

Исследование компенсации брака при изготовлении партии узлов на гибких производствах

Н. И. Аристова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова» РАН, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача изготовления определенного числа качественных изделий на гибких дискретных производствах. Поскольку некоторое число изделий всегда идет в брак, то необходимо предусмотреть изготовление избыточного числа изделий, что потребует дополнительного числа заготовок, ресурсов т. п. Задача исследована с помощью методологии моделирования, позволяющей анализировать эффективность автоматизации заданного набора технологических операций на начальном этапе технологической подготовки гибкого производства.

Ключевые слова: гибкое производство, моделирование, анализ эффективности автоматизации технологических операций, компенсация брака, вероятность.

DOI 10.14357/20718632230108

Введение

В условиях цифровизации появилась возможность исследования производственных процессов с применением современной технологии моделирования в режиме on-line. В модели исследуемого процесса поступает совокупность цифровых данных от объекта и окружающей среды в режиме on-line (частота определяется особенностью задачи). Результаты моделирования передаются на объект или процесс с частотой требуемой задачей. Данный подход применяется, например, при создании цифровых производственных двойников [1-8].

Описанный подход к исследованию производственных процессов с помощью on-line моделирования позволяет решать производственные задачи, требовавшие до настоящего времени недопустимо больших временных, вычислительных, кадровых и финансовых затрат.

Одной из таких задач является исследование процесса технологической подготовки дискретного производства, которая выполняется каждый раз перед выпуском новой продукции.

Технологическая подготовка дискретного производства состоит из ряда этапов, которые в настоящий момент в значительной степени автоматизированы и цифровизированы. Исключение составляет самый первый этап – отработка конструкции на технологичность. Этот этап характеризуется как трудноформализуемый. Анализ известных научных публикаций показал, что лишь единичные работы учитывают на первом этапе производственные условия и характеристики средств производства (далее – автоматов). Для устранения этого пробела в ИПУ РАН разработана методология моделирования для исследования процессов технологической подготовки гибких производств, основанная на анализе эффективности автоматизации технологических операций

(ТО) по различным критериям, учитывающим показатели качественного выполнения ТО автоматами [9-12]. В соответствии с этой методологией автоматизация технологических процессов рассматривается с точностью до отдельных видов ТО, а в роли показателя качественного выполнения ТО автоматами используется вероятность того выполнения.

Разработанная методология ориентирована на гибкие производства, которые выпускают изделия небольшими партиями и максимально учитывают требования отдельных клиентов.

Метод компенсации брака при изготовлении партии узлов

Методология моделирования для исследования процессов технологической подготовки гибких производств включает совокупность вычислительных методов и алгоритмов, позволяющих уже на самом первом этапе технологической подготовки производства исследовать время и стоимость изготовления изделия с учетом вероятности качественного выполнения ТО автоматами.

Рассмотрим решение задачи компенсации брака при изготовлении партии узлов.

При изготовлении партии изделий требуется изготовить определенное число *качественных* изделий. Поскольку некоторое число всегда идет в брак, то необходимо предусмотреть изготовление избыточного числа изделий, что потребует дополнительного числа заготовок, ресурсов т. п.

Формальная постановка задачи: с вероятностью не ниже S изготовить N *качественных* изделий в предположении, что брак статистически независим, вероятность качественного изготовления отдельного изделия равна p , а контроль идеален. Идеальный контроль означает, что качественное изделие с вероятностью 1 признается качественным, а бракованное с вероятностью 1 признается браком. Стоимость идеального контроля учитывать не будем.

При сделанных предположениях о независимости брака функция распределения числа качественных узлов в партии описывается биномиальным распределением [13]. Вероятность, что в партии из N узлов точно будет k качественных, равна:

$$Bin(k, N, p) = C_N^k p^k (1-p)^{N-k}, \quad (1)$$

где k – число точно качественных узлов, то есть признанных в ходе моделирования качественными с учетом вероятностей качественного выполнения технологических и контрольных операций;

C_N^k – число сочетаний из N по k ;

p – вероятность, что изделие качественное.

Например, требуется изготовить партию из $N=100$ изделий качественно с вероятностью $S \geq 0,999999$. Каждое изделие качественно с вероятностью $p=0,99$, что соответствует браку $\delta=1-p=0,01=1\%$.

Вероятность, что в изготовленной партии будет точно k качественных изделий, определяется биномиальным распределением, которое примет вид:

$$Bin(k, 100, 0,99) = C_{100}^k 0,99^k 0,01^{100-k}. \quad (2)$$

Для изготовления не менее N качественных изделий необходимо увеличение партии на ΔN . Вероятность, что в партии будет не менее N качественных узлов:

$$S(N + \Delta N) \leq \sum_{j=N}^{N+\Delta N} Bin(N, j, p). \quad (3)$$

Непосредственно по биномиальному распределению (1) составлена справочная таблица (Табл. 1), в которой приведены полученные данные о том, сколько добавочных узлов необходимо изготовить сверх минимально необходимых N , чтобы в расширенной партии из $(N + \Delta N)$ изделий с вероятностью $S = 0,999999$ было не менее N качественных узлов при заданной вероятности изготовления одного качественного узла P .

Для составления таких таблиц в формулу (1) помимо заданных исходных данных (N, P, S) последовательно (методом перебора) вводятся значения ΔN до тех пор, пока не будет соблюдено условие (3).

В Табл. 1 наблюдаются в достаточной мере очевидные зависимости: размер «добавки» увеличивается с увеличением требуемого числа качественных узлов и уменьшается с увеличением вероятности качественного изготовления узлов.

Табл. 1. Расчет добавочного числа узлов ΔN (сверх M), необходимого для получения M качественных узлов с вероятностью $S \geq 0,999999$ при заданной вероятности качественного изготовления узла P

Требуемое число качественных узлов N	Вероятность качественного изготовления одного узла P					
	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99	0,999
	ΔN					
1	9	8	7	5	4	3
10	12	10	9	6	5	3
100	33	28	21	13	10	5
1000	169	141	93	47	30	10
10000	1288	1022	652	277	157	29
100000	11666	9170	5631	2212	1166	155
1000000	112900	88420	53800	21111	10588	1170

Оперативное определение значения ΔN позволяет без лишних временных затрат оценить общие временные затраты на изготовление партии продукции в размере $(N+\Delta N)$:

$$\Phi_{all}(A) = (N + \Delta N)\Phi(A). \quad (4)$$

где $\Phi(\alpha)$ – среднее время изготовления одного узла.

Практический пример

Разработанная методология моделирования применялась для исследования процесса технологической подготовки гибкого производства датчика расхода жидкости. Для изготовления датчика требовалось изготовить три узла. На первом этапе требовалось произвести запрессовку стержня в корпус датчика – узел «Корпус-стержень». При этом учитывалось, что корпуса датчика расхода могут оказаться некачественными (бракованными). При необходимости изготовить партию качественных изделий требуется предусмотреть наличие дополнительного числа заготовок (корпусов датчика). Для решения этой задачи применялся рассмотренный метод.

При помощи соответствующих методов и алгоритмов методологии были получены:

- вероятность качественного изготовления узла “Корпус-Стержень”: $P=0,98$;
- среднее время изготовления одного узла $\Phi_1=0,39$ мин.

Далее применялась справочная таблица, построенная по биномиальному распределению вероятностей качественного выполнения ТО.

По справочной таблице для серии $N=1$ тыс. ед., $P=0,98$ и $S>0,9999$ получаем $\Delta N=47$ ед.

И по формуле (4) определяем время изготовления партии качественных узлов:

$$\Phi_{all}(A) = (1000 + 47) \cdot 0,39 = 408,33 \text{ мин.}$$

Заключение

Рассмотренный практический пример показывает преимущества, достигаемые при применении методологии моделирования для исследования процесса технологической подготовки гибких производств и анализа эффективности автоматизации отдельных ТО – оперативное получение требуемых для принятия решения оценок без участия обладающих соответствующим опытом экспертов.

В рассмотренном практическом примере оперативно получены оценки среднего времени изготовления узла с учетом дополнительного числа заготовок, компенсирующих брак. По результатам этих оценок технологический персонал может вырабатывать стратегию изготовления изделия уже на начальной стадии технологической подготовки производства.

Аналогично могут быть получены оценки средней стоимости изготовления узла с учетом дополнительного числа заготовок, компенсирующих брак.

Применение данной методологии будет особенно полезно при обработке заготовок небольшими партиями и при частой смене ассортимента выпускаемых изделий.

Литература

1. Botin-Sanabria D.M. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review // Remote Sens. – 2022. – 14. Pp.1335-1359.

2. Kuehner K.J, et al. Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review // *Procedia CIRP*. – 2021.– 104(11)– Pp.1227-1232.
3. Rossmann A., Hertweck D. Digital Twins: A Meta-Review on Their Conceptualization, Application, and Reference Architecture // *Hawaii International Conference on System Sciences*. – 2022. – Pp. 4518-4527.
4. Grieves M. Intelligent Digital Twins and the Development and Management of Complex Systems // *Digital Dwin Electronic Journal*. – 2022. – May. – Pp.1-18 <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17574.1>
5. Dozortsev V., et al. Digital twins in industrial process engineering // In: *Proc. SCIFI-IT'21 Conference, Ghent, Belgium*. – 2021. – Pp. 37-42.
6. Wilking, F., et al. Digital Twins – Definitions, Classes and Business Scenarios for Different Industry Sectors //In: *Proc. International Conference on Engineering Design (ICED21)*. – 2021. – Pp. 1293-1302.
7. Newrzella S.R., et al. 5-dimension cross-industry Digital Twin applications model and analysis of Digital Twin classification terms and models // *IEEE Access*. –2021. – 9. – Pp.131306-131321.
8. Shen M., et al. Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges, and Research Opportunities for Operations Research // *SSRN Electronic Journal*. – 2021. – February. – <https://ssrn.com/abstract=3777695>
9. Аристова Н.И. Управление уровнем автоматизации при производстве автоматов. Вероятностная схема // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2014. – №2. – С. 17–22.
10. Аристова Н.И. Управление уровнем автоматизации при производстве автоматов. Иерархическая схема // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2015. – №1. – С. 77–82.
11. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Повышение эффективности технологической подготовки производства за счет учета вероятностей качественного изготовления изделия на этапе отработки конструкции изделия на технологичность // *Датчики и системы*. – 2020. – №12. – С.40–46.
12. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Метод быстрого оценивания технологичности конструкции изделия с учетом вероятностей качественной работы автоматизированных средств производства // *Датчики и системы*. – 2021. – №1. – С.65–71.
13. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. Пер. с англ.; предисл. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1984.–751 с. [Feller W. An introduction to probability theory and its applications, Vol. 2. N.Y.: Wiley Publ., 1971. 669 p.]

Аристова Наталья Игоревна. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова» РАН, Москва. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Количество печатных работ: 60 (в т. ч. 1 монография). Научные интересы: моделирование, промышленная автоматизация, робототехника, технологическая подготовка производства. E-mail: avtprom@ipu.ru

Investigation of Defect Compensation in the Manufacture of a Batch of Units in Flexible Production

N. I. Aristova

Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The problem of manufacturing a certain number of high-quality products in flexible discrete industries is considered. Since a certain number of products always goes to waste, it is necessary to provide for the manufacture of an excess number of products, which will require an additional number of blanks, resources, etc. The problem is studied using a modeling methodology that allows analyzing the efficiency of automation of a given set of technological operations at the initial stage of technological preparation of flexible production.

Keywords: flexible production, modeling, analysis of the efficiency of automation of technological operations, rejection compensation, probability.

DOI 10.14357/20718632230108

References

1. Botin-Sanabria, D.M. 2022. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sens.* 14:1335-1359.
2. Kuehner, K.J and et al. 2021. Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. *Procedia CIRP.* 104(11):1227-1232.
3. Rossmann, A., D. Hertweck. 2022. Digital Twins: A Meta-Review on Their Conceptualization, Application, and

- Reference Architecture. Hawaii International Conference on System Sciences. Proceedings. 4518-4527.
4. Grieves, M. 2022. Intelligent Digital Twins and the Development and Management of Complex Systems. Digital Dwin Electronic Journal. Available at: <https://digitaltwin1.org/articles/2-8/v1>. (Accessed January 25, 2023).
 5. Dozortsev V., et al. 2021. Digital twins in industrial process engineering // In: Proc. SCIFI-IT'21 Conference, Ghent, Belgium. 37-42.
 6. Wilking, F., et al. 2021. Digital Twins – Definitions, Classes and Business Scenarios for Different Industry Sectors. In: Proc. International Conference on Engineering Design (ICED21). 1293-1302.
 7. Newrzella, S.R., et al. 2021. 5-dimension cross-industry Digital Twin applications model and analysis of Digital Twin classification terms and models. IEEE Access. 9:131306-131321.
 8. Shen, M., et al. 2021. Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges, and Research Opportunities for Operations Research. SSRN Electronic Journal. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3777695>. (Accessed January 25, 2023).
 9. Aristova, N.I. 2014. Upravlenie urovnem avtomatizatsii pri proizvodstve avtomatov. Veroytnostnay chema. [Management of the level of automation in the production of automatic machines. Probabilistic scheme]. Informationnyye tehnologii i vychislitelnye sistemy [Information technology and computing systems]. 2:17–22.
 10. Aristova, N.I. 2015. Upravlenie urovnem avtomatizatsii pri proizvodstve avtomatov. Ierarhicheskay chema. [Management of the level of automation in the production of automatic machines. Hierarchical scheme]. Informationnyye tehnologii i vychislitelnye sistemy [Information technology and computing systems]. 1:77–82.
 11. Aristova, N.I., V.M. Chadeev. 2020. Povyshenie effektivnosti tehnologicheskoi podgotovki proizvodstva za schet ucheta veroyatnostei kachestvennogo izgotovleniy izdelia na etape otrabotki konstrukcii izdelia na tehnologichnost [Increasing the efficiency of technological preparation of production by taking into account the probabilities of high-quality manufacturing of the product at the stage of testing the design of the product for manufacturability]. Datchiki i sistemy. [Sensors and systems]. 12:40–46.
 12. Aristova, N.I., V.M. Chadeev. 2021. Metod bystrogo ochenivaniy tehnologichnosti konstrukcii izdelia s uchedom veroyatnostei kachestvennoi raboty avtomatizirovannyh sredstv proizvodstva. [A method for quickly assessing the manufacturability of a product design, taking into account the probabilities of high-quality work of automated production tools]. Datchiki i sistemy. [Sensors and systems]. 1:65–71.
 13. Feller, W. 1984. Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya. Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya. [An Introduction to Probability Theory and its Applications]. Vol. 2. Moscow: Mir Publ., 1984. 751 p.

Aristova N. I. PhD, **V.A.** Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. 165, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia, e-mail: avtprom@yandex.ru