

УДК 621.71

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-80-86

## Двухэлементная селективная сборка с нелинейными моделями «вход-выход» с использованием аппроксимации

О. В. Филипович, кандидат технических наук,

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Рассматривается процесс однопараметрической селективной сборки двух элементов для случая использования нелинейной модели «вход-выход». Ввиду объективной сложности определения соотношений между предельными отклонениями и допусками входных и выходных параметров, а также малости относительной точности, обусловленной прецизионностью соединения, исходную модель целесообразно представить в виде полинома первого порядка двух переменных. Линеаризацию предлагается осуществить с использованием метода, заключающимся в получении аппроксимирующей зависимости в виде ряда Тейлора и с использованием многомерного метода наименьших квадратов, с последующим сравнением вариантов по заданному критерию. Критерием выбора одного из двух предложенных вариантов является минимум средней ошибки аппроксимации. Для определения величин групповых допусков предлагается использование двух способов: назначения одинаковых допусков; назначения допусков одинаковой относительной точности. Для обоих способов приведен вывод уравнений комплектования, позволяющего, при наличии определенных допущений, использовать номера селективных групп. С использованием линеаризованной модели определены основные показатели сборочного процесса: количество сборочных комплектов, незавершенного производства и предварительного брака. Приведен пример для случая, когда выходной параметр образуется путем произведения параметров входных элементов. Произведены расчеты коэффициентов и определено уравнение комплектования. Сравнение приведенных в статье результатов с результатами, полученными ранее (исходная нелинейная модель), показывает относительно небольшую расходимость при расчетах границ селективных групп, погрешность определения вероятности получения сборочных комплектов в целом не превышает 0,5 %. Предложенный метод применим в случае малых значений относительной точности входных и выходных параметров, что на практике соответствует селективному комплектованию прецизионных изделий.

**Ключевые слова:** селективная сборка, математическая модель, нелинейная зависимость, аппроксимация, ряд Тейлора, метод наименьших квадратов.

### Постановка задачи

Линейные зависимости между входными и выходными параметрами достаточно часто встречаются при сборке изделий машиностроения и приборостроения, что отмечается в работах отечественных [1–7] и зарубежных [8–13] исследователей, посвященных теории селективной сборки и использованию теоретических разработок в реальных производственных процессах.

Рассмотрим процесс двухэлементной однопараметрической селективной сборки с нелинейной моделью «вход-выход»  $y = g(x_i)$  ( $i = \overline{1,2}$ ), частный случай (выходной параметр представлен в виде произведения входных) приведен в [14, 15]. Предположим, что каждый из входных параметров  $x_i$  ( $i = \overline{1,2}$ ) имеет отклонения относительно номинального значения, обусловленные несовершенством технологического процесса изготовления элементов. Исходными данными для решения задачи служат номинальные значения параметров элементов  $(y_n, x_{1n}, x_{2n})$ , величины допусков  $Ty$  и  $Tx_i$ ,

верхнее  $E_{y_u}$  и нижнее  $E_{y_n}$  предельные отклонения выходного параметра от своего номинала.

Допуск на выходной параметр  $Ty$  зависит от номинального значения и принятой степени точности. Если речь идет о прецизионных изделиях, то отношение  $\alpha_y = \frac{T_y}{y_n}$ , являющееся отно-

сительной точностью, достаточно мало.

Соответственно, для обеспечения заданной точности необходимо, чтобы отношения  $\frac{Tx_i^{(k_i)}}{x_{in}} = \alpha_i$  имели порядок, гораздо меньший, чем

у  $\alpha_y$ , где  $Tx_i^{(k_i)}$  – групповой допуск  $k_i$ -й селективной группы. В этом случае исходную зависимость  $y = g(x_i)$  можно линеаризовать, представив в виде

$$y = \xi_0 + \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2. \quad (1)$$

Целью исследования является разработка метода линеаризации исходной известной нелинейной зависимости «вход-выход» для решения задачи селективной сборки двух элементов.

**Модель и метод**

Для линеаризации предлагается двухвариантный метод, заключающийся в получении аппроксимирующей зависимости:

1) в виде ряда Тейлора,

2) с использованием многомерного метода наименьших квадратов (МНК), с последующим сравнением вариантов по заданному критерию.

Вариант 1. Ряд Тейлора в точке  $x_0$  функции  $y(x)$  вещественной переменной  $x$ , бесконечно дифференцируемой в окрестности точки  $x_0$ :

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n. \quad (2)$$

В общем случае для функции двух переменных разложение в ряд Тейлора в окрестности точки с координатами  $(x_{10}, x_{20})$  имеет вид

$$y = g(x_i) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{T^n g(x_{i0})}{n!}, \quad (i = \overline{1, 2}), \quad (3)$$

где  $T = (x_1 - x_{10}) \frac{\partial}{\partial x_1} + (x_2 - x_{20}) \frac{\partial}{\partial x_2}$  – дифференциальный оператор. Пусть функция  $y = g(x_i)$  имеет в окрестности точки  $(x_{10}, x_{20})$  непрерывные частные производные как минимум второго порядка. Для линеаризации  $y = g(x_i)$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) возьмем два первых члена ряда (3):

$$y = g(x_i) = g(x_{i0}) + \sum_{i=1}^2 (x_i - x_{i0}) \frac{\partial g(x_{i0})}{\partial x_i} + R_1(x_i), \quad (4)$$

где  $R_1(x_i)$  – остаточный член в форме Лагранжа, равный

$$R_1(x_i) = \frac{T^2 g(x_{i0})}{2}. \quad (5)$$

Тогда выражение (4) можно переписать в виде

$$y(x_i) = \xi_0 + \sum_{i=1}^2 \xi_i x_i + R_1(x_i), \quad (6)$$

где

$$\xi_0 = g(x_{i0}) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial g(x_{i0})}{\partial x_i} x_{i0}, \quad \xi_i = \frac{\partial g(x_{i0})}{\partial x_i} \quad (i = \overline{1, 2}) \quad (7)$$

Вариант 2. При линеаризации с использованием метода наименьших квадратов критерием качества «подгонки» функции к заданной выборке служит сумма квадратов ошибок. Задача состоит в построении «гиперплоскости» с использованием аналога одношагового многомерного МНК в предположении об аддитивности ошибок  $\varepsilon$ :

$$y = \hat{g}(x_i) + \varepsilon, \quad (8)$$

где

$$\hat{g}(x_i) = \xi_0 + \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2 = \xi_0 + \sum_{i=1}^2 \xi_i x_i. \quad (9)$$

Расчетная область  $X_i$  в пределах расширенных допусков на изготовление  $Tx_i$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) покрывается прямоугольной сеткой из  $N_i$  точек, при этом  $N_1 = N_2$ ;  $\prod_{i=1}^2 N_i = N \gg 2$ . Сеткой определяются узлы, в которых вычисляются значения исходной функции  $y = g(x_i)$ . Введем обозначения

•  $x_i(j)$  – значение переменной  $x_i$  в узле  $j$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $i = \overline{1, 2}$ ;

•  $y(j)$  – значение функции  $g(x_i)$  в узле с координатами  $(x_1(j), x_2(j))$ ;

•  $\varepsilon(j)$  – значение ошибки в узле с координатами  $(x_1(j), x_2(j))$ .

Тогда

$$y(j) = \xi_0 + \sum_{i=1}^2 \xi_i x_i(j) + \varepsilon(j), \quad j = \overline{1, N}, \quad (10)$$

или в матричной форме:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\Xi} + \mathbf{E}, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \dots \\ y(N) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1(1) & x_2(1) \\ 1 & x_1(2) & x_2(2) \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_1(N) & x_2(N) \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Xi} = \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \varepsilon(1) \\ \varepsilon(2) \\ \dots \\ \varepsilon(N) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Критерий наименьших квадратов в многомерном случае имеет вид

$$\mathbf{E}^T \mathbf{E} = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\Xi})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\Xi}), \quad (13)$$

а оценка коэффициентов, получаемая путем решения системы нормальных уравнений в векторно-матричной форме, определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{\Xi} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (14)$$

Критерием выбора одного из двух предложенных вариантов является минимум средней ошибки аппроксимации, определяемой по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_j \varepsilon(j)}{N}, \quad (15)$$

где  $N$  – количество узлов, образованных при наложении прямоугольной сетки, идентичной по шагу и границам для обоих вариантов.

Для зависимости «вход-выход», записанной в форме (1), выражения для определения предельных отклонений и величин допусков будут иметь вид

$$\sum_{i=1}^2 \xi_i Eix_i \geq Eiy; \sum_{i=1}^2 \xi_i Esx_i \leq Eiy; Ty \geq \sum_{i=1}^2 \xi_i Tx_i^{(k_i)}, \quad (16)$$

где  $Esx_i$  и  $Eix_i$  – соответственно верхние и нижние предельные отклонения параметров  $x_i$  от номинальных значений  $x_{in}$ .

Для определения величин групповых допусков предлагается использование способов:

1) назначения одинаковых допусков:

$$Tx_i^{(k_i)} = \frac{Ty}{2}, \quad i = \overline{1,2} \quad (17)$$

2) назначения допусков одинаковой относительной точности:

$$Tx_i^{(k_i)} = \alpha_m x_i, \quad \alpha_m \leq \frac{Ty}{\sum_{i=1}^2 \xi_i x_i}. \quad (18)$$

Имея зависимость (1) с вычисленными коэффициентами  $\xi$ , предположим, что количество селективных групп будет нечетным. Пронумеруем группы таким образом, чтобы нулевые значения параметров совпадали с серединами нулевых групп (рис. 1).

Номера групп положительны при  $x_i > 0$  и отрицательны при  $x_i < 0$ .

Определим уравнение комплектования для максимально допустимых групповых допусков, при которых гарантируется полная собираемость элементов из «нулевых» селективных групп.

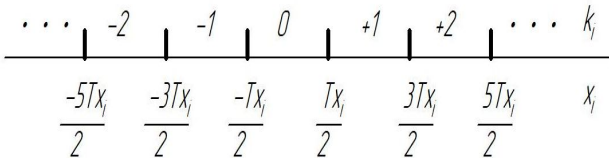


Рис. 1. Схема расположения и нумерация интервалов групповых допусков

Fig. 1. Layout and numbering of group tolerance intervals

Для простоты положим равенство допусков параметров элементов, т. е. выполнение равенства (17).

Тогда в  $k_i$ -ю группу попадают элементы  $i$ -го типа с параметрами, значения которых удовлетворяют неравенствам

$$Tx_i^{(k_i)}(k_i - 1/2) \leq x_i < Tx_i^{(k_i)}(k_i + 1/2). \quad (19)$$

Умножив обе части на соответствующие коэффициенты  $\xi$ , получим:

$$\xi_i Tx_i^{(k_i)}(k_i - 1/2) \leq \xi_i x_i < \xi_i Tx_i^{(k_i)}(k_i + 1/2). \quad (20)$$

Сложив неравенства (20) по  $i$  и проведя преобразования с учетом (17), имеем

$$\frac{Ty}{2} \sum_{i=1}^2 \xi_i k_i - \frac{Ty}{2} \leq \sum_{i=1}^2 \xi_i x_i < \frac{Ty}{2} \sum_{i=1}^2 \xi_i k_i + \frac{Ty}{2}. \quad (21)$$

Для выполнения требований на допустимые значения выходного параметра необходимо следующее:

$$\sum_{i=1}^2 \xi_i k_i = 0, \quad k_i \in \mathbb{Z}. \quad (22)$$

При использовании второго способа должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^2 \xi_i x_i k_i = 0, \quad k_i \in \mathbb{Z}. \quad (23)$$

Очевидно, что при равенстве  $|\xi_i|$  для первого способа и  $|\xi_i| x_i$  для второго ( $i = \overline{1,2}$ ) уравнение комплектования примет вид

$$\sum_{i=1}^2 \text{sgn}(\xi_i) k_i = 0, \quad k_i \in \mathbb{Z}. \quad (24)$$

### Пример моделирования

Предположим, что распределения значений  $x_i$  – гауссовские, имеющие параметры  $m_{x_i}$  и  $\sigma_{x_i}$  (математические ожидания и среднеквадратические отклонения случайных величин  $x_i$ ). Все значения приведены в условных единицах (у. е.).

Исходные данные:

1. Номинальные значения параметров  $x_{1n} = 10000$ ;  $x_{2n} = 0,1$ .

2. Выходной параметр изделия  $y = x_1 x_2 = 1000 \pm 2,5$ .

3. Величины расширенных допусков  $Tx_1 = 200$ ;  $Tx_2 = 0,002$ .

4. Математические ожидания:  $m_{x_1} = 0$ ;  $m_{x_2} = 0$ ; среднеквадратические отклонения:  $\sigma_{x_1} = 33,333$ ;  $\sigma_{x_2} = 0,00036$ .

Плотности распределения параметров случайных величин  $x_i$  показаны на рис. 2. Результат аппроксимации представим в виде (1).

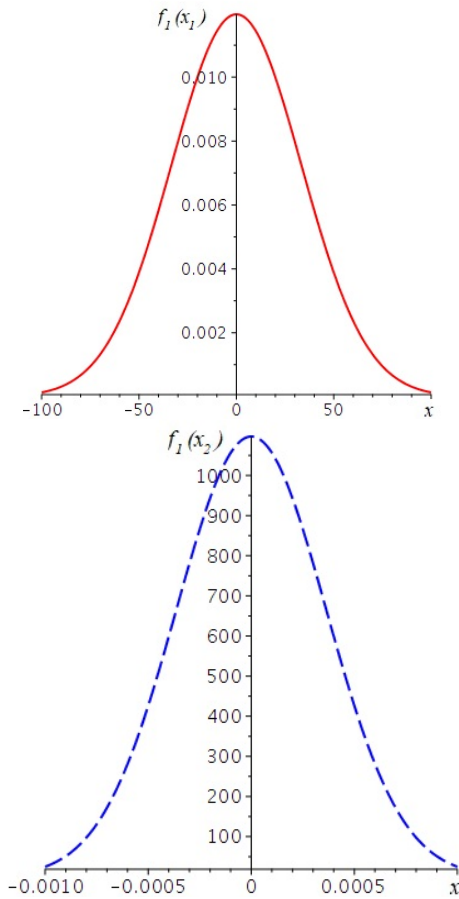


Рис. 2. Плотности распределения СВ  $X_i$

Fig. 2. Distribution densities of random variables  $X_i$

При использовании варианта 1:

$$y(x_1, x_2) = x_{10}x_{20} + x_{20}(x_1 - x_{10}) + x_{10}(x_2 - x_{20}) + R_1(x_1, x_2) \quad (25)$$

где  $R_1(x_1, x_2)$  – остаточный член, в данном случае равный  $(x_1 - x_{10})(x_2 - x_{20})$ . Пренебрегая остаточным членом и проведя преобразования, получим выражение (1), в котором  $\xi_0 = -x_{10}x_{20}$ ,  $\xi_1 = x_{20}$ ,  $\xi_2 = x_{10}$ .

При использовании варианта 2 система нормальных уравнений имеет вид (опущены пределы суммирования по индексу  $j = \overline{1, N}$ ):

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_0 N + \xi_1 \sum_j x_1(j) + \xi_2 \sum_j x_2(j) &= \sum_j y(j), \\ \xi_0 \sum_j x_1(j) + \xi_1 \sum_j (x_1(j))^2 + \\ + \xi_2 \sum_j x_1(j)x_2(j) &= \sum_j x_1(j)y(j), \\ \xi_0 \sum_j x_2(j) + \xi_1 \sum_j x_1(j)x_2(j) + \\ + \xi_2 \sum_j (x_2(j))^2 &= \sum_j x_2(j)y(j). \end{aligned} \right. \quad (26)$$

В матричной форме выражение (26) можно записать в виде

$$X^T X \Xi = X^T Y, \quad (27)$$

где матрицы, входящие в (27), будут определяться выражениями (12). Его решением будет являться выражение (14).

При аппроксимации для обоих вариантов имеем идентичные значения коэффициентов (с точностью до десятого знака после запятой):  $\xi_0 = -1000$ ,  $\xi_1 = 0,1$ ,  $\xi_2 = 10000$ . Это означает, что для любого способа определения групповых допусков уравнение одновариантного комплектования запишется как

$$k_1 + k_2 = 0 \text{ или } k_1 = -k_2. \quad (28)$$

Графики зависимостей  $y(x_1, x_2)$  для исходной (поверхность 1) и аппроксимированной (плоскость 2) функций от своих аргументов показаны на рис. 3. Для визуализации в качестве пределов построения графиков взяты пятидесятикратные значения исходных предельных отклонений параметров от своих номинальных значений.

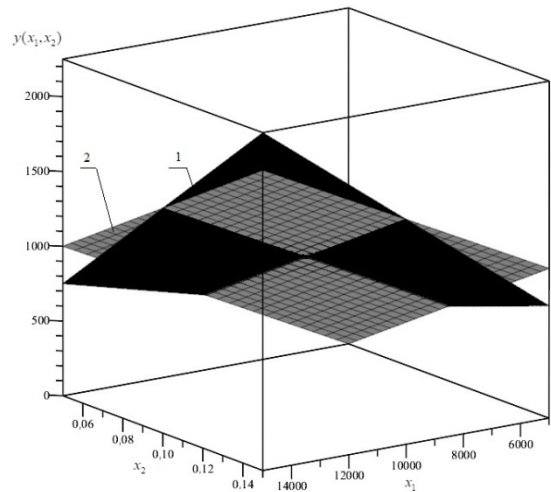


Рис. 3. Графики зависимостей  $y = g(x_1, x_2)$

Fig. 3. Graphs of dependencies  $y = g(x_1, x_2)$

Для определения величин групповых допусков предлагается использование способа назначения допусков одинаковой относительной точности. Величины допусков, определяемые по формуле (18), равны:

$$Tx_1^{(k_1)} = 25, \quad Tx_2^{(k_2)} = 0,00025. \quad (29)$$

Общее количество селективных групп для элемента каждого типа равно 7. Групповые допуски каждой селективной группы  $Tx_i^{(k_i)}$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) равны между собой вследствие линейности модели «вход-выход». Границы групп  $a_i^{(k_i)}$  легко определяются при известности отклонения нулевой группы:

$$E\text{sx}_i^0 = +\frac{T x_i^{(k_i)}}{2}; E\text{ix}_i^0 = -\frac{T x_i^{(k_i)}}{2}, (i = \overline{1,2}). \quad (30)$$

Зная  $a_i^{(k_i)}$ , можно определить показатели сборочного процесса:

– вероятность получения сборочного комплекта типа  $(k_1; k_2)$ :

$$I^{(k_1; k_2)} = \min_{i=1,2} \{I_i^{(k_i)}\}, I_i^{(k_i)} = \int_{T x_i^{(k_i)}} f_{li}(x_i) dx_i; \quad (31)$$

## Результаты моделирования

### Modelling results

Номер группы	–3	–2	–1	0	1	2	3
Границы групп, элемент 1	–87,5 –62,5	–62,5 –37,5	–37,5 –12,5	–12,5 12,5	12,5 37,5	37,5 62,5	62,5 87,5
Границы групп, элемент 2	–0,00088 –0,00063	–0,00063 –0,00038	–0,00038 –0,00013	–0,00013 0,00013	0,00013 0,00038	0,00038 0,00063	0,00063 0,00088
$I_1^{(k_1)}$	0,026064	0,099898	0,223536	0,29234	0,223536	0,099898	0,026064
$I_2^{(k_2)}$	0,034771	0,108382	0,214305	0,268966	0,214305	0,108382	0,034771
$I_{СК}$	0,950						

Сравнение приведенных выше результатов с результатами, полученными в работе [14], показывает относительно небольшую расходимость при расчетах границ селективных групп. Средняя ошибка аппроксимации, вычисленная по формуле (15), равна 0,026 у. е.; погрешность определения суммарной вероятности получения сборочных комплектов  $I_{СК}$  для данного примера составляет 0,3 %.

### Заключение

Таким образом, предложен метод линеаризации нелинейных зависимостей «вход-выход», суть которого заключается в выборе одного из вариантов аппроксимирующей гиперплоскости (многомерный ряд Тейлора или МНК) по заданному критерию. Метод применим в случае малых значений относительной точности входных и выходных параметров, что на практике соответствует селективному комплектованию прецизионных изделий, он значительно упрощает математическую модель сборочного процесса. Проведенные исследования с рядом нелинейных зависимостей показывают, что относительная погрешность определения  $I_{СК}$  не превышает 0,5 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

### Библиографические ссылки

1. *Набатников Ю. Ф., Нго В. Т., Нго В. Н.* Обеспечение заданного ресурса силовых гидроцилиндров механизированных крепей селективной сборкой их соединений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический

– суммарная вероятность получения сборочных комплектов:

$$I_{СК} = \sum I^{(k_1; k_2)}, \quad (32)$$

где  $f_{li}(x_i)$  – закон распределения случайной величины  $x_i$  ( $i = \overline{1,2}$ ).

Результаты моделирования приведены в таблице.

журнал). 2019. № 12 (45). С. 3–18. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-45-3-18.

2. *Левин И.А., Качурин Ю.Ю.* Автоматизация процесса комплектования оптических элементов при селективной сборке фотообъективов // Оптический журнал, 2021. Т. 88, № 4. С. 17–22. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-04-17-22.

3. *Никируй А.Э., Вайнер А. В., Дрогвоз П. А.* Методика автоматизации процесса селективного выбора деталей на основе виртуальной сборки при производстве прецизионных оптических систем // Технология машиностроения. 2022. № 5. С. 21–28.

4. *Медведев А. В., Халатов Е. М.* Алгоритмы оптимального распределения деталей по комплектам для селективной сборки изделий // Вестник машиностроения. 2022. № 11. С. 33–40. DOI 10.36652/0042-4633-2022-11-33-40.

5. *Никируй А.Э., Дрогвоз П. А.* Эффективность селективной сборки прецизионных оптических систем на основе виртуальной сборки изделий при организации производства на предприятиях машиностроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 2. С. 58–61. DOI: 10.36652/0202-3350-2022-23-2-58-61.

6. *Филипович О. В., Карлов А. Г., Волошина Н. А.* Модель процесса однопараметрической селективной сборки сложных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 398–404. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-398-404.

7. *Filipovich O.V., Balakin A.I., Balakina N.A., Filipovich V.O.* Simulation model of selective assembly of the conrod-piston group unit of internal combustion engines, taking into account measurement errors during sorting // Journal of Physics: Conference Series, 2021.

2096 (1):012188. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012188.

8. Kannan S.M., Pandian G.R. A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly // *Materials Today: Proceedings*, 2021. Vol. 46, Part 17. Pp. 7411-7417. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.1229.

9. Demir O.E., Colledani M., Paoletti R., Pippione G. Function-based selective and adaptive cyber-physical assembly system for increased quality in optoelectronics industry // *Computers in Industry*, 2023. Vol. 148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.

10. Clotley T., Benton. Wc. Sharing Quality Distribution Information for the Selective Assembly of Intermediary Components in the Automotive Industry // *Production and Operations Management*, 2019. DOI:10.1111/poms.13094.

11. Thys Th., Smet W. Selective assembly of planetary gear stages to improve load sharing // *Forschung im Ingenieurwesen*, 2023. 87. Pp. 1-9. DOI: 10.1007/s10010-023-00646-x.

12. Rajamani M.R. Application of Selective Assembly as an Aerospace Design for Manufacturing and Assembly Principle for Effective Variation Management in Aerospace Assemblies // *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2021. 3 (3). DOI: 10.4271/2021-01-0005.

13. Xing M., Zhang Q., Jin X., Zhang Zh. Optimization of Selective Assembly for Shafts and Holes Based on Relative Entropy and Dynamic Programming // *Entropy*, 2020. 22. 1211. DOI: 10.3390/e22111211.

14. Filipovich O., Filipovich V. Determination the selective assembly indicators of two elements with an output parameter in the form of a product of input // *Proceedings - 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2023. Pp. 1091-1095. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139199.

15. Филипович О. В., Филипович В. О. Решение задачи селективной сборки двух элементов с мультипликативной моделью «вход-выход» с использованием аппроксимации // *Автоматизация и измерения в машино- и приборостроении*, 2023. № 1 (21). С. 61-69.

## References

1. Nabatnikov Yu.F., Ngo V.T., Ngo V.N. [Ensuring a given resource of power hydraulic cylinders of mechanised fasteners by selective assembly of their joints] *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2019. No. 12. Pp. 3-18 (in Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-45-3-18.

2. Levin I.A., Kachurin Yu.Yu. [Automation of the process of optical elements acquisition at selective assembly of photographic lenses]. *Opticheskii zhurnal*, 2021. Vol. 88, no. 4. Pp. 17-22 (in Russ.). DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-04-17-22.

3. Nikirui A.E., Vainer A.V., Drogovoz P.A. [Methodology of automation of the process of selective parts selection on the basis of virtual assembly in the production of precision optical systems]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2022. No. 5. Pp. 21-28 (in Russ.).

4. Medvedev A.V., Khalatov E.M. [Algorithms of the optimal distribution of the parts on the sets for the selective assembly of the products]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022. No. 11. Pp. 33-40 (in Russ.). DOI 10.36652/0042-4633-2022-11-33-40.

5. Nikirui A.E., Drogovoz P.A. [Efficiency of selective assembly of precision optical systems on the basis of virtual product assembly in the organisation of production at the enterprises of mechanical engineering]. *Sbornik v mashinostroyeni, priborostroyeni*. 2022. No. 2. Pp. 58-61 (in Russ.). DOI: 10.36652/0202-3350-2022-23-2-58-61.

6. Filipovich O.V., Karlov A.G., Voloshina N.A. [Process model for single-parameter selective assembly of complex products]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauk*. 2021. No. 5. Pp. 398-403 (in Russ.). DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-398-404.

7. Filipovich O.V., Balakin A.I., Balakina N.A., Filipovich V.O. [Simulation model of selective assembly of the conrod-piston group unit of internal combustion engines, taking into account measurement errors during sorting]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2096(1):012188. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012188.

8. Kannan S.M., Pandian G.R. [A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly] *Materials Today: Proceedings*, 2021. Volume 46, Part 17. pp. 7411-7417. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.1229.

9. Demir O.E., Colledani M., Paoletti R., Pippione G. [Function-based selective and adaptive cyber-physical assembly system for increased quality in optoelectronics industry]. *Computers in Industry*, 2023. Vol. 148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.

10. Clotley T., Benton. Wc. [Sharing Quality Distribution Information for the Selective Assembly of Intermediary Components in the Automotive Industry]. *Production and Operations Management*, 2019. DOI:10.1111/poms.13094.

11. Thys Th., Smet W. [Selective assembly of planetary gear stages to improve load sharing]. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2023. 87. Pp. 1-9. DOI: 10.1007/s10010-023-00646-x.

12. Rajamani M.R. [Application of Selective Assembly as an Aerospace Design for Manufacturing and Assembly Principle for Effective Variation Management in Aerospace Assemblies]. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2021. 3(3). DOI: 10.4271/2021-01-0005.

13. Xing M., Zhang Q., Jin X., Zhang Zh. [Optimization of Selective Assembly for Shafts and Holes Based on Relative Entropy and Dynamic Programming]. *Entropy*. 2020. 22. 1211. DOI: 10.3390/e22111211.

14. Filipovich O., Filipovich V. [Determination the selective assembly indicators of two elements with an output parameter in the form of a product of input] *Proceedings - 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2023. Pp. 1091-1095. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139199.

15. Filipovich O.V., Filipovich V.O. [Solving the problem of selective assembly of two elements with multiplicative input-output model using approximation].

*Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii.* 2023. No. 1. Pp. 61-69 (in Russ.).

\* \* \*

### Two-element Selective Assembly with Non-linear Input-output Models Using Approximation

*O.V. Filipovich*, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*The process of single-parameter selective assembly of two elements is considered for the case of a nonlinear input-output model application. Due to the objective complexity of determining the relations between the limit deviations and tolerances of input and output parameters, as well as the relative accuracy smallness due to the precision of the assembly, it is reasonable to represent the initial model in the form of a first-order polynomial of two variables. Linearisation is proposed to be carried out using a method of obtaining an approximating relation in the form of a Taylor series and by means of a multivariate least square method, with subsequent variant comparison according to a given criterion. The criterion for choosing one of the two proposed variants is the minimum average approximation error. To determine the values of group tolerances, it is proposed to use two methods: assigning the equal tolerances and assigning tolerances of the equal relative accuracy. For both methods the derivation of the set-making equations is given, allowing the use of selective group numbers under certain assumptions. Using a linearized model, the main indicators of the assembly process are determined: the number of assembly sets, work in progress and preliminary scrap. An example is given for the case when the output parameter represents the product of the input element parameters. The coefficients were calculated and the set-making equation was derived. Comparison of the results presented in the paper with earlier obtained results (initial nonlinear model) shows a relatively small divergence in calculating the boundaries of selective groups, the error in determining the probability of obtaining assembly sets as a whole does not exceed 0.5%. The proposed method is applicable in case of small values of relative accuracy of input and output parameters, which in practice corresponds to selective assembly of precision products.*

**Keywords:** selective assembly, mathematical model, nonlinear relation, approximation, Taylor series, least square method.

Получено: 04.03.24

#### Образец цитирования

*Филипович О. В.* Двухэлементная селективная сборка с нелинейными моделями «вход-выход» с использованием аппроксимации // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 24, № 2. С. 80–86. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-80-86.

#### For Citation

*Filipovich O.V.* [Two-element Selective Assembly with Non-linear Input-output Models Using Approximation]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve.* 2024, vol. 22, no. 2, pp. 80-86. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-80-86.