

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.75

doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-8-19

ПОГРЕШНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ УСТАНОВКЕ НА ОПОРНЫЕ ПРИЗМЫ С УЧЕТОМ МАКРООТКЛОНЕНИЙ

Дмитрий Михайлович Филькин^{1✉}, Евгений Александрович Польский²

^{1, 2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ filkin.dm@mail.ru

² polski.eugene@hotmail.com

Аннотация

Цель исследования: разработка приспособлений для высокоточной обработки деталей машин.

Задача, решению которой посвящена статья: анализ точности приспособлений с опорными призмами.

Методы исследования: моделирование контакта заготовки с опорной призмой при помощи теории размерных связей, анализ влияния отдельных параметров модели при помощи анализа чувствительности, регрессионный анализ результатов моделирования базирования заготовок в опорных призмах.

Новизна работы: установлено влияние допусков формы и взаимного местоположения базовых поверхностей при расчете точности базирования заготовок в опорных призмах; выявлены особенности формирования погрешности базирования в худшем случае (методом «максимум-минимум») и с учетом вероятности распределения размеров в

пределах допусков (вероятностным методом).

Результаты исследования: разработана модель самоустановки заготовки в призму с учетом несоосности и отклонений от круглости, получены зависимости для оценки погрешности базирования заготовки в опорных призмах с учетом этих макроотклонений.

Выводы: на формирование погрешности базирования ε_6 заготовки в призме оказывают влияние допуски формы и месторасположения базовых поверхностей; учет погрешностей формы и местоположения базовых поверхностей заготовки показывает возможность формирования погрешности базирования в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: точность, погрешность базирования, макроотклонения, допуски формы и месторасположения, размерный анализ, опорные призмы.

Original article

Open Access Article

THE ERROR OF BASING THE WORKPIECES WHEN INSTALLED ON THE LOCATION VEES, TAKING INTO ACCOUNT MACRO DISPLACEMENTS

Dmitry Mikhailovich Filkin^{1✉}, Yevgeniy Aleksandrovich Polskiy²

^{1, 2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ filkin.dm@mail.ru

² polski.eugene@hotmail.com

Abstract

Work objective: development of devices for high-precision machining of machine parts.

The problem to which the paper is devoted is to analyze the accuracy of devices with location vees.

Research methods: modelling of the contact of the workpiece contact with the location vee by means of the theory of dimensional connections, analysis of some model parameter influence using sensitivity analysis, regression analysis of the results of modeling the workpiece fixing in the location vees.

The novelty of the work: the influence of form tolerances and the relative location of the base surfaces are established when calculating the accuracy of fixing workpieces in location vees; the features of forming basing error in the worst case (by maximum-minimum method) and taking into account the probability of size distribution within the tolerances (by the probabilistic method) are revealed.

Введение

Опорные призмы широко используются для базирования заготовок в процессе их обработки или контроля точности готовых деталей. Базовой поверхностью призмы является точный v-паз, на который заготовка устанавливается цилиндрической поверхностью. Погрешность базирования ε_δ , определяемая как отклонение фактического положения заготовки от требуемого положения, формируется вариацией случайных размерных параметров базовой поверхности заготовки, находящейся в контакте с установочными элементами приспособления. Точность базирования центра заготовки при базировании в призме традиционно определяется по формуле [1]

$$\varepsilon_\delta = \frac{T_d \sin \gamma}{2 \sin(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где T_d – допуск базовой поверхности заготовки; γ – угол между направлением выдерживаемого размера и плоскостью симметрии призмы; α – угол v-паза призмы.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для моделирования погрешностей формы заготовки могут использоваться различные модели [4-6]. В данной работе использована модель в виде тригонометрического полинома [4].

$$r(\varphi) = \frac{d}{2} + \sum_{k=1}^n M_k \cos(k\varphi + \varphi_k), \quad (2)$$

где $r(\varphi)$ – переменный радиус заготовки; φ – угловая координата; d – диаметр базовой поверхности заготовки; M_k – отклонения формы k -й гармоники, n – порядковый номер высшей гармоники; φ_k – начальный

The results of the study: a model is developed for installing the workpiece into a vee, taking into account misalignment and deviations from roundness, dependencies are obtained for estimating the error of basing the workpiece in the location vees, taking into account these macro-displacements.

Conclusions: the error of basing the workpiece in the vee is influenced by the tolerances of the form and location of the base surfaces; taking into account the errors of the form and location of the workpiece base surfaces make it possible to form the error of the base in the horizontal plane.

Keywords: accuracy, basing error, macro displacements, form and location tolerances, dimensional analysis, location vees.

Приведенная зависимость учитывает влияние допуска диаметра базовой поверхности без учета погрешности ее формы. Из формулы также следует, что, если размер задан от плоскости симметрии v-паза ($\gamma = 0^\circ$), то погрешность базирования не формируется ($\varepsilon_\delta = 0$). Призма является самоцентрирующим установочным элементом приспособления, погрешность установки которой в горизонтальном направлении (перпендикулярном плоскости симметрии паза) может формироваться вследствие погрешностей изготовления и сборки на корпусе приспособления [2]. Учет погрешностей формы и месторасположения поверхностей даже в рамках общего допуска на диаметр базовой поверхности заготовки также может приводить к дополнительным смещениям заготовки в призме. Величину дополнительного смещения заготовки необходимо учитывать при расчете погрешности базирования ε_δ .

фазовый угол k -й гармоники.

Используемая модель позволяет моделировать макроотклонения заготовки, устанавливаемой на опорную призму. Задавая случайные значения для параметров d , M_k и φ_k можно моделировать контакт случайной заготовки. Вариация параметра d характеризует случайное значение диаметра заготовки (в пределах установленного допуска). Вариация M_1 и φ_{M1} – случайные значения расстояния между геометрическим центром и центром вращения заготовки (допуск соосности), вариации более высоких

порядков характеризуют отклонения от круглости (M_2 и φ_{M2} – овальность сечения, M_3 и φ_{M3} – огранку с тремя вершинами и т.д.).

Пример поверхности, формируемой уравнением (2) с произвольными пара-

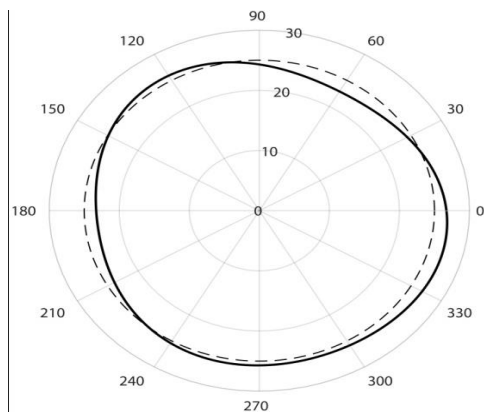


Рис. 1. Поверхность с отклонениями от соосности и круглости

Fig. 1. Surface with tolerances of alignment and roundness

Моделирование погрешности базирования при помощи размерных связей. Определение погрешности базирования выполняется при помощи анализа размерных цепей, формирующихся в процессе контакта заготовки с установочными элементами приспособления. В данной работе рассматривается плоская размерная схема установки заготовки в призме (рис. 2).

Здесь r_1, r_2 – радиус-векторы к точкам

$$\begin{cases} b_1 \cos \alpha_1 + r_1 \cos(\varphi_1 + \pi) + r_2 \cos \varphi_2 + b_2 \cos \alpha_2 = 0; \\ b_1 \sin \alpha_1 + r_1 \sin(\varphi_1 + \pi) + r_2 \sin \varphi_2 + b_2 \sin \alpha_2 = 0; \\ b_1 \cos \alpha_1 + r_1 \cos(\varphi_1 + \pi) = \delta_x; \\ b_1 \sin \alpha_1 + r_1 \sin(\varphi_1 + \pi) = \delta_y. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь φ_1, φ_2 – углы, определяющие положение точек контакта в полярной системе координат заготовки; α_1, α_2 – углы, определяющие направления векторов b_1 и b_2 .

Первые два уравнения описывают условие самоустановки, а два последних – значение замыкающего звена размерной цепи, описывающего смещение центра заготовки δ в двух проекциях. Случайные значения параметров заготовки ($d, M_1, M_2,$

метрами $d = 50$ мм, $M_1 = M_2 = M_3 = 1$, $\varphi_{M1} = \pi/4$, $\varphi_{M2} = \pi/2$ и $\varphi_{M3} = 0$, показан на рис. 1. Пунктирной линией показана поверхность с номинальным диаметром $d = 50$ мм.

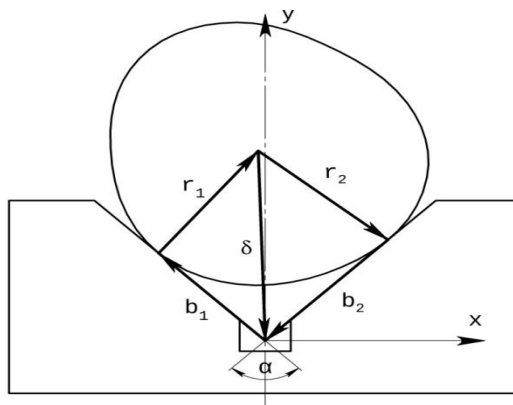


Рис. 2. Размерная схема установки заготовки

Fig. 2. Dimensional loops of self-alignment of a blank

контакта заготовки с базовыми поверхностями призмы; b_1, b_2 – векторы, определяющие точки контакта относительно призмы; δ – вектор, определяющий фактическое смещение центра заготовки относительно требуемого положения.

При самоустановке заготовки в призме формируется система размерных уравнений:

$M_3, \varphi_{M1}, \varphi_{M2},$ и φ_{M3}) формируют совокупность случайных значений смещения центра δ , образующих погрешность базирования заготовки ε_δ .

Для случая стандартной опорной призмы с углом v-паза $\alpha = 90^\circ$ без учета погрешностей ее изготовления решение системы (3) относительно вектора погрешности смещения центра заготовки δ имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta_x &= 1/2(r_1 \cos(\varphi_1 + \pi) + r_1 \sin(\varphi_1 + \pi) - r_2 \cos \varphi_2 + r_2 \sin \varphi_2); \\ \delta_y &= 1/2(r_1 \cos(\varphi_1 + \pi) + r_1 \sin(\varphi_1 + \pi) + r_2 \cos \varphi_2 - r_2 \sin \varphi_2). \end{aligned}$$

Моделирование контакта с призмой.
Контакт поверхности заготовки с призмой происходит в двух точках. Система уравнений касания имеет вид:

$$\begin{cases} f(x_1) = g(x_1); \\ f'(x_1) = g'(x_1); \\ f(x_2) = g(x_2); \\ f'(x_2) = g'(x_2). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $f(x)$ – уравнение поверхности заготовки; $g(x)$ – уравнение базовой по-

$$\sigma_1 = M_1 \sin(\varphi + \varphi_{M1}) + 2M_2 \sin(2\varphi + \varphi_{M2}) + kM_3 \sin(k\varphi + \varphi_{M3});$$

$$\sigma_2 = d/2 + M_1 \cos(\varphi + \varphi_{M1}) + M_2 \cos(2\varphi + \varphi_{M2}) + M_3 \cos(k\varphi + \varphi_{M3});$$

Здесь k – количество вершин огранки. В дальнейших расчетах k принято равным 3.

Окончательно, условия контакта заготовки с призмой с учетом погрешности

верхности призмы; x_1, x_2 – координаты точек касания заготовки с призмой.

Тангенс угла наклона касательной к поверхности заготовки $f'(x)$, заданной уравнением (2), в точке $(\varphi, r(\varphi))$ можно определить как

$$f'(x) = \frac{dy/d\varphi}{dx/d\varphi} = \frac{\sin(\varphi)\sigma_1 + \cos(\varphi)\sigma_2}{\cos(\varphi)\sigma_1 - \sin(\varphi)\sigma_2},$$

где

формы и месторасположения можно сформулировать следующей системой размерных уравнений:

$$\begin{cases} r_1 = d/2 + M_1 \cos(\phi_1 + \phi_{M1}) + M_2 \cos(2\phi_1 + \phi_{M2}) + M_3 \cos(k\phi_1 + \phi_{M3}); \\ r_2 = d/2 + M_1 \cos(\phi_2 + \phi_{M1}) + M_2 \cos(2\phi_2 + \phi_{M2}) + M_3 \cos(k\phi_2 + \phi_{M3}); \\ b_1 \cos \alpha_1 + r_1 \cos(\phi_1 + \pi) + r_2 \cos \phi_2 + b_2 \cos \alpha_2 = 0; \\ b_1 \sin \alpha_1 + r_1 \sin(\phi_1 + \pi) + r_2 \sin \phi_2 + b_2 \sin \alpha_2 = 0; \\ b_1 \cos \alpha_1 + r_1 \cos(\phi_1 + \pi) = \delta_x; \\ b_1 \sin \alpha_1 + r_1 \sin(\phi_1 + \pi) = \delta_y; \\ \frac{\sin(\phi_1)\sigma_1 + \cos(\phi_1)\sigma_2}{\cos(\phi_1)\sigma_1 - \sin(\phi_1)\sigma_2} = \frac{1}{2}(\pi + \alpha); \\ \frac{\sin(\phi_2)\sigma_3 + \cos(\phi_2)\sigma_4}{\cos(\phi_2)\sigma_3 - \sin(\phi_2)\sigma_4} = \frac{1}{2}(\pi - \alpha); \\ \sigma_1 = M_1 \sin(\phi_1 + \phi_{M1}) + 2M_2 \sin(2\phi_1 + \phi_{M2}) + kM_3 \sin(k\phi_1 + \phi_{M3}); \\ \sigma_2 = d/2 + M_1 \cos(\phi_1 + \phi_{M1}) + M_2 \cos(2\phi_1 + \phi_{M2}) + M_3 \cos(k\phi_1 + \phi_{M3}); \\ \sigma_3 = M_1 \sin(\phi_2 + \phi_{M1}) + 2M_2 \sin(2\phi_2 + \phi_{M2}) + kM_3 \sin(k\phi_2 + \phi_{M3}); \\ \sigma_4 = d/2 + M_1 \cos(\phi_2 + \phi_{M1}) + M_2 \cos(2\phi_2 + \phi_{M2}) + M_3 \cos(k\phi_2 + \phi_{M3}). \end{cases} \quad (5)$$

Используя систему уравнений (5) можно определить координаты точек контактов (ϕ_1, r_1) и (ϕ_2, r_2) заготовки с призмой и смещение центра заготовки вдоль горизонтальной оси δ_x (т. е. погрешность центрирования призмы) и вдоль вертикальной оси δ_y .

Для оценки влияния каждого из факторов на величину смещения центра заготовки δ выполняется анализ чувствительности [7, 8].

Выбраны следующие исходные значения параметров:

- номинальный диаметр заготовки

$d = 50$ мм;

- допуск диаметра $T_d = 0,25$ мм (12 квалитет), при этом значение диаметра d варьируется в диапазоне $50 \pm 0,125$ мм;

- допуск соосности T_{M1} не более 0,1 мм в радиусном выражении (11 степень точности);

- допуск круглости задается отдельно допуском овальности T_{M2} не более 0,08 мм, и отдельно допуском огранки T_{M3} не более 0,08 мм (11 степень точности);

- начальные фазовые углы $\varphi_{M1}, \varphi_{M2}$ и φ_{M3} модели изменяются от 0 до 2π .

Выбранные параметры точности заготовок могут быть получены однократной механической обработкой на металлорежущих станках. Варьирование параметров выполняется во всем диапазоне значений, поэтому также оценивается влияние этих параметров в случае более жестких допусков. Анализ более грубых заготовок представляется бесполезным для практического использования.

Одномерный показатель чувствительности S_i определяется по формуле:

$$S_i = \frac{V_{X_i}[E_{X_i}(Y|X_i)]}{V(Y)}, \quad (6)$$

где $E_{X_i}(Y|X_i)$ – математическое ожидание отклика Y при зафиксированном значении фактора X_i ; $V_{X_i}(E_{X_i}(Y|X_i))$ – условная дисперсия, определяемая как дисперсия математических ожиданий $E_{X_i}(Y|X_i)$ для всех возможных значений X_i ; $V(Y)$ – полная дисперсия отклика Y .

Полный показатель чувствительности S_{Ti} определяется как

$$S_i = \frac{y_A \cdot y_{C_i} - \left(\frac{1}{N} \sum_j y_A^{(j)} \right)^2}{y_A \cdot y_A - \left(\frac{1}{N} \sum_j y_A^{(j)} \right)^2} = \frac{(1/N) \sum_j y_A^{(j)} y_{C_i} - \left(\frac{1}{N} \sum_j y_A^{(j)} \right)^2}{(1/N) \sum_j (y_A^{(j)})^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_j y_A^{(j)} \right)^2},$$

5. Расчет полных показателей чувствительности S_{Ti} . Формула (7) сводится к виду:

$$S_{Ti} = 1 - \frac{y_B \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = 1 - \frac{(1/N) \sum_j y_B^{(j)} y_{C_i} - f_0^2}{(1/N) \sum_j (y_A^{(j)})^2 - f_0^2}.$$

Также для качественного анализа модели выполнен анализ точечных диаграмм, полученных в результате машинного эксперимента.

После оценки степени и характера влияния указанных параметров на величину

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{-i})]}{V(Y)}, \quad (7)$$

где $V(E(Y|X_{-i}))$ – условная дисперсия, при фиксации всех возможных факторов X не являющихся X_i .

Расчет показателей чувствительности выполняется методом Монте-Карло по предложенному алгоритму [9, 10].

1. Генерация матрицы $(N, 2m)$ случайных чисел, из которой выделяются матрицы $A(N, m)$ и $B(N, m)$. Здесь базовая выборка $N = 1000-10000$, количество входных факторов $m = 7$.

2. Формирование матриц $C_i(N, m)$, получаемых из матрицы B путем замены i -го столбца на i -й столбец из матрицы A .

3. Расчет значений смещения центра заготовки δ_x и δ_y по системе уравнений (5) для выборок матриц A , B и C_i и получение векторов выходных значений y_A , y_B и y_{C_i} (т. е. δ_{Ax} , δ_{Bx} , δ_{Cix} , δ_{Ay} , δ_{By} и δ_{Ciy}).

4. Расчет одномерных показателей чувствительности S_i . Формула (6) при этом может быть представлена в виде:

ну смещения центра заготовки выполнен регрессионный анализ данных машинного полного факторного эксперимента для оценки погрешности базирования заготовки в опорных призмах с учетом допусков соосности и круглости.

Результаты

Полученные показатели чувствительности показан на рис. 3.

Оценка вероятности ошибки не превышает 50 % от величины стандартной ошибки и может быть определена как

$$P.E_{S_i} = \frac{0,6745}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_j (y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)})^2 - \left((1/N) \sum_j y_A^{(j)} y_{C_i}^{(j)} \right)^2};$$

$$P.E_{S_{Ti}} = \frac{0,6745}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_j (y_B^{(j)} y_{C_i}^{(j)})^2 - \left((1/N) \sum_j y_B^{(j)} y_{C_i}^{(j)} \right)^2}.$$

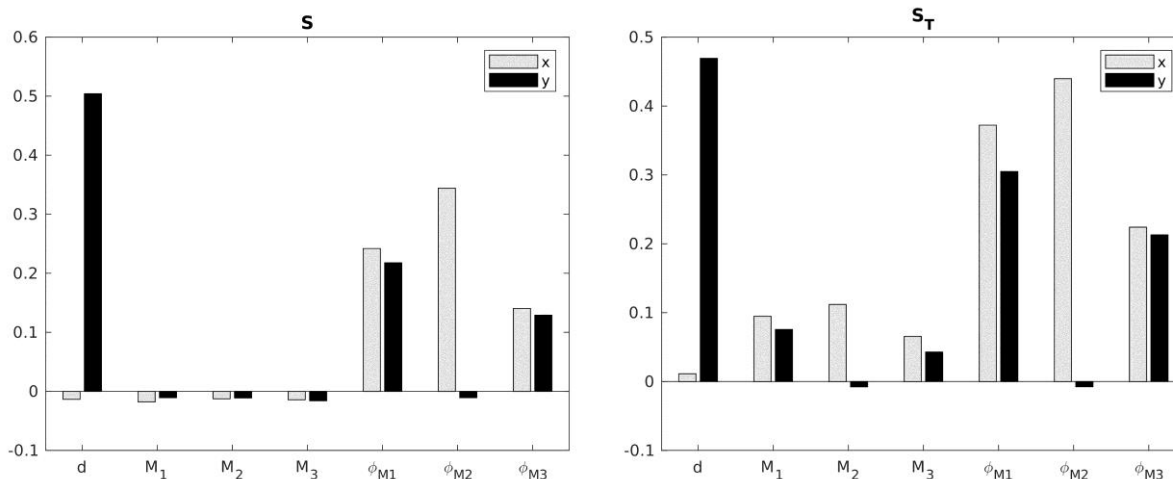


Рис. 3. Одномерные S_i и полные S_{T_i} показатели чувствительности
 Fig. 3. First-order S_i and total-effect S_{T_i} sensitivity indices

Вероятности ошибки $P.E$ в направлении оси x находятся в диапазоне $0,0033...0,0036$ для S_i и $0,0086...0,0106$ для S_{T_i} ; в направлении оси y – в диапазоне $0,0044...0,0055$ для S_i и $0,0109...0,0130$ для S_{T_i} .

Анализ значений показателей чувствительности позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения макроотклонений в модели (5) при случайном положении заготовки в призме сами по себе дают пренебрежимо малый вклад в смещение центра δ (одномерные показатели чувствительности $S_i \approx 0$).

2. Вклад макроотклонений базовой поверхности заготовки появляется только при совместном учете значений макроотклонений (M_1 , M_2 и M_3) и начальных фазовых углов (ϕ_{M1} , ϕ_{M2} , и ϕ_{M3}).

3. Вариация диаметра заготовки d не оказывает влияния на смещение центра заготовки вдоль оси x (δ_x). Вариация значений овальности M_2 даже с учетом фазового угла ϕ_{M2} оказывает пренебрежимо малое влияние на смещение центра заготовки вдоль оси y (δ_y).

Анализ влияния фазовых углов макроотклонений. Смещение центра заготовки вследствие наличия на базовой поверхности макроотклонений, очевидно, существенно зависит от фактического положения этих погрешностей относительно базовых поверхностей призмы. Определить особенности этой взаимосвязи позволяет анализ точечных диаграмм смещения цен-

тра заготовки δ на случайной выборке входных факторов заготовки: диаметра d , макроотклонений M_1 , M_2 и M_3 и фазовых углов ϕ_{M1} , ϕ_{M2} , и ϕ_{M3} (рис. 4 и 5).

На полученных точечных диаграммах хорошо видны изменения положения центра заготовки в вертикальном направлении δ_y из-за изменений размера d , а также изменения центра δ при повороте заготовки и соответствующих изменениях фазовых углов ϕ_{M1} , ϕ_{M2} , и ϕ_{M3} . Влияние фактических значений макроотклонений (M_1 , M_2 и M_3) на положение центра заготовки в призме заметно в меньшей степени: при увеличении значений макроотклонений смещение центра варьируется в большем диапазоне значений. Также хорошо видно, что при случайном угловом положении заготовки средние значения δ ($E_{X-i}(Y|X_i)$) от действия факторов M_1 , M_2 и M_3 группируются вдоль горизонтали.

Анализ точечных диаграмм позволяет изучить влияние начальных фазовых углов макроотклонений в рамках полученной модели установки заготовки на опорную призму. Можно визуально определить и проверить по модели (5) значения углов, дающих экстремальные значения смещения центра заготовки δ . Так, вдоль горизонтальной оси максимальные смещения δ_x получаются при углах $\phi_{M1} = 0$ и $\phi_{M1} = \pi$, $\phi_{M2} = \pi/2$ и $\phi_{M2} = 3\pi/2$, $\phi_{M3} = 0$ и $\phi_{M3} = 2\pi/3$; вдоль вертикальной оси δ_y – при углах $\phi_{M1} = \pi/2$ и $\phi_{M1} = 3\pi/2$, $\phi_{M3} = \pi/2$ и $\phi_{M3} = 3\pi/2$.

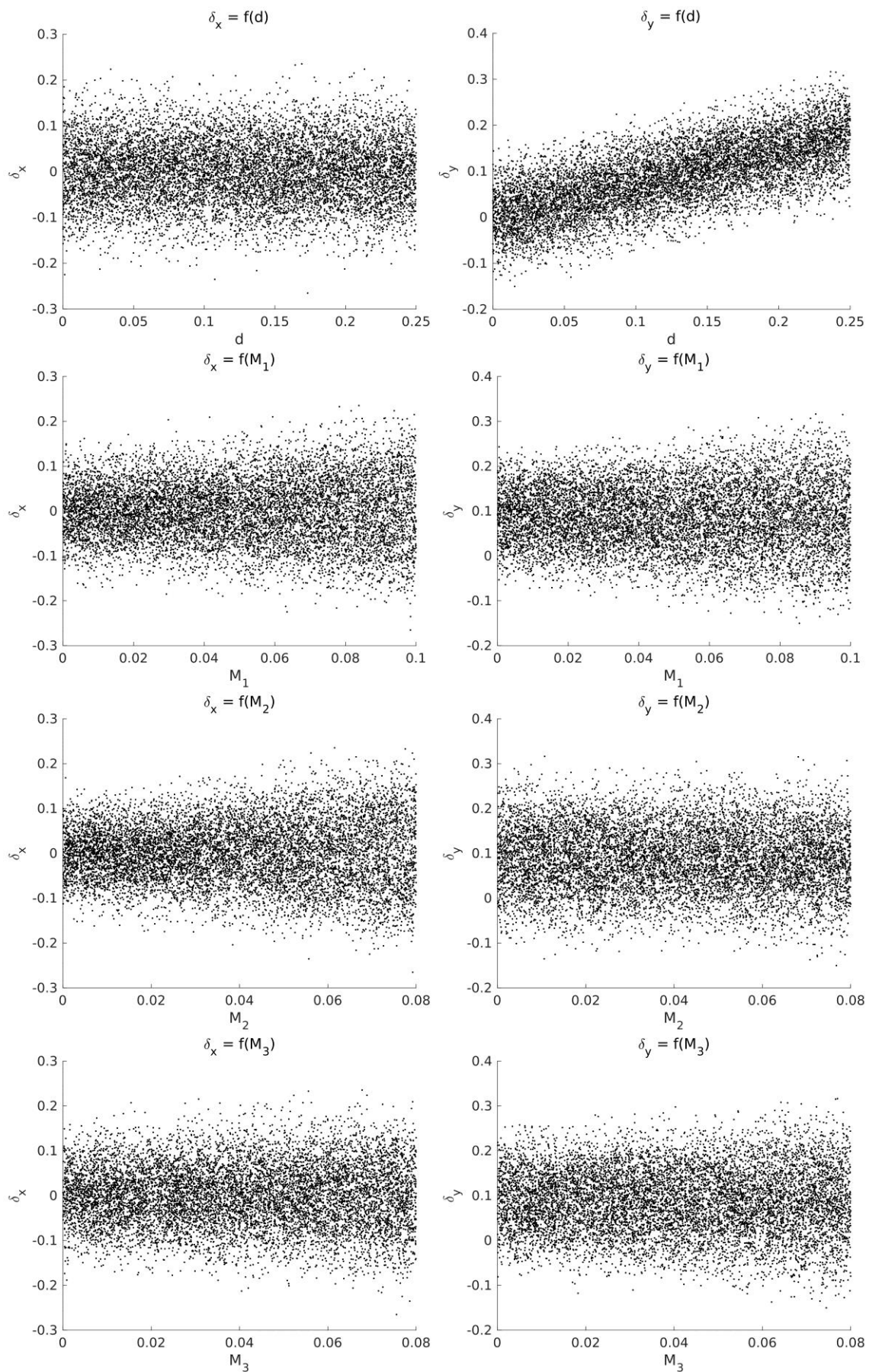


Рис. 4. Смещение заготовки вследствие изменения факторов d , M_1 , M_2 и M_3
 Fig. 4. Adjustments of blank due to d , M_1 , M_2 and M_3 variations

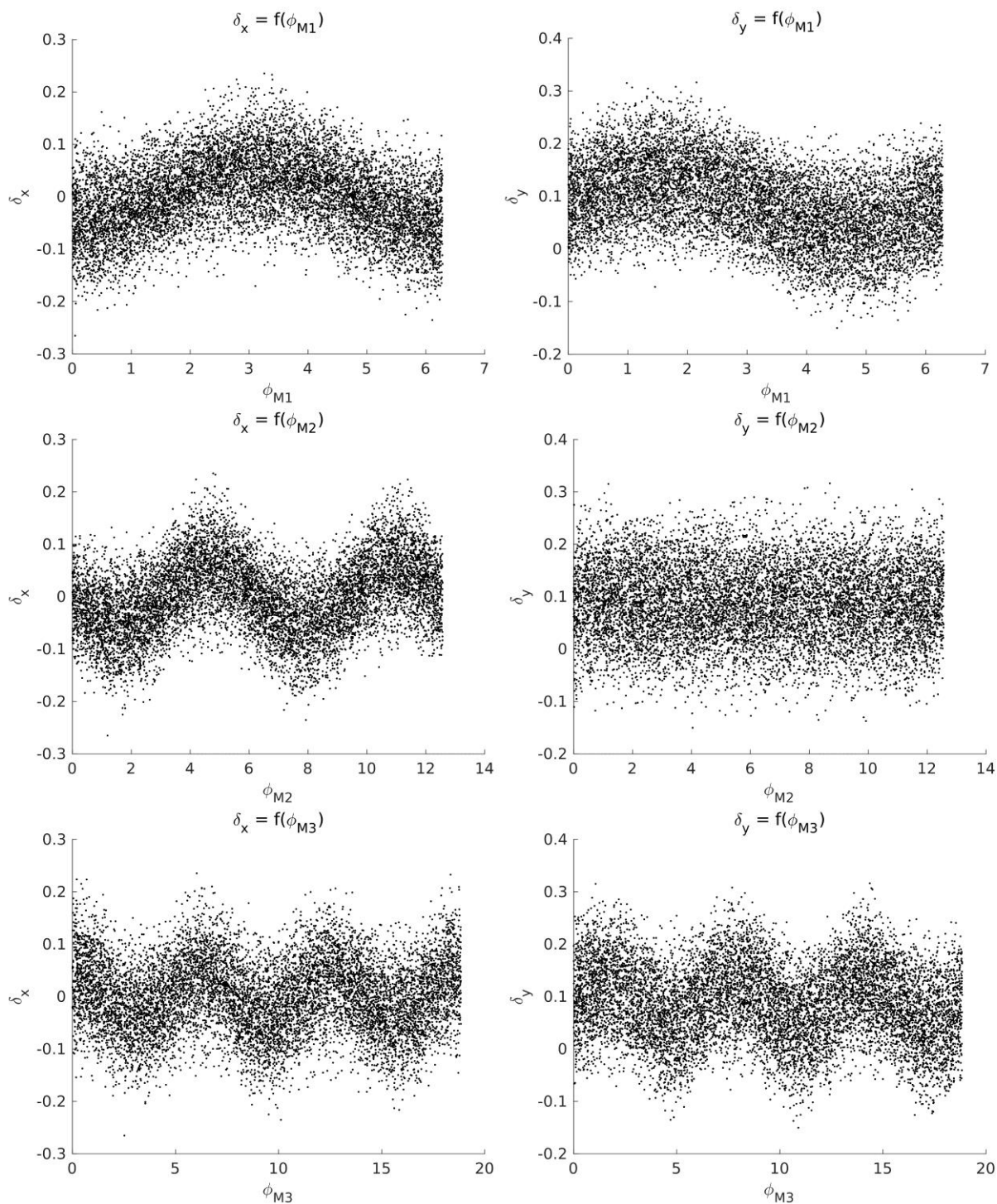


Рис. 5. Смещение заготовки вследствие изменения углов ϕ_{M1} , ϕ_{M2} и ϕ_{M3}
 Fig. 5. Adjustments of blank due to ϕ_{M1} , ϕ_{M2} и ϕ_{M3} variations

Определение погрешности базирования методом «максимум-минимум». Одним из методов решения размерных цепей является метод «максимум-минимум». При расчете предполагается, что детали имеют предельные значения своих размеров и это вызывает экстремальные значения замыкающего звена (в данном случае смещения центра заготовок δ). Фиксируя значения

начальных фазовых углов ϕ_{M1} , ϕ_{M2} , и ϕ_{M3} на значениях, позволяющих получить максимальный эффект от соответствующих макроотклонений, можно преобразовать модель (5) из нелинейной в линейную. Пример точечных диаграмм, полученных на случайной выборке после фиксации фазовых углов, приведен на рис. 6.

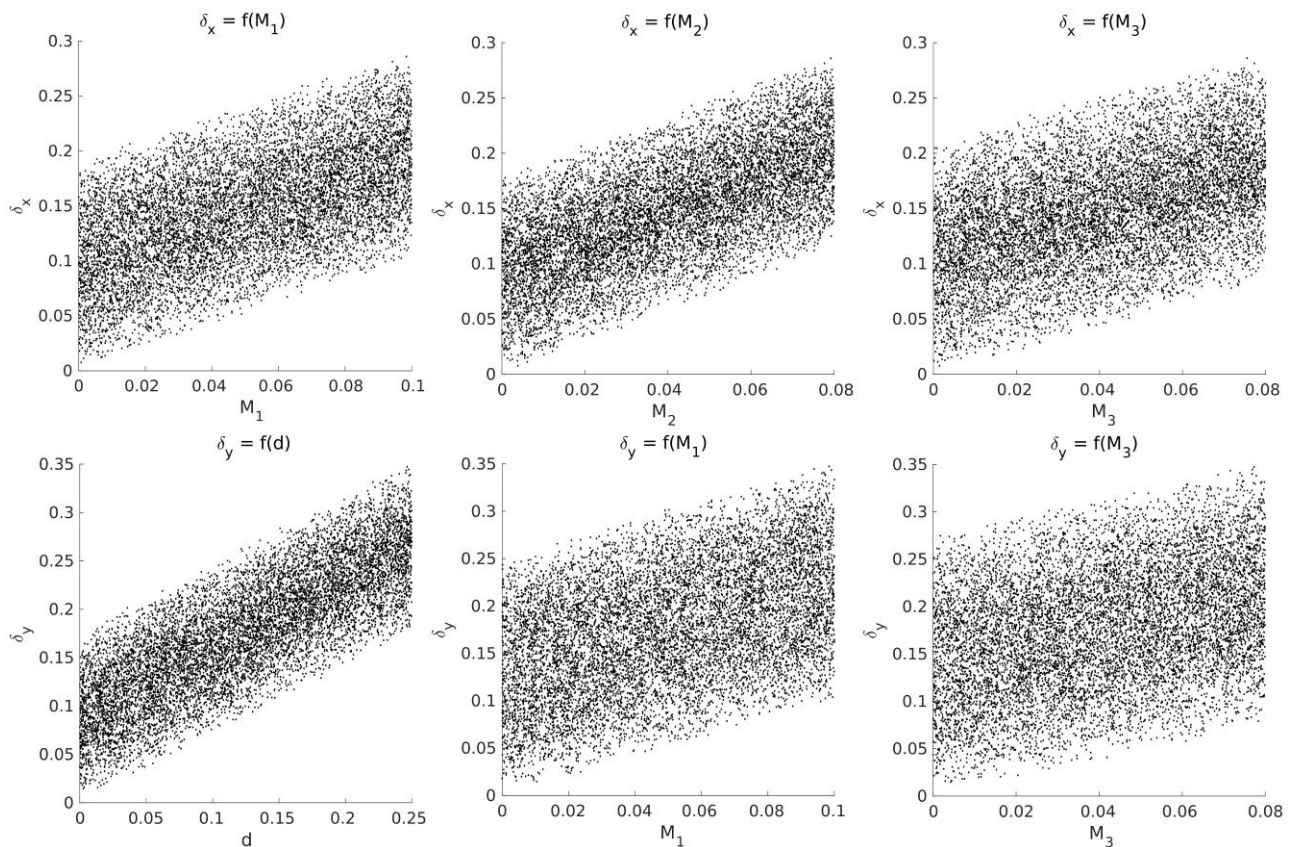


Рис. 6. Смещение центра заготовки δ в худших случаях
Fig. 6. Adjustments of blank δ in worst case

Регрессионный анализ полученных данных позволил получить уравнение регрессии вида $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ для определения погрешности базирования заготовки при установке ее на призму в горизонтальном направлении $\varepsilon_{\delta x}$ и в вертикальном направлении $\varepsilon_{\delta y}$:

зонтальном направлении $\varepsilon_{\delta x}$ и в вертикальном направлении $\varepsilon_{\delta y}$:

$$\varepsilon_{\delta x} = T_{M_1} + 1,414T_{M_2} + T_{M_3}. \quad (8)$$

Параметры регрессионной модели:

$$r^2 = 1, r_a^2 = 1. F = 5,6 \cdot e^{+12}, pValue = 0.$$

$$\varepsilon_{\delta y} = 0,707T_d + 1,016T_{M_1} + 0,952T_{M_3}. \quad (9)$$

Параметры регрессионной модели:

$$r^2 = 1, r_a^2 = 1. F = 3,5 \cdot e^{+9}, pValue = 0.$$

Определение погрешности базирования заготовки вероятностным методом. Анализ размерных цепей методом «максимума-минимума» дает максимальные значения замыкающего звена. Это обеспечивает большой запас точности и гарантию отсутствия брака при изготовлении и сборке деталей и узлов. Часто при решении практических задач конструкторско-технологической подготовки производства не требуется такой надежности, а использование более широких допусков параметров позволяет получить меньшую себестоимость изделий.

определении погрешности базирования ε_{δ} значительное влияние на фактическое смещение заготовки оказывают случайные значения начальных фазовых углов макротклонений. На точечных диаграммах, представленных на рис. 3, видно, что предельные значения смещений заготовки наблюдаются только при определенных соотношениях между фазами гармоник и при определенном положении заготовки в призме. Вероятность одновременного наступления всех этих событий невелика, что позволяет обоснованно уменьшить расчетное значение погрешности базирования ε_{δ} . Переход от расчета фактического

При установке заготовки в призму и

положения заготовки в призме к определению погрешности базирования ε_{δ} путем анализа некоторого объема выборки, позволяет получить зависимости с учетом случайного характера распределения макронеровностей.

Для моделирования допусков и получения регрессионной модели использовался объем выборки в 200 тыс., что позволяет получить относительную ошибку порядка 0,22 %. Сходимость погрешности базирования ε_{δ} заготовки представлена на рис. 7.

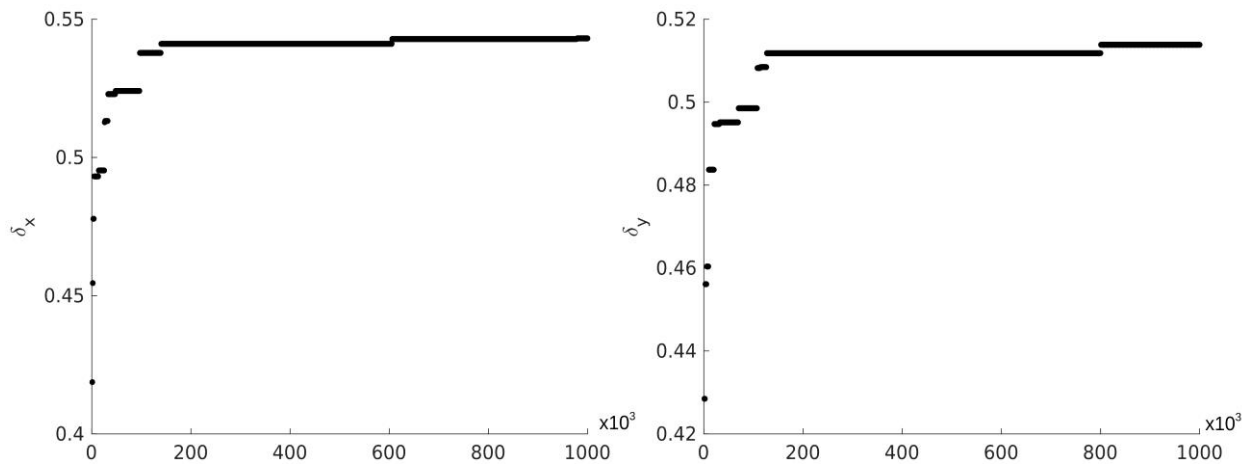


Рис. 7. Сходимость погрешности базирования ε_{δ} при увеличении размера выборки
 Fig. 7. Convergence of the error of basing ε_{δ} with increasing sample size

Регрессионный анализ данных, полученных после выполнения полного факторного машинного эксперимента, позволил получить уравнения регрессии вида $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ для определения

погрешности базирования заготовки при установке ее в призму с учетом макроотклонений в горизонтальном направлении $\varepsilon_{\delta x}$ и в вертикальном направлении $\varepsilon_{\delta y}$:

$$\varepsilon_{\delta x} = 0,922T_{M_1} + 1,312T_{M_2} + 0,903T_{M_3}. \quad (10)$$

Параметры регрессионной модели:

$$r^2 = 0,996, r^2_a = 0,993. F = 405, pValue = 0.$$

$$\varepsilon_{\delta y} = 0,691T_d + 0,960T_{M_1} + 0,941T_{M_3}. \quad (11)$$

Параметры регрессионной модели:

$$r^2 = 0,999, r^2_a = 0,999. F = 2134, pValue = 0.$$

Заключение

В данной работе при помощи теории размерных связей разработана модель самоустановки заготовки в опорной призме с учетом несоосности и отклонений от круглости.

Анализ полученных зависимостей (8) – (11) показывает, что погрешность базирования ε_{δ} , в рамках полученной модели, полностью описывается допуском диаметра заготовки T_d , допуском соосности T_{M_1} и допусками круглости T_{M_2} и T_{M_3} . Зависимо-

сти (10) и (11) для расчета погрешности базирования вероятностным методом ожидаемо имеют меньшие значения коэффициентов регрессии в сравнении с аналогичными (8) и (9), полученными методом «максимума-минимума». Все зависимости можно использовать в инженерной практике для расчета погрешности базирования деталей и заготовок при установке на опорные призмы с углом v-паза $\alpha = 90^\circ$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дальский А.М. и др. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.М. Дальского и др.; Т. 1. 5 изд., испр. М.: Машиностроение; Изд-во Машиностроение-1, 2003 (ППП Тип. Наука). 910 с.
2. Филькин Д.М., Польский Е.А. Анализ точности установки заготовок на опорные призмы с учетом влияния размерных связей // Научные технологии в машиностроении. 2020. №6(108). С. 21-27.
3. Польский Е.А., Сорокин С.В. Технологическое обеспечение надежности деталей узлов трения наукоемких сборочных единиц // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 4(77). С. 19-26. doi 10.30987/article_5cb58f4f589ff6.30206728.
4. Качество машин: Справ. в 2 т. / Т. 1.; Под общ. ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 1995. 253 с.
5. Weihua N., Zhenqiang Y. Cylindricity modeling and tolerance analysis for cylindrical components// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. №64(5-8). С. 867–874. doi 10.1007/s00170-012-4078-3.
6. Yoon M.C., Chin D.H. Fractal roundness modelling of a measured profile of a cylindrical object // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006. №35(11). С.1156–1165. doi 10.1007/s00170-006-0797-7.
7. Соболев И.М. Глобальные показатели чувствительности для изучения нелинейных математических моделей // Математическое моделирование. 2005. №17:9. С. 43-52.
8. Sobol', I.M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimate // Mathematics and Computers in Simulation, 2001. №55(1-3). С. 271–280.
9. Sobol' I.M. (1990). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. Mathematics and Computers in Simulation. 2001. Vol. 55, Iss. 1–3. P. 271-280. doi 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
10. Saltelli A. Making best use of model valuations to compute sensitivity indices // Computer Physics Communications. 2002. Vol. 145, Iss. 2. P. 280-297. doi 10.1016/S0010-4655(02)00280-1.

REFERENCES

1. Dalskiy A.M. et al. Handbook of a machine-building technologist: In 2 vol. / Edited by A.M. Dalskiy et al.; Vol. 1. 5 ed., corrected M.: Mashinostroenie; Publishing House Mashinostroenie -1, 2003 (PPP Type. Science). 910 pp.
2. Filkin D.M., Polskiy E.A. Accuracy analysis of billet installation upon supporting prisms, taking into account dimensional tie impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020. No. 6(108). pp. 21-27.
3. Polskiy E.A., S. Sorokin.V. Reliability technological support of friction unit parts of science intensive assembly units // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019. No. 4(77). pp. 19-26. doi 10.30987/article_5cb58f4f589ff6.30206728.
4. Machine Quality : Reference. in 2 vol. / vol. 1.; Edited by A. G. Suslov. M.: Mashinostroenie, 1995. 253 p.
5. Weihua N., Zhenqiang Y. Cylindricity modeling and tolerance analysis for cylindrical components// *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. №64(5-8). С. 867–874. doi 10.1007/s00170-012-4078-3.
6. Yoon M.C., Chin D.H. Fractal roundness modelling of a measured profile of a cylindrical object // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. №35(11). С.1156–1165. doi 10.1007/s00170-006-0797-7.
7. Sobol I.M. Global sensitivity indicators for the study of nonlinear mathematical models // *Mathematical modeling*. 2005. No 17:9. pp. 43-52.
8. Sobol', I.M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimate // *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001. №55(1-3). С. 271–280.
9. Sobol' I.M. (1990). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. Mathematics and Computers in Simulation. 2001. Vol. 55, Iss. 1–3. P. 271-280. DOI 10.1016/S0378-4754(00)00270-6.
10. Saltelli A. Making best use of model valuations to compute sensitivity indices // *Computer Physics Communications*. 2002. Vol. 145, Iss. 2. P. 280-297. doi 10.1016/S0010-4655(02)00280-1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунаев, П. Ф. Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 2006. - 399 с.
2. Gao, J. Generalized 3-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments / Jinsong Gao, Kenneth W. Chase, Spencer P. Magleby // *IE Transactions*. - 1998. - Vol.30, - P.367-377. - doi 10.1023/A:1007451225222.
3. Ильицкий, В. Б. Погрешности базирования и положения деталей в призмах / В. Б. Ильицкий, В. В. Ерохин // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2008. - №3. - С. 17-21.
4. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение надежности деталей узлов трения наукоемких

сборочных единиц / Е. А. Польский, С. В. Сорокин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2019. - № 4(77). - С. 19-26. – doi: 10.30987/article_5cb58f4f589ff6.30206728.

5. Суслов, А. Г. Параметры качества функцио-

нальных поверхностей призм/ А. Г. Суслов, В. В. Ерохин, И. В. Говоров // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2008. - №6 - С. 35-42.

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. **Dunaev, P. F.** Calculation of dimensional tolerances / P. F. Dunaev, O. P. Lelikov. - 4th ed., reprint and add. - Moscow : Mashinostroenie, 2006. - 399 p.
2. **Gao, J.** Generalized 3-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments / Jinsong Gao, Kenneth W. Chase, Spencer P. Magleby // IIE Transactions. - 1998. - Vol.30, - P.367-377. - doi 10.1023/A:1007451225222.
3. **Plitskiy, V. B.** Errors of basing and position of parts in vees / Ilicki V. B., V. V. Erokhin // *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii [Assembly in Me-*

chanical Engineering, Instrumentation]. - 2008. - No. 3. - P. 17-21.

4. **Polskiy E.A.** Technological reliability parts of friction units of high-tech assembly units / Polskiy E.A., Sorokin S. V. // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2019. - № 4(77). - Pp. 19-26. - doi 10.30987/article_5cb58f4f589ff6.30206728.
5. **Suslov, A. G.** Quality parameters of functional surfaces of vees / A. G. Suslov, V. V. Erokhin, I. V. Govorov // Handbook. Engineering journal with appendix. - 2008. - No. 6 - p. 35-42.

Ссылка для цитирования:

Филькин, М.Ф. Погрешность базирования заготовок при установке на опорные призмы с учетом макроотклонений / М.Ф. Филькин, Е.А. Польский // *Транспортное машиностроение*. – 2022. - № 1-2. – С. 8 – 19. doi: 10.30987/2782-5957-2022-01-02-8-19.

Информация об авторах:

Филькин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. +7(953)292-13-92, e-mail: filkin.dm@mail.ru.

Польский Евгений Александрович, кандидат

технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел.: +7(909)243-65-95, e-mail: polski.eugene@hotmail.com.

Filkin Dmitry Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering at Bryansk State Technical University, phone: +7(953)292-13-92, e-mail: filkin.dm@mail.ru.

Polskiy Yevgeniy Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering at Bryansk State Technical University, phone: +7(909)243-65-95, e-mail: polski.eugene@hotmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.10.2021; одобрена после рецензирования 26.11.2021; принята к публикации 15.01.2022. Рецензент – Макаров М.Ф., доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.24.2021; approved after review on 11.26.2021; accepted for publication on 01.15.2022. The reviewer is Makarov M.F., Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Innovative Engineering Technologies at Perm National Research Polytechnic University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.