

Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования процесса селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при сортировке

О.В. Филипович

Севастопольский государственный университет

Аннотация: Произведена оценка правильности аналитических моделей процесса однопараметрической селективной сборки двух элементов путем сравнения с результатами имитационного моделирования. Проводилась серия машинных экспериментов, включающая однофакторные и двухфакторные. При принятых уровнях варьирования факторов определялся доверительный интервал вероятности выхода годных изделий из исходной совокупности элементов, не прошедших сортировку, с использованием критерия Стьюдента при заданных уровне значимости и числе степеней свободы. Сравнение результатов моделирования выявило факты попадания указанного показателя процесса, определенного по аналитической модели, для всех экспериментов в пределы доверительных интервалов и наличия относительно небольших отклонений от их центров.

Ключевые слова: селективная сборка, аналитическая модель, имитационная модель, погрешность измерения, результаты моделирования.

Введение

Для моделирования с целью определения и оптимизации показателей сборочных процессов, параметров функционирования сборочных производств, используются разнообразные методы, которые можно разделить на два широких класса: аналитические и имитационные [1].

Вероятностно-аналитическое моделирование основано на косвенном описании моделируемого объекта с помощью набора математических формул. Наиболее существенная характеристика аналитических моделей заключается в том, что модель не является структурно подобной объекту моделирования, под которым понимается однозначное соответствие элементов и связей модели элементам и связям моделируемого объекта. Такие модели являются мощным и эффективным инструментом для решения задач оптимизации или вычисления характеристик производственных систем. При построении аналитических моделей автоматизированных

производственных, в том числе, сборочных, систем используется математический аппарат теории массового обслуживания [2,3], марковских и полумарковских процессов [4,5] и др.

Имитационное моделирование основано на прямом описании моделируемого объекта. Существенной характеристикой таких моделей является структурное подобие объекта и модели: каждому элементу объекта ставится в соответствие элемент модели. При построении имитационной модели описываются законы функционирования каждого элемента объекта и связи между ними. Работа с имитационной моделью заключается в проведении имитационного эксперимента, в ходе которого процесс модели подобен процессу в реальном объекте. Исследование объекта по его имитационной модели сводится к изучению характеристик процесса, протекающего в ходе эксперимента [6,7].

В данной работе рассматривается процесс однопараметрической селективной сборки двух элементов при условии одновариантного комплектования. Имитационная модель такого процесса построена в [8] и модифицирована в [9] для учета ошибочной сортировки. Аналитическая модель и метод, позволяющий учесть влияние погрешностей измерения на показатели сборочного процесса, приведены в [10]. Целью данной работы является сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования двухэлементной однопараметрической селективной сборки в условиях неточных измерений.

Эксперименты и их результаты

Обозначения, принимаемые далее, соответствуют приведенным в [8-10]. Для сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования проводился однофакторный машинный эксперимент [11]. В качестве фактора использовалось значение предела допускаемой

погрешности измерения Δ_{lim} , на выходе модели определялся выход годных из исходной совокупности элементов, не прошедших сортировку ($P_0 = I_{ГСК}$).

При проведении эксперимента принималось равенство

- расширенных допусков на изготовление параметров элементов Tx_i ,
- групповых допусков $Tx_i^{(k_i)}$,
- количества селективных групп $l_1 = l_2 = l$,
- предела допускаемых погрешностей $\Delta_{\text{lim}1} = \Delta_{\text{lim}2} = \Delta_{\text{lim}}$,

а фактор варьировался на двух уровнях:

$$\Delta_{\text{lim}i} = \left[\frac{1}{c_{x_i}} Tx_i^{(k_i)}, \frac{1}{c_{x_i}} Tx_i^{(k_i)} \right],$$

где коэффициенты $c_{x_i} = [2; 4]$, $i = \overline{1, 2}$. Каждый эксперимент повторялся $n = 30$ раз (в имитационной модели было задействовано соответствующее количество генераторов случайных чисел), поэтому для каждой точки факторного пространства были получены 30 значений отклика показателя P_0 .

После проведения машинного эксперимента производилась оценка среднего значения функции отклика по методике, приведенной в [12]. Предполагается, что из общей статистической совокупности значений случайных величин, имеющей нормальное распределение, взята частичная совокупность из 30 значений. На основании результатов эксперимента вычисляются с определенной степенью надежности границы, внутри которых может находиться среднее значение общей совокупности \tilde{P}_0 . В [12] показано, что в соответствии с критерием Стьюдента, среднее при определенном уровне значимости α и числе степеней свободы ν должно находиться в пределах доверительного интервала

$$\bar{P}_0 - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} < \tilde{P}_0 < \bar{P}_0 + t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}},$$

где \bar{P}_0 – среднее значение частичной совокупности:

$$\bar{P}_0 = \frac{\sum_{j=1}^n P_{0j}}{n};$$

s^2 – несмещенная оценка дисперсии совокупности:

$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (P_{0j} - \bar{P}_0)^2}{n-1};$$

t_α – значение статистики t при уровне значимости α и числе степеней свободы $\nu = n - 1$. Такой интервал определялся для каждой точки факторного пространства. При $\alpha = 0,05$ и $\nu = 29$ значение $t_\alpha = 2,045$.

Эксперименты проводились при следующих исходных данных.

1. Собираемые элементы – детали двух типов (x_1 – вал, x_2 – втулка), которые изготавливаются партиями с одинаковым объемом $Q = 10000$ штук, допусками $Tx_1 = Tx_2 = 10$ мкм, количеством групп сортировки $l_1 = l_2 = 7$.

2. Образуя прецизионное изделий, детали соединяются между собой с зазором, лежащем в пределах $S \in [1...5]$ мкм. Координаты середин интервалов расширенных допусков на изготовление размеров деталей соответственно равны 2 мкм и 5 мкм.

3. Распределения размеров деталей x_i в соответствующих партиях – по нормальным законам с математическими ожиданиями $m_1 = 2$ мкм, $m_2 = 4$ мкм и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_1 = 1,6$ мкм, $\sigma_2 = 1,8$ мкм.

При моделировании использовались три вида закона распределения случайной составляющей погрешности измерения δ (нормальный, равномерный, равнобедренного треугольника), при этом считалось, что вид закона δ_i ($i = \overline{1,2}$) в каждом эксперименте является одинаковым, а коэффициенты c_{Δ} в формуле $\sigma_{\delta_1} = \sigma_{\delta_2} = \frac{\Delta_{\text{lim}}}{c_{\Delta}}$ равны 2. Результаты обработки статистической информации сведены в таблицы №№1-3.

Таблица №1

Результаты исследований (закон распределения СВ δ_i – нормальный)

№ точки факторного пространства	Выход годных P_0		
	доверительный интервал, построенный по данным имитационного моделирования		по аналитической модели
1	0,736	0,741	0,737
2	0,755	0,761	0,758

Таблица №2

Результаты исследований (закон распределения СВ δ_i – равномерный)

№ точки факторного пространства	Выход годных P_0		
	доверительный интервал, построенный по данным имитационного моделирования		по аналитической модели
1	0,728	0,733	0,729
2	0,754	0,759	0,756

Таблица №3

Результаты исследований (закон распределения СВ δ_i – Симпсона)

№ точки факторного пространства	Выход годных P_0		
	доверительный интервал, построенный по данным имитационного моделирования		по аналитической модели
1	0,746	0,750	0,747
2	0,759	0,764	0,760

Для аналогичных исходных данных в предположении, что случайная составляющая погрешностей измерения подчиняется нормальному закону, а математические ожидания размеров деталей x_i в партиях равны координатам середин интервалов расширенных допусков, проведем двухфакторный эксперимент, представляющий собой зависимость одного отклика (зависимого параметра) от двух факторов (независимых параметров) при постоянности других факторов. В качестве отклика, как и ранее, принимаем «выход годных», а факторами в данном случае будут выступать:

- коэффициент c_{x_i} с уровнями варьирования $c_{x_i} = [1,5; 2,5]$, $i = \overline{1,2}$;
- коэффициент c_{Δ_i} с уровнями варьирования $c_{\Delta_i} = [2; 3]$, $i = \overline{1,2}$.

Результаты обработки статистической информации приведены в таблице №4.

Таблица №4

Результаты аналитических и имитационных исследований
(двухфакторный эксперимент)

№ точки факторного пространства	c_x	c_{Δ}	Выход годных P_0		
			доверительный интервал, построенный по данным ИМ		по аналитической модели
1	1,5	2	0,883	0,887	0,884
2	1,5	3	0,918	0,922	0,919
3	2,5	2	0,923	0,927	0,925
4	2,5	3	0,935	0,940	0,939

Заключение

Сравнение результатов моделирования показывает, что определенные по аналитической модели показатели P_0 :

- для всех экспериментов входят в доверительный интервал;
- имеют относительную разницу между центрами доверительных интервалов не более 0,3%.

Полученные данные показывают хорошее совпадение результатов аналитического и имитационного моделирования в исследованной области значений параметров. Для случая, когда невозможно или нецелесообразно проведение производственного эксперимента, такой сравнительный анализ может служить подтверждением адекватности аналитической модели.

Литература

1. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3–е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
2. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем. Севастополь: СевНТУ, 2012. 700 с.
3. Замоленов М.В., Копп В.Я., Замоленова Д.В., Явкун Ю.Л. Моделирование процесса функционирования обслуживающего устройства с обесценивающими отказами методом путей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 4. С. 225-236.
4. Копп В.Я., Замоленов М.В., Чаленков Н.И. Разновидность фазового укрупнения полумарковских систем на примере моделирования синхронной автоматизированной линии // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т.16, № 3. С. 97-102. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-97-102.
5. Obzherin Y.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures // Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures. 2015. pp. 1-199. DOI: 10.1016/C2014-0-02226-5.
6. Анисимов П.Н., Онучин Е.М., Медяков А.А. Аналитико-имитационная модель функционирования системы автономного энергообеспечения от двигателя внешнего сгорания на древесном топливе измельчающе-транспортной машины для производства щепы // Инженерный вестник Дона, 2019, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6068/.

7. Зацаринная Т.Г., Аникевич К.П. Имитационная модель цифровой системы автоматического регулирования давления в компенсаторе давления реакторной установки // Инженерный вестник Дона, 2023, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8281/.

8. Филипович О.В., Копп В.Я., Гарматюк М.И. Имитационная модель процесса однопараметрической селективной сборки // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2012. №5. С. 81-90.

9. Филипович О.В., Невар Г.В. Оценка влияния погрешности измерения на показатели селективной сборки с помощью имитационного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-1. С. 428-437.

10. Filipovich O., Nevar G., Balakina N., Voloshina N. Method for taking into account measurement errors when sorting elements into selective groups // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V. 2024. pp. 174-182. DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1_17.

11. Кринецкий И.И. Основы научных исследований: Учебное пособие для вузов. Киев. – Одесса: Вища школа, 1981. 208 с.

12. Митропольский А.К. Статистическое исчисление. Ленинград, 1953. т.3. 200 с.

References

1. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovanie sistem: Ucheb. dlya vuzov [Systems Modelling: Textbook for Universities]. M.: Vyssh. shk., 2001. 343 p.

2. Kopp V.Ya. Modelirovanie avtomatizirovannykh proizvodstvennykh system [Modelling of automated production systems]. Sevastopol: SevNTU, 2012. 700 p.

3. Kopp V.Ya., Zamorenov M.V., Chalenkov N.I. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2018. 16(3). pp. 97-102. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-97-102.



4. Zamorenov M.V., Kopp V.Ya., Zamorenova D.V., Yavkun Yu.L. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016. 4. pp. 225-236.

5. Obzherin Y.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models: Control of Restorable Systems with Latent Failures. 2015. pp. 1-199. DOI: 10.1016/C2014-0-02226-5.

6. Anisimov P.N., Onuchin E.M., Medyakov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6068/.

7. Zatsarinnaya T.G., Anikevich K.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8281/.

8. Filipovich O.V., Kopp V.Ya., Garmatyuk M.I. Sborka v mashinostroenii i priborostroenii. 2012. №5. pp. 81-90.

9. Filipovich O.V., Nevar G.V. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017. №9-1. pp. 428-437.

10. Filipovich O., Nevar G., Balakina N., Voloshina N. International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V. 2024. pp. 174-182. DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1_17.

11. Krinetskiy I.I. Osnovy nauchnykh issledovaniy: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Fundamentals of Scientific Research: Textbook for Universities]. Kiev. Odessa: Vishcha shkola, 1981. 208 p.

12. Mitropol'skiy A.K. Statisticheskoe ischislenie [Statistical calculus]. Leningrad, 1953. T.3. 200 p.

Дата поступления: 18.02.2024

Дата публикации: 27.03.2024