



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Профсоюзная ул., д. 65, Москва, ГСП-7, 117997
ОКПО 00229530, ОГРН 1037739269590
ИНН/КПП 7728013512/772801001
Тел. (495)334 89 10. Факс (495)334 93 40
E-mail: dan@ipu.ru, www.ipu.ru

28. 11. 20 17 г. № 52- 18 / 2019

На № _____ от _____

Ст. научн. сотруднику
каф. УКМиС ЮЗГУ
Аникеевой О.В.

Сообщаем, что тезисы и статья на тему «**Задачи оптимизации при синтезе допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков**» канд. техн. наук, доцента, старшего научного сотрудника кафедры УКМиС Юго-Западного государственного университета Аникеевой Олеси Владимировны приняты к печати в сборниках: тезисов и трудов XVII-ой международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017)».

Зам. директора ИПУ РАН,
по научн. работе



Барабанов И.Н.

Зам. пред. прогр. комитета
CAD/CAM/PDM-2017

Смирнов С.В.

Задачи оптимизации при синтезе допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков

О.В. Аникеева,
старший научный сотрудник каф. УКМуС, канд. техн. наук, доцент
olesya-anikeeva@yandex.ru,
ЮЗГУ, Курск

Аннотация. Рассмотрена постановка задач синтеза допусков, в том числе на геометрические параметры и установлены два общих свойства этих задач. Данные свойства связаны с существованием множества решений задачи синтеза в исходной постановке и постановке задач синтеза как задач многокритериальной оптимизации или выбора. Выявлены особенности проявления этих свойств в задачах синтеза допусков на параметры геометрической точности станков. Рассмотрены примеры синтеза допусков для плоскошлифовального станка с выявлением системы размерных связей и применением различных целевых функций.

Abstract. The formulation of problems of synthesis of tolerances, including geometrical parameters, is considered and two general properties of these problems are established. These properties are associated with the existence of a set of solutions of the synthesis problem in the initial formulation and formulation of synthesis problems as multi-criteria optimization or choice problems. The features of the manifestation of these properties in the problems of synthesizing tolerances on the parameters of the geometrical accuracy of machines are revealed. Examples of the synthesis of tolerances for a surface grinding machine with the identification of a system of dimensional constraints and the application of various objective functions are considered.

Геометрическая точность является одним из основных свойств металлорежущих станков. Синтез допусков параметров геометрической точности выполняется при проектировании и модернизации станков, а также при разработке и актуализации стандартов.

Задачи синтеза допусков основаны на использовании некоторой зависимости выходных характеристик изделия от входных параметров [1, 2]:

$$Y = Y(X), \quad (1)$$

где Y – вектор выходных характеристик, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$, m – количество выходных характеристик изделия; X – вектор входных параметров, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, n – количество входных параметров; t – символ транспонирования.

В общем случае зависимость (1) является нелинейной, поэтому выполняется ее линеаризация с помощью известных методов, основанных на: разложении в ряд Тейлора; усреднения ошибок; малых приращений и др. [2]. Решение задач синтеза допусков при учете квадратичных членов разложения в ряд Тейлора рассмотрено в работе [3]. Отметим, что при анализе геометрической точности станков без учета деформаций их узлов и стыков, зависимость (1), как правило, описывает пространственные размерные цепи и имеет линейный характер [4]. Источники возникновения нелинейностей при расчетах геометрической точности станков рассмотрены в докладе далее.

При линейном характере зависимости (1), последняя может быть представлена в следующем виде

$$Y = \Xi X, \quad (2)$$

где Ξ – матрица передаточных коэффициентов ξ_{ij} ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$).

При синтезе допусков, в т.ч. допусков на геометрические параметры, применяют два основных метода расчетов: метод максимума-минимума и теоретико-вероятностный метод [1, 2]. Величина допуска Ty_j для некоторой выходной характеристики изделия при использовании метода максимума-минимума определяется как:

$$Ty_j = \sum_{i=1}^n |\xi_{i,j}| Tx_i, \quad (3)$$

где Tx_i – допуск i -го входного параметра,

а при использовании теоретико-вероятностного метода:

$$Ty_j = t_p \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_{i,j}^2 Tx_i^2 \lambda_i^2}, \quad (4)$$

где t_p – коэффициент риска, зависящий от принятого процента риска p , для $p = 0,27\%$ коэффициент риска $t_p = 3$; λ – коэффициент относительного рассеяния, зависящий от принятого закона распределения случайной величины x_i (для нормального распределения $\lambda^2 = 1/9$, для распределения Симпсона $\lambda^2 = 1/6$, для равномерного распределения $\lambda^2 = 1/3$).

Тогда, можно сформулировать первое общее свойство задач синтеза допусков – при наличии функциональной зависимости выходных характеристик изделия от входных параметров (1) и ее линеаризованного представления (2) следует, что при использовании любого метода расчетов на основе выражений (3) и (4), существует множество решений задачи синтеза.

При решении задачи синтеза допусков с помощью размерных цепей используется известный принцип – «... каждая размерная цепь дает решение только одной задачи и может иметь одно замыкающее звено» [1, с. 102]. Это означает, что для каждого замыкающего звена (выходной характеристики) имеется только одно скалярное уравнение из (2) на основе которого при заданных требованиях к точности замыкающего звена определяются допуски на размеры составляющих звеньев при использовании выражений (3) или (4).

Вторым свойством общим свойством задач синтеза допусков является их постановка как задач многокритериальной оптимизации (выбора) на основе явного или неявного введения целевой функции (правила выбора). На основе рассмотрения двух типичных задач оптимизации [2] можно сформулировать соответствующие им виды целевых функций.

Если при заданном допуске на одну из выходных характеристик изделия T_{ij} нужно найти максимальные значения допусков на входные параметры TX_i , то целевая функция имеет следующий вид:

$$TX_i \rightarrow \max, i \in [1: n], \quad (5)$$

а в том случае, если следует обеспечить экстремальное значение некоторых функций от выходной характеристики изделия $F_k(y_j)$ ($k = 1, \dots, l$, l – количество критериев), связанных с условиями производства, эксплуатации, утилизации и других этапов его жизненного цикла, то с учетом (2) целевая функция примет вид:

$$F_k(TX_i) \rightarrow \max, k \in [1: l], i \in [1: n]. \quad (6)$$

Рассмотренные целевые функции (5) и (6) соответствуют известным методикам синтеза допусков, построенным на принципах равных допусков или равных качеств, учете себестоимости достижения точности и др. [2].

Для целевых функций представленных зависимостями (5) и (6), выражения (3) и (4) будут являться функциональными ограничениями, при очевидных параметрических ограничениях $TX_i > 0$.

Установленные общие свойства задач имеют существенные особенности при синтезе допусков параметров геометрической точности станков.

В настоящее время сложились два подхода к оценке геометрических погрешностей обработки, оба из которых основаны на применении матриц преобразований однородных координат и полной вариации полученных зависимостей.

В первом подходе отдельно рассматривают ветвь заготовки и ветвь инструмента относительно неподвижной станины станка и определяют их номинальное положение при обработке [5, 6] и др. Контакт заготовки и инструмента происходит в точке резания и при отсутствии геометрических погрешностей ФС определяется так:

$$A_{Ви}r_{и} = A_{Вз3}r_{з}, \quad (7)$$

где $A_{Ви}$ и $A_{Вз3}$ – матрицы преобразований координат, описывающих движения узлов ФС при обработке, от станины к режущему инструменту (ветвь инструмента) и к заготовке (ветвь заготовки), соответственно; $r_{и}$ и $r_{з}$ – радиус-векторы инструмента и заготовки, $r_{и} = (r_{иx}, r_{иy}, r_{иz}, 1)^T$, $r_{з} = (r_{зx}, r_{зy}, r_{зz}, 1)^T$.

Вектор полной геометрической погрешности E находится как полная вариация выражения (7) и равен:

$$E = \Delta A_{Вз3}r_{з} - \Delta A_{Ви}r_{и}. \quad (8)$$

Недостатком этого подхода является то, что нужно определить радиус-векторы инструмента и заготовки без рассмотрения конкретной обрабатываемой поверхности. При использовании первого подхода определяют векторное поле погрешностей, но для установления вклада каждой из них в формирование погрешности обработки конкретной поверхности требуются дополнительные исследования. Этот подход использован в стандарте ISO 230-1:2012 [7], с использованием понятия «функциональная точка» (рис. 1). Она определена как «центральная точка режущего инструмента или точка, связанная с компонентом станка, в которой режущий инструмент входит в контакт с заготовкой для удаления слоя материала» [7].

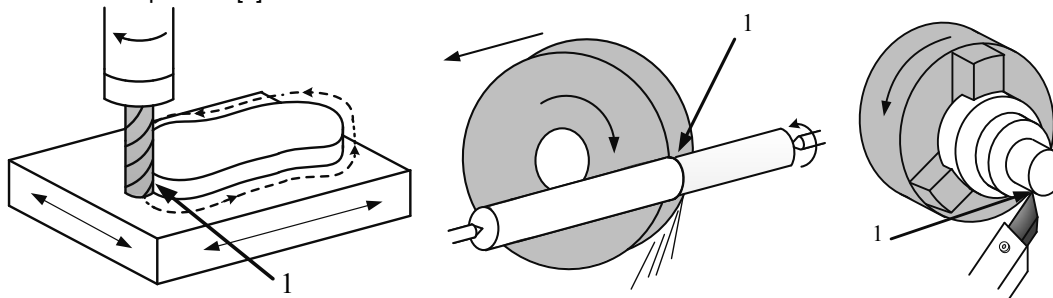


рис. 1 Примеры функциональных точек по ISO 230-1:2012

Второй подход основан на использовании функции формообразования, задающей положение кромки режущего инструмента в системе координат обрабатываемой заготовки [4]:

$$r_0 = A_{ст}r_{и}, \quad (9)$$

где r_0 – радиус-вектор связывающий координаты точек режущего инструмента в системах координат самого режущего инструмента и обрабатываемой детали; $A_{ст}$ – матрица преобразований координат станка, являющаяся произведением матриц элементарных перемещений; $r_{и}$ – радиус-вектор формообразующих точек инструмента.

После учета в функции формообразования различных связей, r_0 в выражении (9) будет соответствовать уравнению конкретной идеальной обрабатываемой поверхности.

Полная вариация выражения (9) имеет вид:

$$\Delta r_0 = \Delta A_{ст}r_{и} + A_{ст}\Delta r_{и}, \quad (10)$$

однако, полагая режущий инструмент идеальным [8], т.е. $\Delta r_{и} = 0$, это выражение будет иметь вид:

$$\Delta r_0 = \Delta A_{ст}r_{и}. \quad (11)$$

Выражение (11) является векторным балансом точности станка, также не учитывающим конкретную обрабатываемую поверхность. Полное соответствие между выражениями (8) и (11) достигается учетом положения станины в функции формообразования (9) посредством введения единичной матрицы. Учет конкретной обрабатываемой поверхности выполняется при рассмотрении нормального баланса погрешностей Δr_n при проекции Δr_0 на нормаль к ней – n , т.е. $\Delta r_n = n^T \Delta r_0$.

В работе [8] введено новое определение векторного баланса точности Δr_0^{**} в виде:

$$\Delta r_0^{**} = \epsilon_0 r_0 + \delta r_0 + d r_0, \quad (12)$$

где $\epsilon_0 = \epsilon_i$ ($i = 0$), ϵ_i – матрица погрешности взаимного расположения S_{i-1} -ой и S_i -ой систем координат формообразующей системы (ФС), связанных с $i-1$ -м и i -м узлами ФС:

$$\varepsilon_i = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{xi} \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta_{yi} \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где δ_{xi} , δ_{yi} , δ_{zi} – малые смещения системы координат S_i вдоль осей X , Y , Z ; α_i , β_i , γ_i – малые углы поворота системы координат S_i относительно осей X , Y , Z .

В выражении (12) из всех геометрических погрешностей, входящих в (11), учтены только те, которые имеются в нормальном балансе погрешностей. С учетом (12), уравнение реальной обработанной поверхности имеет вид [8]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \varepsilon_0 \mathbf{r}_0 + \delta \mathbf{r}_0 + d \mathbf{r}_0. \quad (14)$$

Синтез допусков параметров геометрической точности станков выполняется с использованием нормального баланса погрешностей Δr_n и выражений (12) и (14).

Особенности задач синтеза допусков параметров геометрической точности станков рассмотрим на примере плоскошлифовального станка, представленного на рис. 2. Анализ этого станка был выполнен в работе [9] с использованием первого подхода к оценке геометрических погрешностей.

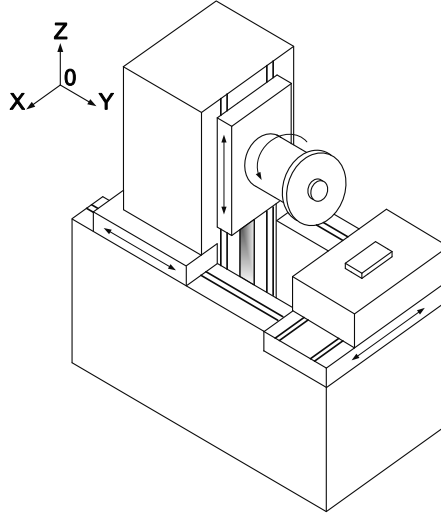


рис. 2 Формообразующая система плоскошлифовального станка (адаптировано из [9])

Функция формообразования этого станка имеет вид:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\mathbf{A}^2(\mathbf{y})\mathbf{A}^3(\mathbf{z})\mathbf{A}^5(\phi)\mathbf{r}_n, \quad (15)$$

где $\mathbf{A}^1(\mathbf{x})$, $\mathbf{A}^2(\mathbf{y})$ и $\mathbf{A}^3(\mathbf{z})$ – матрицы перемещений вдоль осей X , Y и Z ; $\mathbf{A}^5(\phi)$ – матрица вращения вокруг оси Y .

Для сопоставления результатов данной работы с результатами работы [9] примем модель точечного режущего инструмента $\mathbf{r}_n = (0, 0, 0, 1)^T$.

Векторный баланс точности станка при обработке плоской поверхности $\mathbf{r}_0 = (x, y, z, 1)^T$, где $z = \text{const}$, соответствующий выражению (12) имеет вид:

$$\Delta \mathbf{r}_0 = (\varepsilon_0 \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\mathbf{A}^2(\mathbf{y})\mathbf{A}^3(\mathbf{z})\mathbf{A}^5(\phi) + \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\varepsilon_1 \mathbf{A}^2(\mathbf{y})\mathbf{A}^3(\mathbf{z})\mathbf{A}^5(\phi) + \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\mathbf{A}^2(\mathbf{y})\varepsilon_2 \mathbf{A}^3(\mathbf{z})\mathbf{A}^5(\phi) + \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\mathbf{A}^2(\mathbf{y})\mathbf{A}^3(\mathbf{z})\varepsilon_3 \mathbf{A}^5(\phi) + \mathbf{A}^1(\mathbf{x})\mathbf{A}^2(\mathbf{y})\mathbf{A}^3(\mathbf{z})\mathbf{A}^5(\phi)\varepsilon_4)\mathbf{r}_n. \quad (16)$$

После вычислений по выражению (16) и промежуточных преобразований, был определен векторный баланс точности, соответствующий уравнению (12) и уравнению связи $\phi = 0$:

$$\Delta \mathbf{r}_0^{**} = \begin{pmatrix} \beta_0 z \\ -z \sum_{i=0}^1 \alpha_i \\ y \sum_{i=0}^1 \alpha_i - \beta_0 x + \sum_{i=0}^4 \delta_{zi} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Из выражения (17) видно, что из 24 геометрических погрешностей станка, входящих в (16), только 8 погрешностей формируют отклонения реальной обработанной поверхности – $\{\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \delta_{z0}, \delta_{z1}, \delta_{z2}, \delta_{z3}, \delta_{z4}\}$. На рис. 3 представлены: векторный баланс точности в рабочем пространстве станка ($x = -200 \dots 200$ мм, $y = 0 \dots 100$ мм, $z = 0 \dots 200$ мм), а также номинальная и реальная обработанные поверхности, при принятых значениях погрешностей:

$$\sum_{i=0}^1 \alpha_i = 0,005 \text{ рад.}, \quad \beta_0 = 0,005 \text{ рад.}, \quad \sum_{i=0}^4 \delta_{zi} = 5 \text{ мкм.}$$

При этом, в работе [9] было установлено наличие в векторе полной геометрической погрешности \mathbf{E} , определенном по выражению (8) 21 потенциальной геометрической погрешности, из которых 11 погрешностей были выделены как ключевые. Для этих 11 геометрических погрешностей в работе [9] и были определены значения допусков. Такое расхождение между данной работой и работой [9] вызвано тем, что при использовании первого подхода к оценке геометрических погрешностей установление количества потенциальных и оказывающих фактическое влияние погрешностей на точность обработки выполняется в достаточной мере произвольно. Использование второго подхода при определении состава этих геометрических погрешностей не допускает их произвольного выбора.

Выражение (17) и уравнение реальной обработанной поверхности, определяемое по уравнениям (12) и (14) описывают полную систему размерных связей при обработке плоской поверхности на рассматриваемом станке. Для рассматриваемой плоской поверхности могут быть заданы два технических требования: к точности размера – допуск (калитет) Tu_1 , и к ее отклонению от параллельности относительно базовой поверхности – допуск Tu_2 , показанные на рис. 4,а.

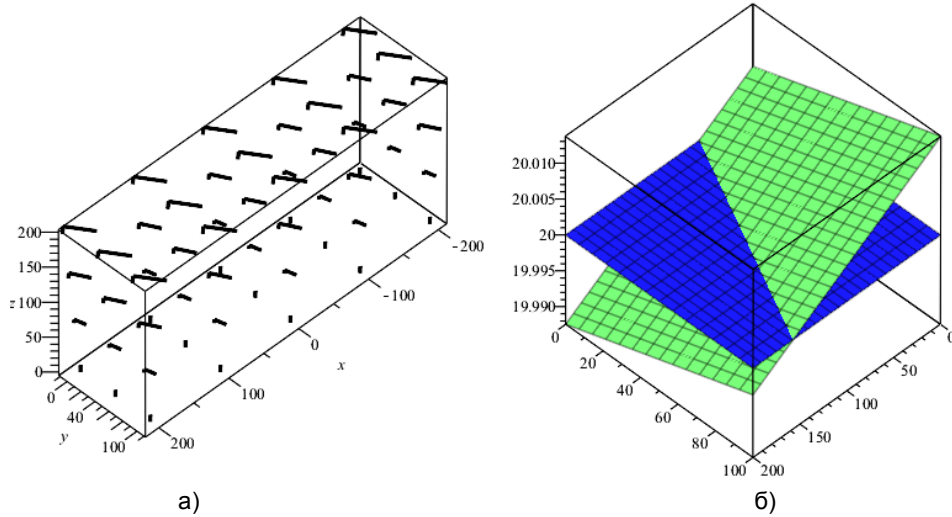


рис. 3 Векторный баланс точности плоскошлифовального станка (а), номинальная и реальная обработанные поверхности (б)

Отметим, что в ГОСТ 13135-90 [10] для станка рассматриваемого типа, требования к точности обработки образца-изделия (рис. 4,б) содержат только проверку постоянства высоты H_2 .

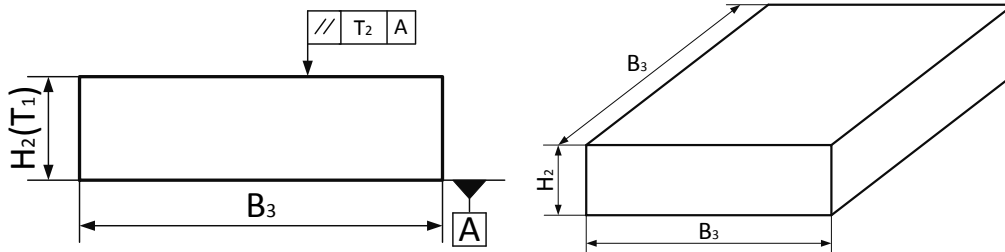


рис. 4 Требования к точности обработанной детали (а) и образец-изделие (б)

При использовании метода максимума-минимума, выражение (3) для допуска Ty_1 имеет следующий вид:

$$Ty_1 = y_{\text{габ}} T \sum_{i=0}^1 \alpha_i + y_{\text{габ}} T \beta_0 + T \sum_{i=0}^4 \delta_{zi}, \quad (18)$$

где $x_{\text{габ}}$ и $y_{\text{габ}}$ – габаритные размеры обрабатываемой плоской поверхности; а для допуска Ty_2 имеем:

$$Ty_2 = y_{\text{габ}} T \sum_{i=0}^1 \alpha_i + y_{\text{габ}} T \beta_0. \quad (19)$$

Видно, что система из уравнений (18) и (19) является недоопределенной и допускает множество решений задачи синтеза. Поскольку рассматриваемый станок предназначен только для обработки плоскостей, параллельных плоскости стола, то данная система уравнений не может быть расширена. Особенность проявления первого общего свойства задач синтеза допусков здесь проявляется в том, что уравнения (18) и (19) были получены из одного выражения (17). В полной мере эта особенность проявляется при наличии нескольких замкнутых контуров при установке заготовки на станке, например, при обработке в центрах на токарном станке [11].

Назначение отдельных допусков на геометрические погрешности станка (входные параметры) возможно при решении задач оптимизации (выбора), которые являются многокритериальными.

В работе [9] были предложены два критерия, первый из которых основан на модифицированной функции потерь качества Тагути $C_q(T)$:

$$C_q(T) = \sum_{i=1}^{11} d_i \left(\frac{T_i}{6} \right)^2, \quad (20)$$

и функции, учитывающей производственные затраты на достижение требуемой точности узлов станка:

$$C_m(T) = \sum_{i=1}^{11} C_i(T_i), \quad (21)$$

где конкретный вид зависимостей $C(T)$ представлен в [9].

В самой работе [9] была выполнена свертка двух критериев, и была введена целевая функция:

$$QC(T) = WC_q(T) + (1-W)(C_m(T) + (1+\mu)C_q(T)) \rightarrow \min, \quad (22)$$

где W – весовой коэффициент $W = 0 \dots 1$; μ – коэффициент, учитывающий потери качества при эксплуатации и ремонте станка.

В работе [12] было предложено совмещение этапов синтеза параметров и допусков на них на основе следующей постановки задачи:

$$\begin{aligned} & \{\Delta x_i \rightarrow \max_x, \bar{x}_i \rightarrow \text{extr}_x, x \in D, i \in [1: h]; \\ & D = \{x \in R^k | Q_i(x) \geq Q_{i,\min}(x), \Delta Q_i(x) \leq [\Delta Q_i(x)], i \in [1: k]; \\ & g_j(x) \leq 0, i \in [k+1: m]; g_j(x) = 0, i \in [m+1: s]; \\ & a_j \leq x_j \leq b_j, j \in [1: n]\}, \end{aligned} \quad (23)$$

где Δx_i – система целевых функций, представляющих собой интервалы изменения независимых параметров x_i ; $Q_{i,\min}(x)$ – минимально допустимые значения единичных показателей качества (ЕПК); $[\Delta Q_i(x)]$ – допускаемые отклонения единичных показателей качества; \bar{x}_i – средние значения независимых параметров.

Такая постановка задачи оптимизации целесообразна при создании новых моделей станков, но не применима при разработке и актуализации стандартов на нормы геометрической точности уже выпускаемых станков.

Рассмотрим особенности проявления второго свойства на том же примере плоскошлифовального станка.

Используем соотношение (18) без (19) и метод допусков равного влияния [2], основанный на том, что расчетные допуски должны вызывать одинаковые погрешности выходной характеристики, то сами они будут равны:

$$T\alpha_0 = T\alpha_1 = \frac{T y_1}{2(x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1)}; T\beta_0 = \frac{T y_1}{x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1}; T\delta_{zi} = \frac{T y_1}{5(x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1)}. \quad (24)$$

Выполнив перегруппировку допусков в выражении (18) по узлам для угловых погрешностей, т.е. объединив их по индексам – α_0 и β_0 , получим следующие значения допусков:

$$T\alpha_0 = T\alpha_1 = \frac{T y_1}{(x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1)\left(1 + \frac{x_2}{y_2}\right)}; T\beta_0 = \frac{T y_1}{x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1}; T\delta_{zi} = \frac{T y_1}{5(x_{\text{раб}} + y_{\text{раб}} + 1)}. \quad (25)$$

Из (24) и (25) видно, что значения допусков для угловых погрешностей отличаются, при этом обоснованным является использование допусков, определенных по выражениям (25). Это вызвано тем, что угловые погрешности α_0 и β_0 характеризуют погрешность установки заготовки на столе станка (погрешность базирования), в т.ч. погрешность изготовления и сборки самого стола.

Рассматривая выражения (18) и (19) как систему, получим:

$$T \sum_{i=0}^4 \delta_{zi} = T y_1 - T y_2. \quad (26)$$

Для выражения (26) дальнейшее использование любого метода синтеза допусков, для определения допусков на отдельные линейные погрешности, является неправомерным. Линейная погрешность δ_{z3} относится к компенсируемым погрешностям, поскольку связана с узлом, перемещающимся по оси Z. Данная погрешность характеризует точность позиционирования узла по этой оси и соответственно может компенсировать влияние всех остальных составляющих – $\{\delta_{z0}, \delta_{z1}, \delta_{z2}, \delta_{z4}\}$, значения допусков на которые должны устанавливаться из других требований и использования соответствующих целевых функций, например по жесткости, виброустойчивости и т.п. Иными словами, из выражения (26) можно определить только величину допуска на погрешность позиционирования этого узла $T\delta_{z4} = T y_1 - T y_2$.

В работе установлены два общих свойства задач синтеза допусков, в т.ч. на геометрические параметры. Первое свойство отражает существованием множества решений задачи синтеза, а второе свойство – постановку задач синтеза как задач многокритериальной оптимизации (выбора). Проявление этих свойств имеет особенности в задачах синтеза допусков на параметры геометрической точности станков, которые рассмотрены на примере синтеза допусков для плоскошлифовального станка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60049 мол_а_дк.

Литература

1. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. Вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
2. Фундаментальные проблемы теории точности / Под ред. Булатова В.П., Фридендера И.Г. - М.: Наука, 2001. - 484 с.
3. Ивахненко, А.А. Синтез допусков показателей качества при проектировании и эксплуатации продукции машиностроения: Автореферат дисс. ... к.т.н., спец. 05.02.23. – Курск, 2015. 18 с.
4. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
5. Shijie Guo, Dongsheng Zhang, and Yang Xi. Global Quantitative Sensitivity Analysis and Compensation of Geometric Errors of CNC Machine Tool. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2016 (2016), Article ID 2834718, 12 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2834718>
6. Wenjie Tian, Weiguo Gao, Wenfen Chang, and Yingxin Nie. Error Modeling and Sensitivity Analysis of a Five-Axis Machine Tool. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering* Volume 2014, Article ID 745250, 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/745250>.
7. ISO 230-1:2012. Нормы и правила испытаний металлорежущих станков. Часть 1: Геометрическая точность станков, работающих на холостом ходу или в квазистатических условиях. Взамен ISO 230-1:1996; введ. 01.03.2012. Switzerland: ISO, 2012. 168 с.
8. Аникеева, О.В. Развитие вариационного метода расчета точности металлорежущих станков / О.В. Аникеева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. - № 5, 2016. – С. 111-118.
9. Hong Yihai, Liu Jiangnan, Yang Xiaojuan, Jiang Guang. Analysis and Robust Design of Geometric Accuracy of a Three-Axis CNC Surface Grinding Machine. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, 2015. DOI Number: 10.6567/IFTtoMM.14TH.WC.PS12.001. 8p.
10. ГОСТ 13135-90. Станки плоскошлифовальные с прямоугольным столом. Основные размеры. Нормы точности. Взамен ГОСТ 13135-80 и ГОСТ 13509-78; введ. 01.07.1991. М.: Издательство стандартов, 1991. 30 с.
11. Аникеева, О.В. Построение полной системы размерных связей при обработке заготовок на металлорежущих станках / О.В. Аникеева // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении (FRITME-2017): сборник научных трудов V Международной научной конференции*. – М.: ИМАШ им. А.А. Благоднарова РАН, 2017. – С. 39-41.
12. Аникеева, О.В. Разработка метода робастной оптимизации технологических машин при совместном синтезе параметров и допусков на них / О.В. Аникеева // *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», №4, 2016*. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3869 (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.