

УДК 621.71

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-92-96

Имитационная модель однопараметрической селективной сборки двух элементов с многовариантным комплектованием

О. В. Филипович, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Для моделирования сборочных процессов и технологических систем с целью определения и оптимизации показателей и параметров их функционирования используются аналитические и имитационные методы. Первый косвенно описывает объект или процесс с использованием математических зависимостей. Имитационное моделирование является одним из современных методов экспериментального исследования производственных систем, позволяя учитывать наличие в системе различных компонентов, нелинейности характеристик, недетерминированность и динамичность происходящих процессов. Данная работа посвящена разработке имитационной модели технологического процесса многовариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов. Многовариантность комплектования определяется обобщенными правилами с множеством весов, элементы которого задают распределение элементов между комплектами различных типов. Собираемые селективно элементы имеют параметры, определяемые этапом изготовления, являющиеся независимыми случайными величинами с известными вероятностными характеристиками. Предполагается, что зависимость «вход-выход» линейна с заданными коэффициентами, уравнения комплектования, связывающие номера селективных групп и сборочных комплектов, являются известными. В среде GPSS World построена имитационная модель сборочного процесса, которая, в отличие от известной, оперирует многовариантными правилами комплектования для случая сборки двух элементов. Модель позволяет определить количественные показатели сборочного процесса, в частности, вероятности образования сборочных комплектов, незавершенного производства и предварительного брака. Для примера рассмотрен процесс многовариантного комплектования двух деталей, образующих прецизионное изделие машиностроения. Приведены данные распределений деталей обоих типов по селективным группам до сборки, рассчитаны показатели технологического процесса. По результатам моделирования обозначены преимущества и недостатки многовариантного способа комплектования.

Ключевые слова: селективная сборка, имитационная модель, многовариантное комплектование.

Постановка задачи

Для определения и оптимизации показателей сборочных процессов, а также параметров функционирования сборочных производств при помощи математического моделирования обычно используются два метода: аналитический и имитационный [1–3].

Первый косвенно описывает объект или процесс с использованием математических зависимостей [4]. Имитационное моделирование (ИМ) основано на прямом описании объекта или процесса с проведением экспериментальных исследований [5]. При построении имитационных моделей сборочных систем и процессов как дискретных систем используют два вида программных средств:

- универсальные, использующие язык программирования высокого уровня с расширениями в виде разнообразных библиотек;
- специализированные, имеющие собственный язык моделирования и транслятор.

Вторая группа получила наибольшее распространение, к таким системам относятся AnyLogic [6, 7], Simulink [8], Simio [9], FlexSim [10], GPSS [11] и др. Имитационное моделирование является одним из современных методов экспериментального исследования существующих или проектируемых производств. Модели позволяют учитывать наличие в системе как дискретных, так и непрерывных компонентов, нелинейность характеристик, недетерминированность и динамичность происходящих процессов. Основным недостатком моделей данного типа является необходимость проведения большого количества экспериментов и последующей обработки статистических данных.

Иногда на практике при решении задач анализа и синтеза автоматизированных систем возникают ситуации, когда подобные модели разработать достаточно сложно или невозможно. В этом случае возможно объединение аналитического и имитационного моделирования в комплексную процедуру.

Процедура построения имитационных моделей одновариантной двух- и многоэлементной селективной сборки подробно изложена в [12]. В работах [13, 14] данные модели были модифицированы для учета различных случайных факторов, сопровождающих сборочные процессы.

Целью работы является построение модели, имитирующей технологический процесс селективной сборки двух элементов по одному параметру при использовании многовариантного способа их комплектования.

Материалы и методы

Селективно собираемые элементы имеют параметры x_i ($i = \overline{1, 2}$), являющиеся независимыми случайными величинами с плотностями распределения $f_i(x_i)$ и расширенными производственными допусками Tx_i , по которым они сортируются на l_i групп (рис. 1).

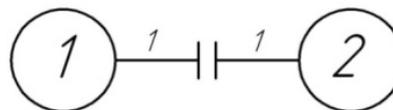


Рис. 1. Схема сборки
Fig. 1. Assembly scheme

Предположим, что зависимость, связывающая входные и выходной y параметры изделия, – линейна, т. е.

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

где ξ_1, ξ_2 – известные коэффициенты. Под термином «правила комплектования» понимается множество способов формирования сборочных комплектов (СК), в которые входят элементы обоих типов из групп с номерами k_i [15]:

$$k = k(k_1, k_2), \quad k_i = \overline{2, l_i - 1}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (2)$$

где k – тип комплекта. Данное множество является конечным, в комплектовании обязательно участвуют элементы всех селективных групп, принадлежащих расширенным интервалам допусков. Сами правила делятся на две категории: одновариантные и многовариантные. Одновариантное комплектование осуществляется из одноименных селективных групп, такое правило является классическим, а СК может содержать элементы только из одной группы. Многовариантное комплектование двух элементов целесообразно применять при значительном несовпадении кривых $f_{i_i}(x_i)$. В этом случае в каждый тип СК k ($k = \overline{1, L}$) могут войти элементы различных селективных групп. Это в некоторых случаях позволяет повысить вероятность формирования сборочных комплектов, однако существует ряд ограничений, препятствующих реализации комплектования по данному правилу.

В общем случае используются весовые правила комплектования

$$\Lambda = \{\lambda_{ik_i}^{(k)}, k_i = \overline{1, l_i}, i = \overline{1, 2}, k = \overline{1, L}\}, \quad (3)$$

где $\lambda_{ik_i}^{(k)}$ является весом, определяющим количество элементов i -го типа k_i -й селективной группы, включаемое в СК типа k . В целом, весами задается количественное распределение элементов каждой группы по различным сборочным комплектам.

Одним из наиболее эффективных и наиболее распространенных вариантов программного обеспечения, предназначенного для имитационного моделирования формализованных в виде СМО дискретных производственных систем, является GPSS. Для разработки моделей сборочных процессов будет использована разновидность языка GPSS – среда GPSS World. В данной работе модифицируется базовая ИМ – модель процесса однопараметрической селективной сборки, процесс построения которой описан в [12]. Она состоит из нескольких модулей (сегментов), а также подпрограмм, выполненных на языке программирования PLUS.

Сегмент 1: исходные данные для моделирования.

Сегмент 2: имитация этапов измерения и сортировки.

Сегмент 3: имитация этапов комплектования и сборки.

В модифицируемом варианте модели предлагается использовать многовариантное комплектование по следующему алгоритму:

1) один (произвольный) из элементов выбирается за основной;

2) для каждой селективной группы годных основного элемента проверяется возможность осуществить комплектование с контрэлементами с образованием сборочных комплектов, удовлетворяющих заданному уравнению (2);

3) пункт 2 циклически повторяется, пока в накопителях не останется ни одного элемента, способного образовать сборочный комплект.

Следует отметить, что при построении имитационной модели нет необходимости рассчитывать заранее весовые коэффициенты $\lambda_{ik_i}^{(k)}$. Этап комплектования осуществляется при наличии на комплектующем устройстве элементов обоих типов, выбранных из групп, номера которых соответствуют выражению (2), представленному в форме равенств или неравенств.

При выполнении моделирования отчет будет содержать следующие данные:

- статистические характеристики случайных величин, включая плотности распределения (интегральные относительные частоты), средние значения, стандартные отклонения, получаемые при помощи специальных таблиц;

- количество элементов, не прошедших входной контроль (предварительный брак);

- количество элементов в каждом накопительном устройстве перед началом сборочного процесса (максимальное) и после его окончания (остаточное, называемое незавершенным производством);

- количество собранных изделий.

Результаты

Приведем пример моделирования. Предположим, что селективно собираются изделия машиностроения из двух деталей, условно называемых «вал» и «отверстие», по посадке с гарантированным натягом, находящимся в пределах

$$1 \text{ мкм} \leq N \leq 5 \text{ мкм} \quad (4)$$

при следующих исходных данных.

1. Модель «вход-выход»:

$$y = N = x_1 - x_2, \quad (5)$$

при этом в зависимости (1) $\xi_1 = 1$, $\xi_2 = -1$.

2. Величины расширенных допусков на размеры деталей $Tx_1 = Tx_2 = 10$ мкм (индекс 1 – вал, индекс 2 – отверстие). Общее количество групп сортировки $l_1 = l_2 = 12$.

3. Границы крайних селективных групп: $a_1^{(2)} = 3$ мкм, $a_1^{(11)} = 13$ мкм, $a_2^{(2)} = 0$ мкм, $a_2^{(11)} = 10$ мкм.

4. Детали имеют одинаковую программу выпуска $Q = 1000$ шт. Размеры деталей в соответствующих партиях имеют нормальные распределения с параметрами: $m_1 = 8,0$ мкм; $m_2 = 5,0$ мкм; $\sigma_1 = 1,613$ мкм; $\sigma_2 = 1,667$ мкм.

Схема расположения интервалов допусков показана на рис. 2 (групповые отклонения заданы в мкм).

Из рис. 2 видно, что для рассматриваемого примера при заданных неравенствами (4) предельных натягах обеспечивается межгрупповая взаимозаменяемость, а уравнение комплектования имеет вид

$$|k_1 - k_2| = 1. \tag{6}$$

Результаты моделирования в виде распределения деталей разных типов по селективным группам приведены в табл. 1 и 2.

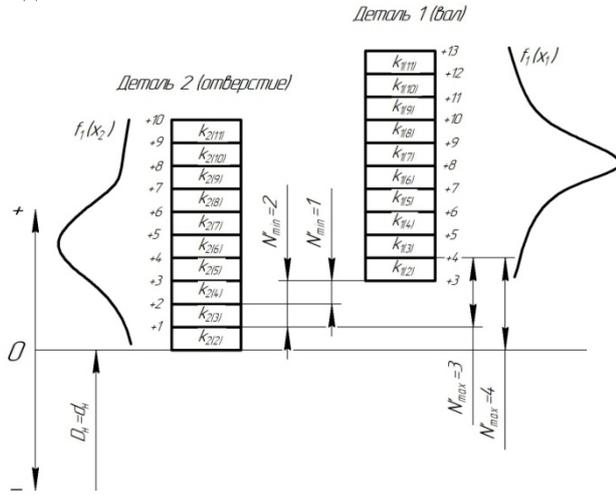


Рис. 2. Схема расположения интервалов допусков

Fig. 2. Tolerance intervals scheme

Таблица 1. Распределение деталей типа «вал» по группам

Table 1. Grouping of «shaft» type parts

Количество деталей	Номера селективных групп k_1					
	1	2	3	4	5	6
	0	8	23	71	147	214
7	8	9	10	11	12	
252	153	98	25	8	1	

Таблица 2. Распределение деталей типа «отверстие» по группам

Table 2. Grouping the «hole» type parts

Количество деталей	Номера селективных групп k_2					
	1	2	3	4	5	6
	2	8	31	86	163	236
7	8	9	10	11	12	
211	155	73	26	7	2	

Обсуждение

Для рассматриваемого примера принималось равенство математических ожиданий соответствующим координатам середин интервалов допусков (отсутствие смещения распределений), при этом дисперсии случайных величин при одинаковых расширенных допусках имели различия. При одновариантном правиле вероятность образования сборочных комплектов составляет 0,933 (число типов СК равно $L = 10$), при многовариантном – 0,958 (число типов СК равно $L = 28$). Многовариантное комплектование позволяет повысить значение данного показателя сборочного процесса на

2,5 %, что убедительно показывает его преимущества, особенно в условиях крупносерийного производства. С другой стороны, реализация данного правила усложняет технологический процесс (число типов СК возросло почти в три раза) и требует наличия дополнительных площадей и оборудования. Решение о применении той либо иной стратегии комплектования должно применяться в зависимости от конкретной задачи и ограничений.

Заключение

Таким образом, уравнения комплектования уравнивают зависимость типов сборочных комплектов от номеров селективных групп элементов в СК. В общем случае комплектование является многовариантным, а коэффициенты, составляющие множество весов (3), задают распределение элементов между комплектами различных типов. Построенная имитационная модель позволяет определять показатели технологического процесса в условиях многовариантного комплектования при известных вероятностных характеристиках, полученных на предыдущем этапе, а также зависимостей вида (2), называемых «уравнения комплектования». Обобщение алгоритма и построение ИМ для случая сборки трех и более элементов или многопараметрической сборки двух элементов может являться перспективой дальнейших исследований.

Библиографические ссылки

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М. : Юрайт, 2021. 343с.
2. 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.
3. 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.
4. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. М. : Ленанд, 2019. 304 с.
5. Law A. M. Simulation modeling and analysis. Sixth Edition. McGraw-Hill, 2024. 688 p.
6. Боев В. Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World. М. : ИНТУИТ; Ай Пи Ар Медиа, 2021. 542 с.
7. Хроль Е., Уварова А., Кужильный А. Разработка имитационных моделей с помощью AnyLogic // Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 2023. № 3. Pp. 0119-0130. DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0119-0130.
8. Xue D., Pan F. MATLAB and Simulink in Action. Springer Singapore, 2024. 468p. DOI 10.1007/978-981-99-1176-9.
9. Smith J. S., Sturrock D. T. Simio and Simulation – Modeling, Analysis, Applications. 6th Edition. Createspace Independent Publishing Platform, 2023. 436p.
10. Lapteva E., Lekareva Yu., Umansky S. Imitation Modeling of Production Processes in FlexSim Environment // Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics, 2023. 20. Pp. 16-23. DOI 10.21686/2413-2829-2023-2-16-23.

11. 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.

12. Filipovich O. Simulation model of selective assembly of three elements // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, 2020:9271388. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271388.

13. Filipovich O.V., Balakina A.I., Balakina N.A. etc. 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*, 2021:012188. DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012188.

14. Филипович О. В. Имитационная модель селективной сборки трех элементов с сортировкой по оцениваемым значениям // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2022. № 1. С. 14–17.

15. Филипович О. В. Влияние погрешностей измерения на показатели однопараметрической многовариантной селективной сборки двух элементов // Современные технологии сборки: Материалы VIII Международного научно-технического семинара, Москва, 19–20 октября 2023 года. М.: Московский Политех, 2023. С. 149–154.

References

1. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie system* [Modelling of systems]. Moscow: Yurait Publ., 2021. 343 p. (in Russ.).

2. 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.

3. 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.

4. Myshkis A.D. *Elementy teorii matematicheskikh modelej* [Elements of the theory of mathematical models]. Moscow: Lenand Publ., 2019. 304 p. (in Russ.).

5. Law A.M. [Simulation modeling and analysis. Sixth Edition]. McGraw-Hill, 2024. 688p.

6. Boev V.D. *Kontseptual'noe proektirovanie sistem v AnyLogic i GPSS World* [Conceptual design of systems in

AnyLogic and GPSS World]. Moscow: INTUIT; IPR Media, 2021. 542 p. (in Russ.).

7. Hrol E., Uvarova A., Kuzhilny A. [Development of simulation models with Any Logic]. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2023. 3. Pp. 0119-0130 (in Russ.). DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0119-0130.

8. Xue D., Pan F. [MATLAB and Simulink in Action]. Springer Singapore, 2024. 468 p. DOI 10.1007/978-981-99-1176-9.

9. Smith J.S., Sturrock D.T. [Simio and Simulation – Modeling, Analysis, Applications. 6th Edition]. Createspace Independent Publishing Platform, 2023. 436 p.

10. Lapteva E., Lekareva Yu., Umansky S. [Imitation Modeling of Production Processes in FlexSim Environment]. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2023. 20. Pp. 16-23. DOI 10.21686/2413-2829-2023-2-16-23.

11. 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.

12. Filipovich O. [Simulation model of selective assembly of three elements]. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, 2020:9271388. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271388.

13. Filipovich O.V., Balakin A.I., Balakina N.A. etc. [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*, 2021:012188. DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012188.

14. Filipovich O.V. [Simulation model of selective assembly of three elements with sorting by estimated values]. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*, 2022. No. 1. Pp. 14-17 (in Russ.).

15. Filipovich O.V. *Vliyanie pogreshnostei izmereniya na pokazateli odnoparametricheskoi mnogovariantnoi selektivnoi sborki dvukh elementov* [Influence of the measurement errors on the indices of the single-parameter multivariate selective assembly of two elements]. *Sovremennye tekhnologii sborki: Materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar* [Modern assembly technologies: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Seminar, Moscow, 19-20 October 2023]. Moscow: Moscow Polytechnic, 2023. Pp. 149-154 (in Russ.).

* * *

Simulation Model of One-Parameter Selective Assembly of Two Elements With Multivariate Set-Making

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

Analytical and simulation methods are used to model assembly processes and technological systems in order to determine and optimize their performance and functioning parameters. The first one, describes an object or process using mathematical relationships indirectly. Simulation modelling is one of the modern methods of production system experimental research, allowing to take the presence of various components in the system, nonlinear characteristics, non-determinism and dynamism of ongoing processes into account. This work is devoted to the simulation model development of the technological process of multivariate one-parameter selective assembly of two elements. Multivariate set-making is defined by generalized rules with a set of weights which elements are set the distribution of elements between sets of different types. Selectively assembled elements have parameters determined by the manufacturing stage, which are independent random variables with known probabilistic characteristics.

It is assumed that the input-output relationship is linear with given coefficients, the set-making equations linking the numbers of selective groups and assembly sets are known. A simulation model of the assembly process was built in the GPSS World, which, in contrast to the known one, operates with multivariate set-making rules for the case of assembly of two elements. The model allows to determine the quantitative indicators of the assembly process, in particular, the probabilities

of assembly set formation, work-in-progress and preliminary rejects. As an example, the process of multivariate set-making of two parts forming a precision engineering product is considered. The data of parts distributions of both types by selective groups before assembly are given, the technological process indicators are calculated. Based on the modelling results the advantages and disadvantages of the multivariate set-making process are outlined.

Keywords. selective assembly, simulation model, multivariate set-making.

Получено: 19.06.24

Образец цитирования

Филипович О. В. Имитационная модель однопараметрической селективной сборки двух элементов с многовариантным комплектованием // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 3. С. 92–96. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-92-96.

For Citation

Filipovich O.V. [Simulation model of one-parameter selective assembly of two elements with multivariate set-making]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 92-96. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-3-92-96.