного или комплексного параметра качества поверхностного слоя выполняется решение задачи.

Также следует обратить внимание на вид эксплуатационных звеньев. Их можно разделить на звенья, имеющие условно постоянный размер, и звенья, имеющие условно переменный размер во времени. К первым относятся эксплуатационные размеры, связанные с деформациями контактирующих поверхностей, а ко вторым – с изнашиванием поверхностей. При этом переменный во времени размер является некоторой постоянной величиной для всего периода эксплуатации узла или машины. С другой стороны, вид эксплуатационного звена определяет значения их номиналов и допусков.

В качестве основных положений и методик расчета поверхностей на трение и износ при скольжении приняты зависимости, изложенные в работах Сулова А.Г. Преобразовав зависимости с учетом требований по возмож-

ности метрологического контроля, технологического управления и приоритетности параметров качества, влияющих на износостойкость, получаем [8]:

$$I_h \cdot C_M = C_R$$

где  $C_R$  – комплексный параметр, характеризующий зависимость интенсивности изнашивания поверхности от параметров качества поверхностного слоя;  $C_M$  – комплексный параметр, зависящий от механических свойств материала контактирующей детали:

$$C_R = \frac{(Wz \cdot H \max)^{1/6}}{Sm^{0.5} \cdot \lambda \cdot (k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \cdot Ra^{2/3} \cdot (Rp - Ra)^{0.5}$$

$$C_M = \frac{n}{43,47 \cdot (p \cdot \pi)^{7/6}} \cdot \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}$$

Определение значений коэффициентов  $k_{\text{внеш } j}$  и  $k_{\text{внут } j}$  внешних и внутренних факторов эксплуатационных звеньев-износов для заданного прототипа и с учетом требований по долговечности позволит обосновать выбор материалов, смазки, параметров качества поверхности.

Выделение из эксплуатационного допуска  $k_{\text{внеш } j}$  и  $k_{\text{внут } j}$  удобно при выполнении прямой задачи размерного анализа. Вместе с коэффициентами передаточных отношений, эти новые коэффициенты позволяют сравнивать относительную значимость воздействия различных эксплуатационных звеньев на точность замыкающего звена. Другими словами, можно видеть, к каким поверхностям предъявляются более высокие требования (по точности для обычных технологических звеньев и по параметрам качества поверхностного слоя для эксплуатационных звеньев) [7].

В качестве управляющего воздействия при решении задачи обеспечения наработки узла на отказ можно принять формирование установленного значения коэффициента зависящего от механических свойств материала и определяющего их требуемые значения ( $k_{\text{внут } j}$ ). При проектировании недостаточная обоснованность выбора материалов для деталей пар трения скольжения снижает срок службы машин и агрегатов, увеличивает количество ремонтов.

Одним из путей повышения надежности и долговечности деталей и узлов является технология нанесения покрытий как способ создания поверхностных слоев на изделиях с требуемыми свойствами [9].

К настоящему времени объем материалов покрытий достиг массовых размеров, количество способов создания покрытий, описанных в литературе, составляет несколько сотен, требования к покрытиям постоянно возрастают в связи с интенсификацией промышленного производства. В то же время специалисты (конструкторы, технологи, механики, строители, ремонтники) остаются без методики выбора оптимального способа создания покрытия, у них нет подготовки по теории и практике нанесения материала.

Исходя из вышеизложенного, необходимо разработать научно обоснованную методику выбора способа и режимов получения покрытий. Это должен быть алгоритм программной реализации средствами компьютерного моделирования с исходными параметрами, отражающими условия эксплуатации, конструкторские и технологические требования, характер производства, задачи, условия внешнего воздействия и другие аспекты создания композитного изделия. Геометрия детали и условия эксплуатации являются основными факторами при выборе присадочного материала и способа его нанесения.

Выделяют следующие основные виды внешнего воздействия на изделие: окружающая среда, температура и нагрузка. Каждый вид внешнего воздействия определяется характером и параметрами: среда – состоянием, химической активностью и давлением; температура – характером температурного поля и величиной; нагрузка – характером, разнообразием и величиной. Кроме того, на материалы изделий оказывают влияние энергетические поля: электрические, гравитационные и др.

Создание композита, согласно одной из моделей, осуществляется путем прикрепления к поверхности основания присадочного материала, выполненного в виде слоя толщиной 0,05...20 мм и более. Вторая модель предусматривает активацию наполнителя и поверхностного слоя основы до состояния, из которого они самопроизвольно создают покрытие и его соединение с основой. Третья – это технология, при которой покрытие создается путем химической обработки поверхностного слоя основы. Четвертая – это технология, при которой покрытие формируется путем обработки поверхностного слоя основы энергетическими полями [10].

Методика выбора способа и режимов получения покрытий представляет собой алго-

ритм, реализованный в программе с помощью компьютерного моделирования. Исходными данными являются параметры, отражающие условия эксплуатации, конструкторские и технологические требования, характер производства, поставленные задачи, условия внешнего воздействия и другие аспекты создания композиционного изделия.

Выбор материала для покрытий производится по следующим критериям: функциональные характеристики материала в условиях эксплуатации композиционного изделия (долговечность); влияние материала покрытия на прочность композиционного изделия (надежность); химическая и физическая совместимость сырья в условиях эксплуатации; применимость; дефицитность и стоимость [9].

Функциональные характеристики композитного изделия (износостойкость, коррозионная стойкость, контактная прочность и др.) определяются функциональными характеристиками материала покрытия.

Исследования химической совместимости исходных материалов проводятся для деталей, работающих при температурах, при которых взаимная диффузия приводит к изменению химического состава и структуры в зоне соединения или всего покрытия. При образовании низкопрочных, хрупких соединений, снижающих надежность и долговечность композитов, следует перейти к следующему материалу с высокими функциональными свойствами; при положительном результате продолжить исследование выбранного материала.

Испытания на физическую совместимость проводятся для деталей, работающих в условиях циклического нагрева и охлаждения. Изменение размеров посадки оценивается по разнице коэффициентов линейного расширения исходных материалов.

На последнем этапе выбранные методы ранжируются по технико-экономическим показателям. Основными требованиями к композитным изделиям со стороны эксплуатации являются надежность и долговечность.

В качестве выходных параметров конструктору представлены выбранные материалы наносимого покрытия и ранжированный набор методов его создания, а также возможность оценки всего перечня технико-экономических показателей (более 30) указанной технологии создания композитной детали [10].

Основным фактором, определяющим выбор наполнителя и способа его нанесения, являются условия эксплуатации. Основными видами внешних воздействий на изделие являются: окружающая среда, температура и нагрузка. Каждый вид внешнего воздействия определяется природой и параметрами: состоянием окружающей среды и химической; температура – по характеру температурного поля и значению; нагрузка по характеру, разновидности и значению. Кроме того, на материалы изделий оказывают влияние энергетические поля.

На первом этапе выполняется процедура сравнения входной информации с множеством параметров, задающих условия работы детали  $BB = \{P_i, T_i, R_i, S_i, H_i, Tr_i, V_{ni}\}$ , где  $P_i$  – внешние механические воздействия;  $T_i$  – температура;  $R_i$  – размеры;  $S_i$  – среда;  $H_i$  – химическая активность;  $Tr_i$  – трение;  $V_{ni}$  – внешние механические воздействия, которые могут обеспечить функционирование детали в заданных условиях. В результате указанной процедуры формируется начальное множество альтернатив, содержащее сочетания «внешние условия – доступные способы», параметры которых удовлетворяют входным данным, и представимое формально в следующем виде [9]:

$$A = \{P_i, T_i, R_i, S_i, H_i, Tr_i, V_{ni} | \\ | T_i \in (T_{\min} \dots T_{\max}), R_i \in (R_{\min} \dots R_{\max}), \\ P_i = P_t, S_i = S_b, H_i = H_t, Tr_i = Tr_t, V_{ni} = V_{nt}\}.$$

Далее из множества  $A$  выделяется подмножество  $X$  альтернатив, для которых удовлетворяются ограничения по размерам и сложности формы заготовки. Множество  $X$

содержит допустимые альтернативы – любая из них может претендовать на выбор в качестве решения задачи.

Дальнейшие шаги моделирования связаны с ранжированием допустимых альтернатив в соответствии с уровнем их предпочтительности в условиях конкретной задачи выбора.

Оценивание альтернатив по критериям, имеющим числовое выражение, проводится по зависимости:

$$C_i(x) = \frac{C_i(x)}{\sum_{x \in X} C_i(x)}$$

На последнем этапе осуществляется иерархический синтез, результатом которого является вектор обобщенных оценок предпочтительности альтернатив  $x \in X$ . Указанные оценки определяются в соответствии с правилом:

$$C(x) = \sum_j \lambda_j C_j(x)$$

Поиск допусков технологических размеров и параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих необходимые значения эксплуатационных свойств, следует выполнять методами математического программирования. В качестве целевой функции обычно выбирают себестоимость изготовления и эксплуатации узла, но при необходимости можно использовать функцию, характеризующую требуемую надежность, функцию производительности или любую другую функцию, описывающую необходимый критерий оптимальности.

Следовательно, решение задачи будет сведено к системе:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = f(S, k_{ТЭК}, z) \rightarrow \min; \\ \sum_i^{n_1} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_1} c_j k_{внут_j} k_{внеш_j} k_{ТЭК_j} + \sum_k^{l_1} c_k k_{внут_k} k_{внеш_k} k_{\Delta_k} k_{ТЭК_k} \leq T_{\Delta_1}; \\ \sum_i^{n_2} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_2} c_j k_{внут_j} k_{внеш_j} k_{ТЭК_j} + \sum_k^{l_2} c_k k_{внут_k} k_{внеш_k} k_{\Delta_k} k_{ТЭК_k} \leq T_{\Delta_2}; \\ \sum_i^{n_3} c_i T_{S_i} + \sum_j^{m_3} c_j k_{внут_j} k_{внеш_j} k_{ТЭК_j} + \sum_k^{l_3} c_k k_{внут_k} k_{внеш_k} k_{\Delta_k} k_{ТЭК_k} \leq T_{\Delta_3}; \end{array} \right.$$

$$\text{или } \begin{cases} F = f(S, k_{TЭк}, z) \rightarrow \min; \\ CT_{Skz} \leq T_{\Delta}. \end{cases}$$

где  $F$  – целевая функция, используемая для оптимизации параметров размерной цепи;  $C$  – матрица, содержащая передаточные коэффициенты составляющих звеньев цепи;  $T_{Skz}$  – вектор искомых параметров составляющих звеньев;  $T$  – вектор допусков исходных параметров узла;  $z$  – звенья припусков на механическую обработку.

Размеры, входящие в размерную цепь, необязательно являются независимыми величинами. Между ними могут существовать различного рода связи. Например, обычные технологические размеры деталей, изготовленных с применением одного и того же приспособления, инструмента или на одном и том же настроенном оборудовании, часто имеют корреляционную связь. Корреляция оказывает дополнительное воздействие при расчете допуска замыкающего звена вероятностным методом [3]:

$$K_{\Sigma r}^2 T_{\Sigma r}^2 = \sum_{i,j}^{pq} C_{ij}^2 K_{ij}^2 T_{ij}^2 + 2 \sum_{j=1}^q \left( C_j K_j T_j \sum_{i=2}^{m(n,\dots,p)} r_{ij} C_{ij} K_{ij} T_{ij} \right),$$

где  $i$  – порядковый номер зависимых величин внутри каждой группы;  $j$  – порядковый номер групп зависимых величин.

Таким образом, объединение конструкторских цепей с технологическими цепями позволяет более гибко управлять качеством машин, в том числе определять параметры эксплуатационных свойств поверхностей деталей. Общие размерные схемы позволяют проследить совместное влияние различных параметров на качество и точность проектируемых машин и отдельных сборочных единиц. Применение численной оптимизации системы ограничений заключается в уходе от ручных методов, которые обычно сводятся к усреднению звеньев цепи или по величине допуска, или по значению качества. Допуск обоснованно перераспределяется из менее строгих размерных цепей или составляющих размеров в более ответственные цепи с трудно реализуемыми размерами [3].

В основе методов автоматизации проектных задач лежит классификация элементов. На основе анализа существующих подходов структурирования кинематических пар была предпринята попытка объединить несколько из них, сделав упрощенную обобщенную

классификацию сборочных соединений, с добавлением необходимых параметров качества для каждого соединения. За основу взята идея классификации соединений с учетом контакта поверхностей и их кинематической подвижности. Включив в функциональные зависимости между эксплуатационными свойствами и параметрами качества, к каждому классу встречающихся типов соединений, становится возможно рассчитать получаемый эксплуатационный параметр, частично влияя на него через изменения параметров качества поверхности, обеспечивающих установленные эксплуатационные свойства.

В формализованном виде процесс обеспечения технологичности изделия можно представить как воздействие на множество параметров точности размеров изделия  $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ , которое приводит к достижению экстремальной цели при соблюдении сформулированных ограничений вида

$$g_i(X) = 0 \text{ и } h_j(X) \geq 0$$

$$Q(X) \rightarrow \text{extr}_{X \in S}$$

$$S: \begin{cases} g_i(X) = 0, & i = \overline{1, I}; \\ h_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, J}, \end{cases}$$

где  $Q, g, h$  – функции, которые определяются исходя из требований точности размеров изделия и разнообразных производственных, эксплуатационных и ремонтных факторов, влияющих на технологичность изделий.

Модель размерной структуры технологического процесса механической обработки в виде совокупности графа размерной структуры  $G$  и некоторого множества конструктивных, технологических, структурных и экономических условий оптимальности технологического процесса (ТП)  $U$  выглядит так:

$$M = \{G, U\}.$$

В рассмотренной методике комплексного размерного анализа и расчёта размерных цепей размерная структура техпроцесса представлялась в двух основных видах: в виде размерной схемы и в виде размерного графа, объединяющего размеры детали, заготовки и техпроцесса [7]:

$$G = \{G_{дем}, G_{заг}, G_{заг}\},$$



где  $G_{дет}$  – граф конструкторских размеров детали;  $G_{заг}$  – граф конструкторских размеров исходной заготовки;  $G_{тех}$  – граф технологических размеров и припусков ТП механической обработки.

Погрешность обработки – параметр, зависящий (при неизменных планах обработки поверхностей) от оборудования и оснастки. Он влияет на выбор допусков технологических размеров и определяет экономическую эффективность ТП. Для его учёта создадим для каждой типовой размерной структуры матрицу средне-экономических допусков (СЭД) на основе матрицы размерной структуры

$$M_{СЭД} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{ij} & \dots & T_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{k1} & T_{k2} & \dots & T_{kk} \end{bmatrix},$$

где  $T_{ij}$  – средне-экономический допуск технологического размера между  $i$ -той и  $j$ -той поверхностями, если с  $i$ -той поверхности снимается припуск, а  $j$ -тая используется в качестве измерительной базы.

Часть ограничений учитывается при построении матрицы типовой размерной структуры ТП, для учета остальных на основе МСЭД создаем матрицу точности и свойств поверхностей (ТСП), записывая в матрице экономических допусков нули вместо допуска для тех случаев, когда простановка размера между поверхностями не возможна:

$$M_T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1k} \\ t_{21} & t_{ij} & \dots & t_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{k1} & t_{k2} & \dots & t_{kk} \end{bmatrix},$$

где  $t_{ij} = T_{ij}$ , если между поверхностями возможна простановка размера на технологической операции, и  $t_{ij} = 0$ , если невозможна.

Для математической модели запишем:

$$M = \{ M_{ТРС}, M_{ПЛ}, M_T \}.$$

Таким образом, данная модель размерной структуры технологического процесса механической обработки учитывает все технологические, конструкторские и экономические факторы. Кроме того, выявлены ограничения модели и параметры оптимизации модели, что позволяет в дальнейшем перейти к комплексной оптимизации описанной модели.

В формализованном виде зависимость определения оптимального соотношения размеров примет вид [5]:

$$Q = 1/2 \sum_{i=1, j=1}^{k, k} \left( c_{ij} e_{ij} t_{ij} \sum_{u=1}^{k-1} |b_{(ij)u}| \right),$$

где  $1/2$  – коэффициент, учитывающий дублирование размерных связей в матрице ТРС;  $k$  – количество узлов графа размерной структуры (равно размерности матрицы ТРС);  $c_{ij} = 2^{K-y}$  – коэффициент увеличения трудоемкости при ужесточении средне-экономического допуска (по существующим нормативам при увеличении точности на  $K-y$  единиц, увеличивается в 2 раза);  $e_{ij} = 1000/l_{ij}$  – коэффициент приведения точности (равен обратной величине единицы допуска, приведенной к мм),  $1/\text{мм}$ ;  $t_{ij}$  – коэффициент из матрицы ТСП, мм;  $b_{(ij)u}$  – коэффициент матрицы размерных цепей, соответствующий  $a_{ij}$  из матрицы РС.

Критерий  $Q$  учитывает комплекс конструкторско-технологических и структурных ограничений матрицы точности и свойств поверхностей, экономических факторов целевой функции, при этом является безразмерной величиной, не изменяющей физического смысла.

В качестве целевой функции при разработке и проведении размерно-точностного анализа технологического процесса предложена концепция многокритериальной оптимизации по минимуму припусков и (или) наименьшей длине рабочих ходов при различных схемах простановки операционных размеров.

В результате проведенных исследований по учету влияния эксплуатационных звеньев на обеспечение показателей надежности узла,

предложена концепция автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства с учетом анализа размерных связей на нескольких уровнях — корректировка точности функциональных размеров отдельных деталей по критериям обеспечения показателей надежности конструкции при оптимизации простановки технологических размеров для различных вариантов реализации операций механической обработки и реализация размерно-точностного анализа с модулем оптимизации структуры размерных связей для повышения технологичности конструкции детали.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шамин, В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 429 с.
2. Суслов, А.Г., Федонин, О.Н., Польский, Е.А. Научно-технологическая подготовка качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла // Научно-технологические проблемы машиностроения. – 2016. – №5 (59). – С. 34-41.
3. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности сборки на основе анализа размерных связей с применением CALS технологий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – №2 (53). – С. 83-92.
4. Качество машин: справочник: в 2 т./ А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. М.: Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 256 с.
5. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на этапах жизненного цикла на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – № 3. – С. 8-19.
6. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации // Научно-технологические проблемы машиностроения. – 2014. – №11 (41). – С. 36-43.
7. Польский, Е.А. Технологическое обеспечение точности поверхностей при обработке деталей на многоцелевых станках на этапах проектирования маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей // СТИН. – 2016. – № 11. – С. 28-32.
8. Технологическое обеспечение и повышение качества деталей машин / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, О.Н. Федонин и др. / Справочник технолога: Под общей редакцией А.Г. Суслова. – М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2019. – С. 514-580.
9. Ильицкий, С.В. Сорокин, С.В., Горенков, Е.С. Критерии выбора материала опор скольжения, работающих без смазки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6 (284). – С. 67-71.

10. Сорокин, С.В., Польский, Е.А., Федяева, Г.А. Автоматизация проектирования технологических процессов обработки деталей на современном оборудовании // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №2-2 (292). – С. 56-65.

### REFERENCES

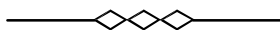
1. Shamin, V.Yu. Principles and practices of developing design and technological dimensional chains: text-book. Chelyabinsk: Publishing House YuUrGU, 1999, 429 p.
2. Suslov, A.G., Fedonin, O.N., Polsky, E.A. High technology for quality increase in assembly units of machinery at life stages /Scienceintensive technologies in mechanical engineering, 2016, no.5 (59), pp. 34-42
3. Polsky, E. A. Technological Quality Assurance of Assembly Units Based on Functional Changes of Dimensional Relations with the Use of CALS Technologies/ Progressive technologies and systems of mechanical engineering, 2016, no.2 (53), pp. 83-92.
4. Machine Quality: reference book in 2 Vol., A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al / Moscow: Mechanical Engineering, 1995, pp. 256.
5. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Quality technological support in assembly units based on dimension ties analysis taking into account operation / Proceedings of the Southwest State University, issue: Engineering and Technology, 2014, no.11 (41), pp. 36-44.
6. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Technological quality assurance of assembly units based on the analysis of dimensional relationships taking into account the analysis of parameter accuracy changes in operation dimensions at operation stages/ Science intensive technologies in mechanical engineering, 2014, no.11 (41), pp.36-43.
7. Polsky, E.A. Technological support of accuracy of machinery surfaces at designing of routeoperation engineering process by synthesis method based on dimensions ties analysis / STIN, 2016, no. 11, pp. 28-32.
8. Technological support and quality improvement of machine parts / A.G. Suslov, V.F. Bezyazychny, O.N. Fedonin, et al / Technologist's Handbook: under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Publishing «Innovatsionnoe machinostroyeniye», 2019, pp. 514-580.
9. Ilnitsky, S.V. Sorokin, S.V., Gorenkov, E.S. Material selection criteria for sliding supports running dry / Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2010, no. 6 (284), pp. 67-71.
10. Sorokin, S.V., Polsky, E.A., Fedyaeva, G.A. Computeraided design of technological processes for workpart procedure using modern equipment/ Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2012, no.2-2 (292), pp.56-65.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; одобрена после рецензирования 21.04.2022; принята к публикации 29.04.2022.

The article was submitted 19.11.2021; approved after reviewing 21.04.2022; assepted for publication 29.04.2022.



---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

*Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченкова. Технический редактор С.В. Морозов.*

Сдано в набор 16.06.2022. Выход в свет 30.06.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

Научкоёмкие технологии в машиностроении, №6 (132) 2022

«Science intensive technologies in mechanical engineering», №6 (132) 2022