

УДК 621.71

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-64-69

Моделирование двухпараметрической селективной сборки двух деталей

О. В. Филипович, кандидат технических наук, доцент,

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Н. А. Балакина, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

А. И. Балакин, кандидат технических наук, доцент,

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В статье рассмотрена проблема обеспечения точности сопряжения деталей в прецизионных изделиях путем применения многопараметрической селективной сборки. Приведен случай образования сборочных комплектов, состоящих из двух деталей, одновременно сопрягаемых друг с другом по двум параметрам, которыми могут являться различные физические величины (геометрические, механические, электрические и т. д.). Для оценки показателей сборочных процессов, включая селективную сборку, традиционно используются аналитический и имитационный методы моделирования. Целью данной работы является сравнение на конкретном примере результатов аналитического и имитационного моделирования двухпараметрической селективной сборки двух деталей при определении общего количества сборочных комплектов без учета и с учетом ошибок сортировки. Приводятся основные аналитические зависимости, позволяющие определить вероятность образования сборочных комплектов, а также обобщенная структура имитационной модели, реализованной в среде GPSS World. В качестве примера рассмотрен процесс селективной сборки прецизионного узла, состоящего из двух деталей, при одновременном обеспечении точности соединения по двум параметрам – линейным размерам. Параметры и погрешности измерения являются независимыми случайными, имеющими известные законы распределения. Принята схема расположения интервалов допусков, известны расширенные и групповые допуски, количество селективных групп, пределы случайных составляющих погрешностей измерения. При заданных правилах комплектования отклонение результатов моделирования для обоих вариантов не превышает 0,3 %, что свидетельствует о высокой степени их соответствия. Использование аналитической модели для определения количества сборочных комплектов позволяет значительно сократить время моделирования при сохранении высокой точности результатов. В дальнейшем предполагается провести серию многофакторных экспериментов для определения соответствия этих моделей при изменении большего числа влияющих факторов.

Ключевые слова: двухпараметрическая селективная сборка, моделирование, показатели процесса.

Введение

Селективная сборка применяется для обеспечения высокой точности выходных параметров прецизионных изделий в подшипниковой промышленности, двигателестроении, приборостроении, автомобилестроении, часовой промышленности и т. д. [1–4]. Существует ряд достаточно сложных задач, в которых сборочные комплекты образованы двумя и более элементами (детальями), одновременно сопрягаемыми друг с другом по двум входным параметрам, которыми могут являться различные физические величины (геометрические, механические,

электрические и т. д.). Первые работы в области моделирования многозвенной размерной цепи с сопряжением по нескольким параметрам проводились И. А. Когановым [5]. Позже указанные задачи были формализованы в [6], где авторами была предложена общая методология их решения.

Для определения показателей сборочных процессов, как правило, применяются два метода моделирования: аналитический и имитационный [7–9]. В первом случае модель строится с использованием математических зависимостей, во втором – проводятся экспериментальные исследования с

прямым описанием процесса. Оба метода позволяют учитывать наличие в системе как дискретных, так и непрерывных компонентов, нелинейность характеристик, недетерминированность и динамичность происходящих процессов.

Целью данной работы является сравнение на конкретном примере результатов аналитического и имитационного моделирования двухпараметрической селективной сборки двух деталей при определении общего количества сборочных комплектов ($I_{СК}$) без учета и с учетом ошибок сортировки.

Материалы и методы

Рассмотрим селективную сборку прецизионного изделия, состоящего из двух деталей, каждая из которых имеет два независимых параметра x_{is} , которые являются случайными величинами с известными плотностями распределения $f_{1is}(x_{is})$ ($i = \overline{1, 2}, s = \overline{1, 2}$).

Правило комплектования будем считать элементарным или одновариантным. Оба выходных параметра зависят от входных линейно, коэффициенты известны и постоянны. Для анализа показателя $I_{СК}$ используются аналитические и имитационные модели сборочных процессов, построенные в [10–12].

Суммарная вероятность получения сборочных комплектов по всем двумерным селективным группам $K_i = (k_{i1}, k_{i2})^T$, соответствующим интервалу $X_i^{(k_{is})}$ с известными границами $a_i^{(k_{is})}$ и $a_i^{(k_{is}+1)}$, составляет

$$I_{СК} = \sum_K I_{СК}^{(K_1, K_2)},$$

где $I_{СК}^{(K_1, K_2)}$ – вероятности получения сборочных комплектов типа (k_{i1}, k_{i2}) , которые при одновариантном правиле комплектования определяются по формуле

$$I_{СК}^{(K_1, K_2)} = \min \{ I_1^{(k_{11}, k_{12})}, I_2^{(k_{21}, k_{22})} \}.$$

При отсутствии влияния погрешностей измерения вероятности попадания размеров деталей в двумерную селективную группу составляют

$$I_i^{(k_{i1}, k_{i2})} = \int_{a_i^{(k_{i1})}}^{a_i^{(k_{i1}+1)}} f_{1i}(x_{i1}) dx_{i1} \int_{a_i^{(k_{i2})}}^{a_i^{(k_{i2}+1)}} f_{2i}(x_{i2}) dx_{i2},$$

$$k_{i1} = \overline{2 \dots l_{i1} - 1}; k_{i2} = \overline{2 \dots l_{i2} - 1}; i = \overline{1, 2},$$

где l_{is} – общее число селективных групп по параметру s каждого из элементов i -го типа.

С учетом влияния погрешностей измерения на сортировочный процесс

$$I_i^{(k_{i1}, k_{i2})} = \sum_{k_{j1}=1}^{l_{i1}} \sum_{k_{j2}=1}^{l_{i2}} P_i^{(k_{j1}, k_{j2}, k_{i1}, k_{i2})},$$

$$k_{i1} = \overline{2 \dots l_{i1} - 1}; k_{i2} = \overline{2 \dots l_{i2} - 1}; i = \overline{1, 2},$$

где

$$P_i^{(k_{j1}, k_{j2}, k_{i1}, k_{i2})} = \left[\int_{a_i^{(k_{j1})}}^{a_i^{(k_{j1}+1)}} f_{1i}(x_{i1}) dx_{i1} \int_{a_i^{(k_{j2})}}^{a_i^{(k_{j2}+1)}} f_{2i}(\delta_{i1}) d\delta_{i1} dx_{i1} \right] \times$$

$$\times \left[\int_{a_i^{(k_{i1})}}^{a_i^{(k_{i1}+1)}} f_{1i}(x_{i1}) dx_{i1} \int_{a_i^{(k_{i2})}}^{a_i^{(k_{i2}+1)}} f_{2i}(\delta_{i2}) d\delta_{i2} dx_{i2} \right],$$

$f_{2is}(\delta_{is})$ – плотности распределения величин δ_{is} , являющихся случайными составляющими погрешностей измерения параметров s элементов i ($i = \overline{1, 2}; s = \overline{1, 2}$).

Аналитическая модель имплементирована в системе компьютерной математики Maple, которая представляет собой интегрированную среду для аналитических вычислений, численного анализа, визуализации данных и программирования [13].

Для построения имитационных моделей применяется программная среда GPSS World, предназначенная для моделирования дискретных систем, формализованных в виде систем массового обслуживания [14, 15]. Имитационные модели для оценки количества сборочных комплектов для базового варианта (без учета погрешностей измерения) и варианта, учитывающего погрешности средств измерений, состоят из трех сегментов (исходные данные; измерения и сортировка; комплектование и сборка) и подпрограмм.

Результаты выводятся в виде отчета, который в том числе содержит общее количество собранных комплектов.

Пример моделирования

В узел собираются две детали, при этом требуется обеспечить точность соединения одновременно по двум параметрам, являющимся линейными размерами с номиналами x_{isn} ($i = \overline{1,2}, s = \overline{1,2}$). Схема расположения интервалов допусков показана на рис. 1.

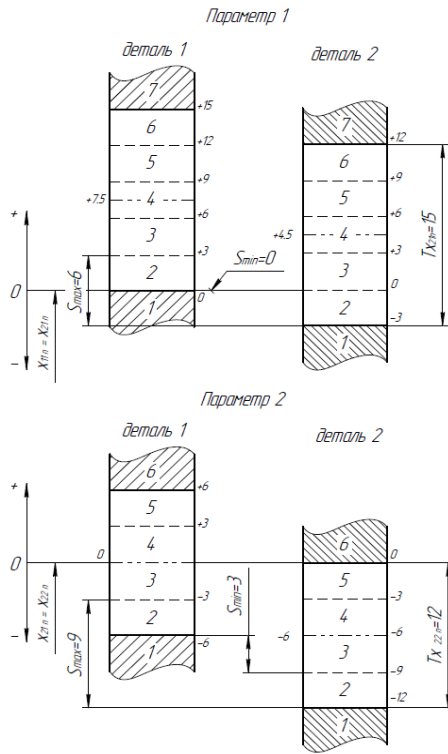


Рис. 1. Схема расположения интервалов допусков двухпараметрического прецизионного соединения

Fig. 1. Layout of tolerance intervals for a two-parameter precision connection

Величины расширенных допусков на изготовление известны и равны:

- по параметру 1 – $Tx_{11} = Tx_{21} = 15$ мкм с координатами середин интервалов допусков +7,5 и +4,5 мкм;
- по параметру 2 – $Tx_{12} = Tx_{22} = 12$ мкм с координатами середин интервалов допусков 0 и –6 мкм.

Принятое количество селективных групп по первому параметру – 7 (годных – 5), по второму – 6 (годных – 4), разделение на селективные группы происходит равномерно. Выходными параметрами в соединениях являются зазоры, имеющие пределы S_{min} и S_{max} (см. рис. 1). Примем, что входные па-

раметры распределены по нормальным законам, имеющим математические ожидания $m_{x_{11}} = 7,5$ мкм, $m_{x_{12}} = 0$ мкм, $m_{x_{21}} = 4,5$ мкм, $m_{x_{22}} = -6$ мкм и среднеквадратические отклонения $\sigma_{x_{11}} = 2,586$ мкм, $\sigma_{x_{12}} = 2,07$ мкм, $\sigma_{x_{21}} = 2,50$ мкм, $\sigma_{x_{22}} = 2,00$ мкм.

При проведении имитационного моделирования количество деталей обоих типов в партии составляло 75000 единиц, эксперимент повторялся 10 раз, затем данные усреднялись. Результаты определения $I_{СК}$ для модели, не учитывающей погрешности измерения, приведены в табл. 1

Таблица 1. Количество образованных сборочных комплектов без учета погрешности измерения

Table 1. Number of assembled sets formed without accounting for measurement error

| Аналитическая модель, $I_{СК}$ | Имитационная модель | | | $\Delta I_{СК}, \%$ |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|----------|---------------------|
| | № эксперимента | Количество комплектов | $I_{СК}$ | |
| 0,9736 | 1 | 72643 | 0,9685 | 0,299 |
| | 2 | 72730 | 0,9697 | |
| | 3 | 72729 | 0,9697 | |
| | 4 | 72682 | 0,9691 | |
| | 5 | 72906 | 0,9721 | |
| | 6 | 73025 | 0,9737 | |
| | 7 | 72766 | 0,9702 | |
| | 8 | 72970 | 0,9729 | |
| | 9 | 72687 | 0,9692 | |
| | 10 | 72859 | 0,9714 | |
| Среднее значение | 72799 | 0,9707 | | |

На втором этапе было проведено моделирование с учетом погрешностей измерения, предельные значения которых принимались равными 25 % от величин групповых допусков. Предполагалось, что распределения значений случайных составляющих погрешностей δ_{is} ($i = \overline{1,2}, s = \overline{1,2}$) – гауссовские, имеющие нулевые математические ожидания и среднеквадратические отклонения $\sigma_{\delta_{11}} = \sigma_{\delta_{21}} = \sigma_{\delta_{12}} = \sigma_{\delta_{22}} = 0,375$ мкм. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Количество образованных сборочных комплектов с учетом погрешности измерения

Table 2. Number of assembled sets considering measurement error

| Аналитическая модель, $I_{СК}$ | Имитационная модель | | | $\Delta I_{СК}, \%$ |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|----------|---------------------|
| | № эксперимента | Количество комплектов | $I_{СК}$ | |
| 0,9731 | 1 | 72614 | 0,9682 | 0,289 |
| | 2 | 72761 | 0,9701 | |
| | 3 | 72724 | 0,9697 | |
| | 4 | 72862 | 0,9715 | |
| | 5 | 72864 | 0,9715 | |
| | 6 | 72896 | 0,9719 | |
| | 7 | 72875 | 0,9717 | |
| | 8 | 72746 | 0,9699 | |
| | 9 | 72731 | 0,9697 | |
| | 10 | 72682 | 0,9691 | |
| | Среднее значение | 72775,5 | 0,9703 | |

Анализ результатов и выводы

При принятом правиле комплектования отклонение результатов для обоих вариантов по среднему значению $I_{СК}$ не превышает 0,3 %, что свидетельствует о высокой степени их соответствия. Использование аналитической модели для определения количества сборочных комплектов позволяет значительно сократить время моделирования при сохранении высокой точности результатов. В рассматриваемом примере математические ожидания параметров деталей принимались равными координатам середин интервалов допусков (несмещенные распределения), а дисперсии соответствующих параметров деталей отличались. В дальнейшем предполагается провести серию многофакторных экспериментов для определения соответствия этих моделей при изменении большего числа влияющих факторов.

Библиографические ссылки

1. 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.

2. 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. V.148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.

3. Clottey 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.

4. Набатников Ю. Ф., Нго В. Т., Нго В. Н. Обеспечение заданного ресурса силовых гидродопрессов механизированных крепей селективной сборкой их соединений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № S45. С. 3–18. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-45-3-18.

5. Коганов И. А. Оптимизация подбора деталей, сопрягаемых при сборке по большому количеству поверхностей // *Прогрессивная технология машиностроения*. 1968. Вып. 3. С. 17–19.

6. Катковник В. Я., Савченко А. И. Основы теории селективной сборки. Л. : Политехника, 1991. 303 с.

7. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Юрайт, 2021. 343 с.

8. Alquraish M. Modeling and Simulation of Manufacturing Processes and Systems: Overview of Tools, Challenges, and Future Opportunities // *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2022. DOI 12. 9779-9786. 10.48084/etasr.5376.

9. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // *International Journal of Production Research*, 2019. 58. PP. 1-23. DOI 10.1080/00207543.2019.1636321.

10. Филипович О. В. Модель двухпараметрической селективной сборки двух элементов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2018. № 4-2(330). С. 173–178.

11. Филипович О. В., Невар Г. В. Определение вероятностей образования сборочных комплектов при двухпараметрической двухэлементной селективной сборке с учетом влияния погрешностей измерения // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2024. № 7. С. 303–308. DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-7-303-308.

12. Филипович О. В. Имитационная модель двухпараметрической селективной сборки с учетом погрешностей измерения параметров // *Автоматизация и измерения в машиноприборостроении*. 2019. № 4 (8). С. 89–94.

13. Fox W.P., Bauldry W.C. *Advanced Problem Solving with Maple: A First Course*. CRC Press, 2019. 358 p.

14. Боев В. Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World. М. : ИНТУИТ; АйПиАрМедиа, 2021. 542 с.

15. Devyatkov V., Gabalin V. Simulation Research of Business Processes with Queues Using GPSS Studio Modeling Environment // *Open Education*, 2020. 24. PP. 67-77. DOI 10.21686/1818-4243-2020-3-67-77.

References

1. 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.

2. 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. V.148. 103915. DOI:10.1016/j.compind.2023.103915.

3. Clotey 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.

4. 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'*. 2019. № S45. Pp. 3-18 (in Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-45-3-18.

5. Koganov I.A. [Optimization of the selection of parts that are mated during assembly across a large number of surfaces]. *Progressivnaya tekhnologiya mashinostroeniya*. 1968. Vol. 3. Pp. 17-19 (in Russ.).

6. Katkovnik V.Ya., Savchenko A.I. *Osnovy` teorii selektivnoj sborki* [Fundamentals of selective assembly theory]. Leningrad: Politehnika, 1991. 303 p. (in Russ.).

7. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie system* [System modeling] Moskva : Izd-vo Yurajt, 2021. 343 p. (in Russ.).

8. Alquraish M. Modeling and Simulation of Manufacturing Processes and Systems: Overview of Tools, Challenges, and Future Opportunities // *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2022. DOI 12. 9779-9786. 10.48084/etasr.5376.

9. Mourtzis D. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends // *International Journal of Production Research*, 2019. 58. PP. 1-23. DOI 10.1080/00207543.2019.1636321.

10. Filipovich O.V. [Model of two-parameter selective assembly of two elements] *Fundamental'ny'e i prikladny'e problemy` tekhniki i tekhnologii*. 2018. No. 4-2. Pp. 173-178 (in Russ.).

11. Filipovich O.V., Nevar G.V. [Determination of probabilities of assembly sets formation in two-parameter two-element selective assembly, taking into account the influence of measurement errors]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*. 2024. No. 7. Pp. 303-308 (in Russ.). DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-7-303-308.

12. Filipovich O.V. [Simulation model of a two-parameter selective assembly taking into account parameter measurement errors]. *Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii*. 2019. No. 4. Pp. 89-94 (in Russ.).

13. Fox W.P., Bauldry W.C. *Advanced Problem Solving with Maple: A First Course*. CRC Press, 2019. 358 p.

14. Boev V.D. *Konceptual`noe proektirovanie sistem v AnyLogic i GPSS World* [Conceptual design of systems in AnyLogic and GPSS World]. Moscow: INTUIT; Aj Pi Ar Media, 2021. 542 p. (in Russ.).

15. Devyatkov V., Gabalin V. Simulation Research of Business Processes with Queues Using GPSS Studio Modeling Environment // *Open Education*, 2020. 24. Pp. 67-77. DOI 10.21686/1818-4243-2020-3-67-77.

* * *

Simulation Of Two-Parametric Selective Assembly Of Two Parts

O. V. Filipovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Instrument Engineering and Transport Department, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

N. A. Balakina, Senior Lecturer of Instrument Engineering and Transport Department, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

A. I. Balakin, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Instrument Engineering and Transport Department, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The article addresses the issue of ensuring the accuracy of the mating of parts in precision products through the application of multi-parameter selective assembly. A case is presented involving the formation of assembly sets consisting of two parts that are simultaneously mated to each other based on two parameters, which may include various physical quantities (geometric, mechanical, electrical, etc.). To evaluate the indicators of assembly processes, including selective assembly, analytical and simulation modeling methods are traditionally used. The aim of this work is to compare, using a specific example, the results of analytical and simulation modeling of two-parameter selective assembly of two parts in determining the total number of assembly sets, both with and without considering sorting errors. The main analytical dependencies are provided to determine the probability of forming assembly sets, as well as a generalized structure of the simulation model implemented in GPSS World. As an example, the process of selective assembly of a precision unit consisting of two parts is examined, while simultaneously ensuring the accuracy of the connection based on two parameters (linear dimensions). The parameters and measurement errors are independent random variables with known distribution laws. A scheme for the arrangement of tolerance intervals is accepted, and both extended and group tolerances are known, as well as the number of selective groups and the limits of the random components of measurement errors. Under the established grouping rules, the deviation in simulation results for both options does not exceed 0.3%, indicating a high degree of conformity between them. Utilizing the analytical model to determine the number of assembly sets significantly reduces simulation time while maintaining high accuracy of results. Further research is planned to conduct a series of multifactorial experiments to assess the correspondence of these models when a greater number of influencing factors are changed.

Keywords. Two-parameter selective assembly, modeling, process indicators.

Получено: 24.12.25

Образец цитирования

Филипович О. В., Балакина Н. А., Балакин А. И. Моделирование двухпараметрической селективной сборки двух деталей // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 1. С. 64–69. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-64-69.

For Citation

Filipovich O.V., Balakina N.A., Balakin A.I. [Simulation Of Two-Parametric Selective Assembly Of Two Parts]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 64-69 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2026-1-64-69.