

ИМИТАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

DOI: 10.25728/mlsd.2023.062;

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ГИБКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аристова Н.И., Чадеев В.М.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

avtprom@ipu.ru, chavama@ipu.ru

Аннотация. Поставлена задача создания математических моделей процесса технологической подготовки гибкого дискретного производства, охватывающих этап отработки конструкции изделия на технологичность. Приведено формализованное описание и обобщенной модели гибкого дискретного производства. Разработанные модели могут использоваться в составе цифрового двойника изготавливаемого на гибком производстве изделия.

Ключевые слова: математические модели, гибкое дискретное производство, цифровой двойник изделия, технологическая подготовка производства, технологическая операция, вероятность качественного изготовления изделия.

Введение

В настоящее время для повышения эффективности технологической подготовки производства и выполнения технологического процесса, а также для выявления потенциальных проблем в процессе изготовления изделий на дискретных производствах используется математическое моделирование. Наличие подробной информации о технологическом процессе, собранной благодаря технологии промышленного Internet вещей (IoT), и возможности алгоритмов обработки больших данных, реализованные в аналитических облачных приложениях, расширяют функциональность технологий математического моделирования, позволяя строить модели производственных участков уровня Industry 4.0, получившие название цифровых двойников.

1. Применение цифровых двойников на гибком производстве

Гибким производством назовем производственный процесс, способный благодаря использованию цифровых технологий быстро перенастраиваться на изготовление различных видов изделий, изготавливать изделия небольшими партиями и удовлетворять требованиям отдельных групп потребителей.

Цифровой двойник гибкого производства – цифровая модель производственной ячейки, линии, участка, цеха или производственного комплекса в целом, содержащая необходимые данные о производственном объекте и реализуемом в нем процессе, поддерживаемая в актуальном состоянии в реальном времени. Цифровой двойник позволяет моделировать основные и вспомогательные производственные, технологические, логистические и иные процессы с целью расчета и оптимизации требуемых организационно-технологических и технико-экономических параметров производства. Моделирование осуществляется с требуемой точностью и детализацией, вплоть до полной идентичности по всем цифровым параметрам, получаемым как из модели, так и от реального производства. Цифровой двойник позволяет в любой момент времени выдать состояние объекта, рассчитанное по модели. По разнице оригинала и модели можно сделать вывод об изменениях на объекте. Для реализации цифровых двойников наиболее часто используются алгоритмы машинного обучения [1].

На сегодняшний день понятие цифрового двойника процесса или объекта уже полностью сложилось, опубликовано множество исследований, рассматривающие самые разные стороны вопроса [2-18].

Перечислим некоторые практические задачи, которые позволяет решать цифровой двойник гибкой производственной линии.

Цифровой двойник обеспечивает не только полный контроль над производственной линией в режиме реального времени, но и некоторые возможности прогнозирования, например, позволяет заблаговременно обнаружить признаки будущего сбоя в работе оборудования и рекомендовать выполнение немедленного техобслуживания. Таким образом, ожидается, что частота отказов оборудования в Industry 4.0 среде будет значительно снижена, что приведет к более высокой пропускной способности [19, 20].

Цифровой двойник может интегрироваться с системой уровня MES. В этом случае используя, например, сменно-суточные задания из MES в цифровом двойнике можно отладить технологический процесс сборки новой продукции или работу новой производственной линии. Это особенно актуально для мелкосерийного производства, когда переналадку оборудования нужно осуществлять за минимальное время.

Цифровые двойники применяются для создания технологических программ работы оборудования с цифровым интеллектуальным управлением (автоматов, автоматов и др.). Цифровые двойники данного назначения должны обладать самой высокой степенью идентичности реальным объектам, иначе при запуске технологической программы на реальном производстве возможны некорректное исполнение ТО, производство брака, поломка оборудования и т.д. В связи с этим для повышения точности цифрового двойника осуществляется его калибровка. Это комплекс испытаний и мероприятий по отладке цифрового двойника с целью обеспечения его идентичности реальному промышленному объекту, с требуемой в соответствии с целями моделирования точностью совпадения организационно-технологических параметров, снимаемых как с двойника, так и с реального объекта. Например, при сборке электротехнических шкафов требуется выполнить прорези. Первоначально рез делается на двойнике для проверки модели. И уже откалиброванная технологическая программа загружается на производственный автомат. Таким образом, снижаются объемы производственного брака, сокращается этап отладки программы на реальном оборудовании [21,22].

Цифровой двойник производственной линии вносит свой вклад в создание цифровой модели производимой на предприятии продукции, то есть в создание цифрового двойника выпускаемого изделия. Цифровой двойник производственной линии сокращает время, необходимое для старта изготовления новых изделий, обнаруживает неэффективные настройки базовых производственных процессов.

1.1. Цифровые двойники для конкретных машиностроительных производств

Для иллюстрации использования цифровых двойников на машиностроительных производствах отметим проект, реализованный концерном R-Про (Санкт-Петербург) на Балтийском станкостроительном заводе, где для всех типов станков созданы цифровые двойники. Эти модели первоначально использовались для демонстрации возможностей оборудования заказчику, а затем применялись для программирования и настройки работы производственной линии в производственных цехах.

Другой пример – проект компании SOVA Digital совместно с Институтом автоматизации, измерений и прикладной информатики Словацкого технологического университета (Братислава). В ходе работы над проектом создан цифровой двойник линии сборки гидравлических поршней. Цифровая модель реализована с помощью пакета Plant Simulation компании Siemens. Целью создания цифрового двойника является непрерывная оптимизация производственных процессов и проактивное обслуживание оборудования в автомобильной промышленности Словакии. На следующем этапе исследований планируется создание собственной версии генетического алгоритма, который может быть интегрирован в программную среду Plant Simulation, для повышения точности настройки входных/выходных параметров сборочного процесса [23].

Западные исследователи предлагают в перспективе разработать обобщенную эталонную модель системы Industry 4.0, чтобы изучать возможности повышения производительности, надежности и гибкости производственной системы, качества выпускаемых изделий. Такой обобщенный цифровой двойник будет использоваться в качестве основы для построения цифровых двойников для конкретных производственных линий [24].

2. Математические модели для цифрового двойника технологической подготовки гибкого производства

Выпуску изделий предшествует технологическая подготовка производства, являющаяся затратным этапом по времени и ресурсам. При этом от качества выполнения этой подготовительной стадии во многом зависит эффективность изготовления изделий. В связи с этим актуальной является задача сократить время выполнения технологической подготовки производства и повысить качество выполнения всех ее этапов. Решить эту задачу помогут методы цифрового математического моделирования, то есть моделирования выполнения технологической подготовки производства в режиме on-line.

В настоящий момент большинство этапов технологической подготовки производства автоматизированы и оптимизированы. Исключение составляет самый первый этап – отработка конструкции изделия на технологичность. Данный этап характеризуется как сложно формализуемый. Большая роль для принятия решений на этом этапе отводится опытному технологу, оценивающему трудозатраты и себестоимость изделия, которое планируется выпускать.

В помощь технологу для принятия решений на этапе отработки конструкции изделий на технологичность разработана методология моделирования, базирующаяся на едином формализованном представлении гибкого дискретного производства и включающая набор цифровых моделей для описания различных производственных ситуаций. Данные модели могут использоваться отдельно или войти в состав цифрового двойника выпускаемого изделия.

2.1. Формализованное описание гибкого дискретного производства

Формализованное описание гибкого дискретного производства включает:

- описание технологических операций, которые выполняются при изготовлении изделий или техобслуживании автоматов. В качестве технологических операций также рассматриваются контрольные операции. Используется время выполнения технологической операции и вероятность ее качественного выполнения;
- описание автоматов (станки с ЧПУ, роботы, прочие средства производства), используемые при изготовлении изделий. Используется стоимость автомата (выражается через время), ресурс автомата, коэффициент единицы рабочего времени автомата как отношение стоимости к ресурсу;
- описание изготавливаемого изделия. Используется число используемых технологических операций при изготовлении изделия и число повторного выполнения каждой операции. Отдельно рассматриваются производства, на которых с помощью автоматов изготавливаются автоматы;
- модель процесса автоматизации технологических операций, описывающая какие технологические операции наиболее эффективно выполнять с помощью каких автоматов. Модель процесса автоматизации технологических операций представлена в виде матрицы. В строках матрицы указаны различные виды технологических операций, а в столбцах – различные типы автоматов. Элемент матрицы – параметр процесса автоматизации показывает производственный показатель, с которым данный автомат выполняет данную технологическую операцию. Показано, что оптимальный параметр автоматизации принимает значения только нуля (операция не выполняется автоматом) или единицы (автомат выполняет конкретную технологическую операцию эффективно).

В качестве производственных параметров рассматриваются:

- время и среднее время выполнения технологической операции;
- себестоимость изготовления изделия (выражается через время) и ее среднее значение;
- коэффициент единицы рабочего времени автомата и его среднее значение.

2.2. Обобщенная модель гибкого дискретного производства

На основе формализованного описания гибкого дискретного производства разработаны математические модели, описывающие различные производственные условия:

- изготовление изделия человеком как предельный вариант, позволяющий оценить эффективность автоматизации технологических операций;
- изготовление изделия одним типом автоматов;
- изготовление изделия системой автоматов;
- изготовление системы изделий системой автоматов;
- изготовление системы автоматов системой и автоматов (самовоспроизведение автоматов [25]).

Обобщенная модель гибкого дискретного производства включает две компоненты производственного процесса – аддитивную модель оценки себестоимости (числитель) и мультипликативную модель оценки вероятности качественного изготовления изделия (знаменатель):

$$F_k(A) = C_k(A)/P_k(A), \quad (1)$$

где

$$C_k(A) = \sum_{j=0}^f \lambda_k \sum_{i=1}^n \alpha_{ijk} b_{ij} h_{ik}, \quad (2)$$

$$P_k(A) = \prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{ijk} h_{ik}}. \quad (3)$$

Обозначения:

- b_{ij} – время выполнения технологической операции i -го вида автоматом j -го вида,
- α_{ijk} – параметр процесса автоматизации технологической операции i -го вида автоматом j -го типа при изготовлении автомата k -го типа;
- h_{ik} – число одинаковых технологических операций i -го вида, необходимых для изготовления одного экземпляра автомата k -го типа;
- λ_j – коэффициент единицы рабочего времени автомата j -го типа;
- f – число разных типов автоматов в системе;
- m – число видов технологических операций, необходимых для изготовления всей системы автоматов;
- p_{ij} – вероятность качественного изготовления технологической операции i -го вида автоматом j -го типа.

Благодаря тому, что в формализованном описании гибкого дискретного производства присутствует модель процесса автоматизации ТО, имеющая вид матрицы (табл. 1), стало возможным получить матричное представление обобщенной модели гибкого дискретного производства.

Таблица 1. Матричное представление обобщенной модели гибкого дискретного производства

ТО		R0	R1	...	Rf
1	$F_k(A) =$	$\frac{\alpha_{10} b_{10} \lambda_0 n_1}{p_{10}^{\alpha_{10} n_1}} +$	$+\frac{\alpha_{11} b_{11} \lambda_1 n_1}{p_{11}^{\alpha_{11} n_1}} +$...	$+\frac{\alpha_{1f} b_{1f} \lambda_f n_1}{p_{1f}^{\alpha_{1f} n_1}} +$
2		$+\frac{\alpha_{20} b_{20} \lambda_0 n_2}{p_{20}^{\alpha_{20} n_2}} +$	$+\frac{\alpha_{21} b_{21} \lambda_1 n_2}{p_{21}^{\alpha_{21} n_2}} +$...	$+\frac{\alpha_{2f} b_{2f} \lambda_f n_2}{p_{2f}^{\alpha_{2f} n_2}} +$
...	
m		$+\frac{\alpha_{m0} b_{m0} \lambda_0 n_m}{p_{m0}^{\alpha_{m0} n_m}} +$	$+\frac{\alpha_{m1} b_{m1} \lambda_1 n_m}{p_{m1}^{\alpha_{m1} n_m}} +$...	$+\frac{\alpha_{mf} b_{mf} \lambda_f n_m}{p_{mf}^{\alpha_{mf} n_m}}$

Отметим, что предложенные модели описывают иерархическое изготовление изделий, характерное для всех современных дискретных производств.

3. Результаты моделирования

Полученные на начальной стадии технологической подготовки гибкого производства результаты моделирования – оценки критериев эффективности производства с помощью конкретных автоматов будут полезны для (рис. 1):

- принятия решения о целесообразности выпуска изделия на производстве;
- принятия обоснованных и оперативных решений по автоматизации технологических операций на последующих этапах технологической подготовки гибкого производства изделия и в процессе его производства, например, формирование стратегий технического обслуживания и переналадки автоматов на новую продукцию;
- исключения из рассмотрения заведомо неэффективных решений по автоматизации технологических операций (ТО).

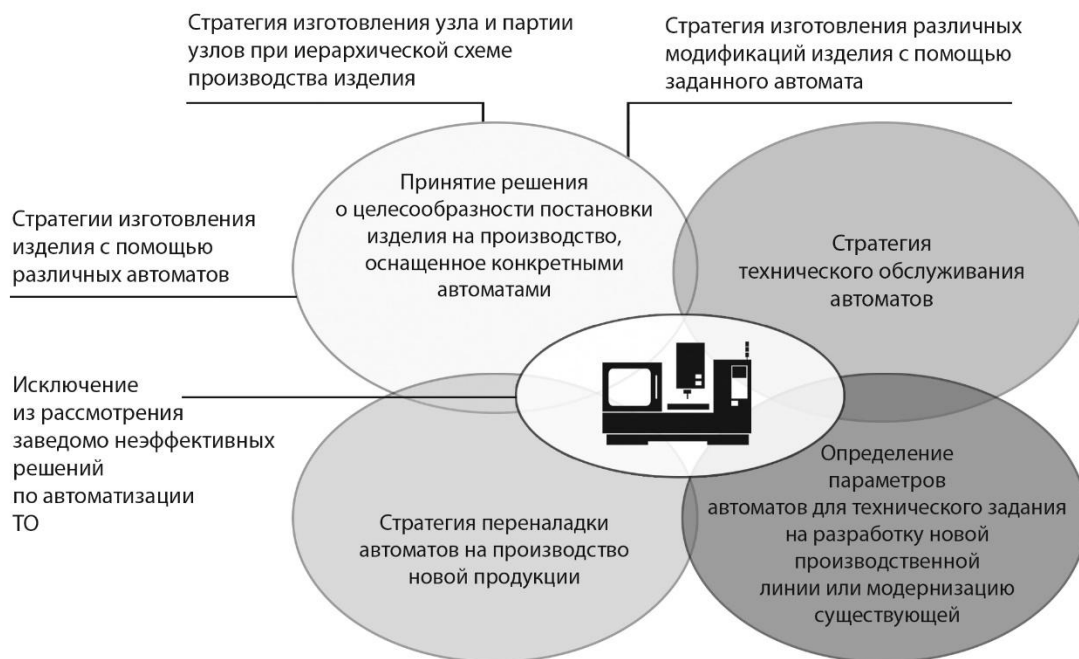


Рис. 1. Применение результатов моделирования

4. Заключение

Таким образом, полученные в результате моделирования оценки производственных показателей будут способствовать сокращению времени выполнения процесса технологической подготовки производства, начиная с ее первого этапа – отработки технологичности конструкции изделия на технологичность, что особенно важно для гибких автоматизированных производств, регулярно перенастраиваемых на выпуск нового изделия и подстраиваемых под требования заказчиков.

Кроме того, полученные оценки будут полезны при формировании технического задания на разработку автоматов для новой производственной линии или модернизации существующей.

Предложенные модели будут полезны при формировании цифрового двойника изделия, изготавливаемого в условиях гибкого производства.

Литература

1. Parrott A., Warshaw L. Industry 4.0 and the digital twin technology: Manufacturing meets its match. – 2017. New York: Deloitte University Press.
2. Botín-Sanabria D.M. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review // Remote Sens. – 2022. – N 14. – P. 1335–1359.
3. Kuehner K.J. et al. Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review // Procedia CIRP. – 2021. – Vol. 104. N 11. – P. 1227–1232.
4. Rossmann A., Hertweck D. Digital Twins: A Meta-Review on Their Conceptualization, Application and Reference Architecture // Hawaii International Conference on System Sciences. – 2022. – P. 4518–4527.
5. Grieves M. Intelligent Digital Twins and the Development and Management of Complex Systems // Digital Dwin Electronic Journal. – 2022. – N 5. – P. 1–18.
6. Dozortsev V. et al. Digital twins in industrial process engineering // Proc. SCIFI-IT'21 Conference. Ghent. Belgium. – 2021. – P. 37–42.
7. Wilking F. et al. Digital Twins – Definitions, Classes and Business Scenarios for Different Industry Sectors // In: Proc. International Conference on Engineering Design (ICED21). – 2021. – P. 1293–1302.
8. 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. – N 9. – P. 131306–131321.
9. Shen M. et al. Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges, and Research Opportunities for Operations Research // SSRN Electronic Journal. – 2021. – N 2. – P. 45–51.
10. Tekinerdogan B. On the Notion of Digital Twins: A Modeling Perspective // Systems. – 2022. – Vol. 11. – N 1. – P. 151–160.
11. Wharton M. Are Fair Digital Objects and Digital Twins the same thing? // Research Ideas and Outcomes. – 2022. – N 10. – P. 23–30.

12. *da Silva Mendonça R. et al.* Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges // Processes. – 2022. – N 10. – P. 74–82.
13. *Oakes B.J. et al.* Improving Digital Twin Experience Reports // Proc. of the 9th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. – 2021. – P. 1–12.
14. *Reggelin T. et al.* Introduction to the Minitrack on Simulation Modeling and Digital Twins for Decision Making in the Age of Industry 4.0 // Proc. of the 55th Hawaii International Conference on System Sciences. – 2022. – 1954 p.
15. *Rathore M.M., Shah S.A., Shukla D., Bentafat E., Bakiras S.* The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities // IEEE Access. – 2021. – N 9. – P. 32030–32052.
16. *Möller D.P.F., Vakilzadian H., Hou W.* Intelligent Manufacturing with Digital Twin // IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT), Mt. Pleasant, MI, USA. – 2021. – P. 413–418.
17. *Mylonas G., Kalogeras G., Anagnostopoulos C., Alexakos C., Munoz L.* Digital Twins from Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey // IEEE Access. – 2021. – N 9. – P. 143222–143249.
18. *Hung, M.-H. et al.* A Novel Implementation Framework of Digital Twins for Intelligent Manufacturing Based on Container Technology and Cloud Manufacturing Services // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2022. – P. 1–17.
19. *Söderberg R., Wärmefjord K., Carlson J.S., Lindkvist L.* Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Ann. – 2017. – Vol. 66(1). – P. 137–140.
20. *Серебрянский С.А., Стрелец Д.Ю., Шкурин М.В.* Цифровой двойник в едином информационном пространстве жизненного цикла как инструмент обеспечения конкурентоспособности изделия авиационной техники // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 20–26.
21. *Кораблев А.В.* Инновационные тренды технологической подготовки производства в среде цифровых двойников // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 9. – С.12–15.
22. *Кораблев А.В.* Ключевые функциональность и преимущества цифровых двойников // Цифровая экономика. – 2019. – № 2(6). – С. 5–11.
23. *Vachálek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morháč M., Lokšík M.* The Digital Twin of an Industrial Production Line Within the Industry 4.0 Concept // Proc. 21st International Conference on Process Control (PC) – Strbske Pleso, Slovakia. – 2017. – P. 1–5.
24. *Cohen Y., Naseraldin H., Chaudhuri A., Francesco P.* Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand Assembly 4.0 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105. – P. 4037–4054.
25. *Чадаев В.М., Аристова Н.И.* Самовоспроизведение механических автоматов. – М.: СИНТЕГ. 2012. – 309 с.