

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 62-5:658.512

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-16-21

Применение технологической модели детали в условиях единичного и мелкосерийного производства

Д. А. Девятков, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Вопросы автоматизации технологической подготовки производства, особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства, сохраняют высокую актуальность. Современный программный инструмент баз знаний в сочетании с активно развивающимися методами искусственного интеллекта, включая нейронные сети, создает потенциал для формирования и развития полностью автономных автоматизированных систем проектирования. Одной из ключевых задач автоматизации технологической подготовки производства остается автоматизация чтения графических и текстовых данных с 2D-чертежей. В условиях единичного и мелкосерийного производства, где оперативное внедрение новых изделий является критически важным фактором, актуальность использования технологической модели детали (ТМД) возрастает в связи с необходимостью быстрой адаптации технологических процессов. В данной работе ТМД представлено как формализованное описание геометрических, конструктивных и технологических характеристик изделия, адаптированное для работы с 2D-чертежами. Структурированная модель ТМД включает блоки ввода данных, предварительной обработки, формирования иерархической структуры, интеграции с технологическими данными, анализа и оптимизации, а также вывода результатов. Использование исключительно 2D-чертежей позволяет минимизировать временные затраты на внедрение новых изделий, обеспечивая точность и адаптивность к специфическим требованиям.

В настоящей работе предложен подход к автоматизации технологической подготовки производства на основе ТМД и графового метода поиска конструктивных элементов, демонстрирующий значительный потенциал для повышения эффективности производства. Разработанная программная система, интегрирующая графовый анализ с технологиями оптического распознавания символов, успешно реализует распознавание элементов, таких как центральное отверстие детали типа «Кольцо», и формирует структурированные параметры, готовые для интеграции в системы автоматизированного управления производством.

Ключевые слова: автоматизация производства, единичное и мелкосерийное производство, 2D-чертежи, графовый метод, машинное обучение, оптимизация процессов, распознавание конструктивных элементов.

Введение

В условиях современного промышленного производства [1, 2], характеризующегося высокой степенью вариативности и сокращением жизненных циклов изделий [3], автоматизация технологической подготовки приобретает первостепенное значение, особенно для единичного и мелкосерийного производства. Традиционные методы, основанные на ручном анализе 2D-чертежей [4–6] и составлении технологических маршрутов, сталкиваются с ограничениями, связанными с временными затратами и возможностью человеческого фактора, что приводит к снижению эффективности и увеличению вероятности ошибок. Развитие технологий компьютерного зрения, графовых алгоритмов [7] и систем автоматизированного управления производством открывает новые перспективы для создания адаптивных решений, способных оперативно реагировать на изменяющиеся требования рынка.

Целью исследования является разработка и анализ программной системы, интегрирующей технологическую модель детали с графовым методом поиска конструктивных элементов на основе 2D-чертежей, для автоматизации технологической подготовки производства. Задачи включают формализацию структуры ТМД, реализацию алгоритмов распознавания элементов с использованием атрибутивного графа смежности и OCR-технологий.

Технологическая модель детали в автоматизации производства

ТМД представляет собой формализованное представление геометрических, конструктивных и технологических характеристик изделия, оптимизированное для применения в условиях единичного и мелкосерийного производства [8, 9]. При использовании исключительно 2D-чертежей ТМД формируется на основе векторных данных, включающих контуры, размеры, допуски и текстовые аннотации [10, 11]. Указанные данные трансформируются в структурированную модель, состоящую из блоков, обеспечивающих автоматизацию процессов анализа чертежей, идентификации базовых поверхностей, определения последовательности технологических операций и оценки трудоемкости.

Данный подход значительно ускоряет процесс внедрения новых изделий в производство, тем самым минимизирует временные затраты на технологическую подготовку.

Начальным этапом автоматизации технологической подготовки является извлечение информации из 2D-чертежей. Эти чертежи содержат всю необходимую геометрическую и технологическую информацию для формирования ТМД. Блок ввода данных (рис. 1) обеспечивает импорт и первичную обработку этой информации, создавая основу для последующего анализа и структурирования.

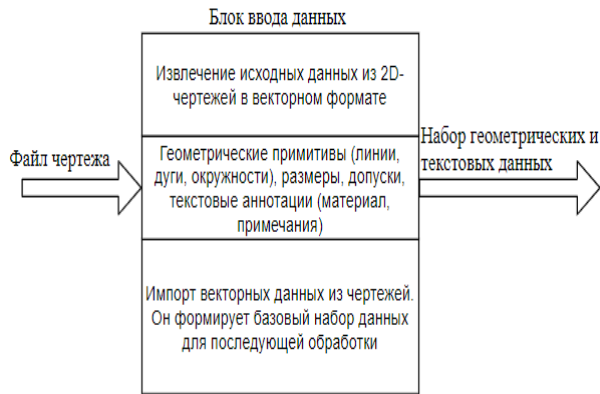


Рис. 1. Блок ввода данных

Fig. 1. Data entry block

После извлечения исходной информации из 2D-чертежей возникает необходимость ее систематизации и подготовки для формирования ТМД. Этот этап необходим для обеспечения корректности последующего анализа, поскольку 2D-чертежи содержат разнородные данные, требующие унификации. Блок предварительной обработки (рис. 2) данных выполняет задачу структурирования и классификации геометрических и текстовых элементов, создавая основу для построения иерархической модели ТМД в условиях единичного и мелкосерийного производства.

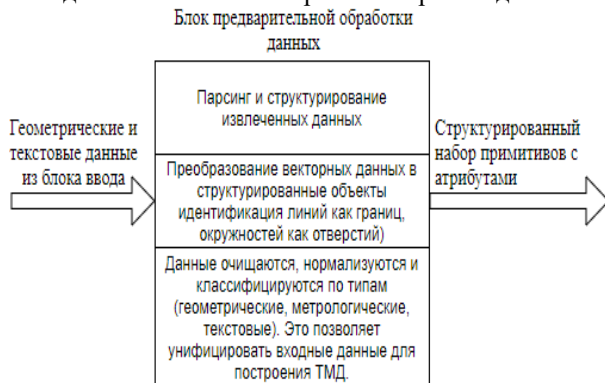


Рис. 2. Блок предварительной обработки данных

Fig. 2. Data preprocessing unit

В процессе автоматизации технологической подготовки производства появляется необходимость в структурирование данных, извлеченных из 2D-чертежей.

После предварительной обработки векторных данных, включающих геометрические элементы (прямые отрезки, дуги, окружности и т. д.) и связанные с ними неграфические характеристики (координаты, размеры и допуски), требуется их структурирование в иерархическую модель, обеспечивающую преобразование разрозненных данных в конструктивные единицы, пригодные для технологического анализа.

Блок формирования иерархической структуры ТМД (рис. 3) выполняет эту задачу, агрегируя данные в логически связанные элементы, что служит основой для последующей интеграции с технологическими параметрами.

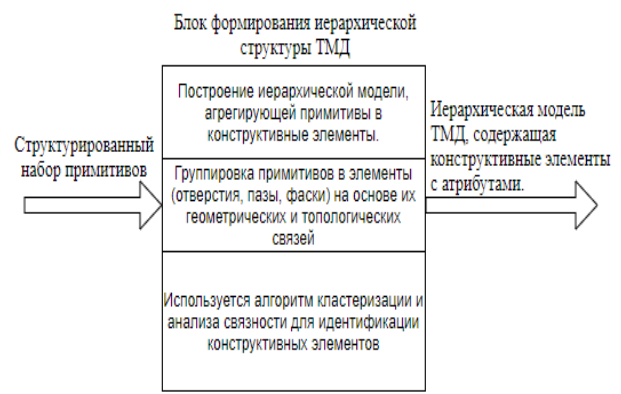


Рис. 3. Блок формирования иерархической структуры ТМД

Fig. 3. The block of forming the hierarchical structure of the TMD

После формирования иерархической структуры необходимо дополнить ее технологическими характеристиками для обеспечения полноценной подготовки производственного процесса. Этот этап связывает геометрические и конструктивные элементы с параметрами оборудования и технологическими нормативами, что позволяет адаптировать ТМД к специфике единичного и мелкосерийного производства. Блок интеграции с технологическими данными (рис. 4) выполняет функцию обогащения модели, обеспечивая ее совместимость с системами автоматизированного управления производством (АСУП).

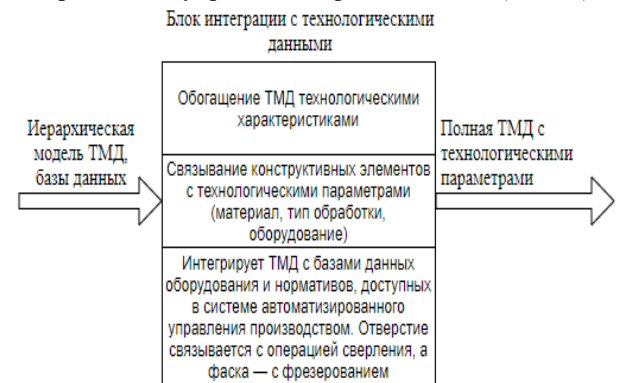


Рис. 4. Блок интеграции с технологическими данными

Fig. 4. The block of integration with technological data

После обогащения ТМД технологическими характеристиками возникает необходимость в автоматизированном анализе и оптимизации производственных процессов для минимизации затрат времени и ресурсов в условиях единичного и мелкосерийного производства. Этот этап обеспечивает формирование эффективных технологических маршрутов на основе данных ТМД и доступных производственных возможностей.

Блок анализа и оптимизации (рис. 5) выполняет задачу определения оптимальных последовательностей операций и выбора оборудования, повышая эффективность подготовки производства.

После анализа и оптимизации ТМД завершающим этапом является формирование выходной документации, необходимой для реализации производственного процесса в условиях единичного и мелкосерийного производства. Этот этап обеспечивает представление результатов в удобной и структурированной форме, пригодной для использования технологами и операторами. Блок вывода результатов (рис. 6) выполняет задачу генерации технологической документации, завершая цикл автоматизированной подготовки производства.

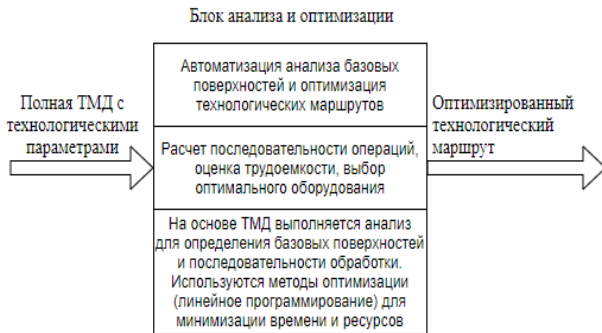


Рис. 5. Блок анализа и оптимизации

Fig. 5. The block of analysis and optimization

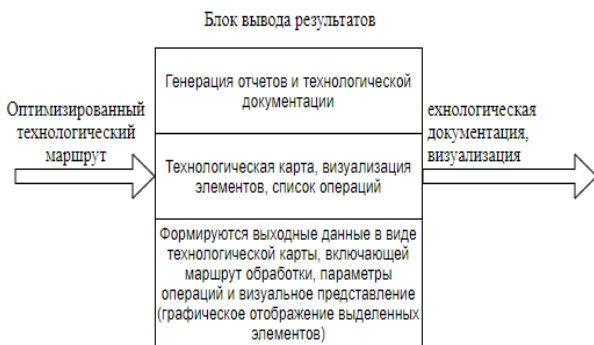


Рис. 6. Блок вывода результатов

Fig. 6. The output block of the results

Формирование ТМД на основе блоков структурированной модели обеспечивает комплексное представление 2D-чертежей в виде иерархической системы данных, готовой для дальнейшего анализа. Однако для эффективного распознавания конструктивных элементов, таких как отверстия, пазы или фаски, требуется специализированный подход, позволяющий учитывать топологические связи между геометрическими примитивами. Здесь необходимо применить графовый метод, который использует данные из блока формирования иерархической структуры ТМД как исходную базу для построения атрибутивного графа смежности. Этот метод позволяет перейти от статической модели данных к динамическому поиску и обеспечивает автоматизированное выявление элементов, интегрируя геометрические атрибуты с алгоритмами графового анализа, что особенно акту-

ально для ускорения технологической подготовки в единичном и мелкосерийном производстве.

Графовый метод поиска элемента на детали

В рамках исследования автоматизации технологической подготовки производства на основе 2D-чертежей [12] предложен графовый метод (рис. 7), визуализированный в виде атрибутивного графа смежности для поиска отверстий (рис. 8). Данный граф моделирует процесс распознавания конструктивных элементов и отражает последовательность операций, включающих анализ геометрических данных, оптическое распознавание символов и топологическую проверку. Метод распознавания адаптирован для идентификации только отверстий в связи с тем, что аппроксимация окружностей и топологическая проверка в ААГ эффективны для замкнутых контуров, снижая вычислительные затраты и ускоряя анализ на 40–60 %, что оправдывает фокус на отверстиях для интеграции с ТМД. Применение оптического распознавания символов также позволяет извлекать геометрические допуски, что обеспечивает точную параметризацию конструктивных элементов и их соответствие технологическим требованиям.

Граф состоит из множества вершин, соответствующих ключевым этапам обработки, и ребер, обозначающих логические переходы между ними, что обеспечивает формализованное представление алгоритма поиска.

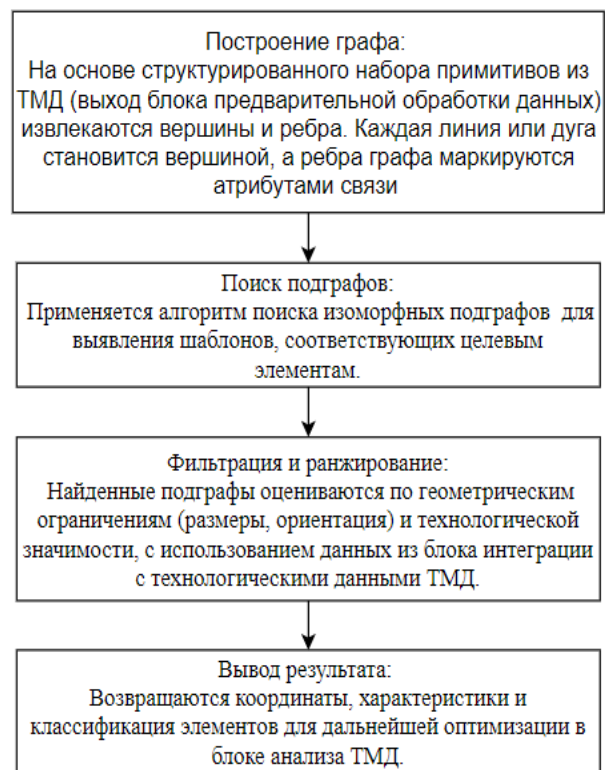


Рис. 7. Графовый метод

Fig. 7. Graph method



Рис. 8. Граф смежности распознавания отверстий

Fig. 8. The adjacency graph of hole recognition

Граф демонстрирует гибкость и устойчивость к ошибкам, интегрируя методы машинного зрения [13, 14] и геометрической классификации. Аппроксимация кривых («Аппроксимация окружности/дуг») и упрощение топологии («Упрощение») минимизируют вычислительные затраты, тогда как «Обнаружение кандидатов (корректоры)» предполагает предварительный отбор потенциальных элементов. Данный подход позволяет сократить время анализа конструктивных элементов на 2D-чертежах на 40–60 % по сравнению с традиционными методами, что особенно актуально для единичного и мелкосерийного производства. Таким образом, граф представляет собой формализованную основу для автоматизации распознавания элементов, интегрирующую геометрические и текстовые атрибуты 2D-чертежей.

Предложенный графовый метод поиска элементов на 2D-чертежах обеспечивает эффективное распознавание конструктивных особенностей, таких как отверстия, за счет анализа топологических и геометрических связей. Однако для практической реализации в условиях единичного и мелкосерийного производства требуется интеграция этого метода в программную систему [15], способную обрабатывать отсканированные или цифровые изображения чертежей.

Рабочая программа для анализа 2D-чертежа детали

Разработанная программная система и алгоритм ее работы (рис. 9), предназначенные для автоматизированного анализа 2D-чертежей деталей в условиях единичного и мелкосерийного производства, представлены на рис. 10. Программа реализует интегрированный подход к обработке векторных данных, извлеченных из чертежей. Интерфейс программы организован в виде окна с разделами «Признаки», «Заготовка», «Маршрут», «Параметры» и «Проверка технолога», что обеспечивает интуитивно понятное управление и структурированный вывод результатов. На примере детали типа «Кольцо» программа демонстрирует возможность выделения центрального отверстия и формирования технологических парамет-

ров, готовых для интеграции в систему автоматизированного управления производством (АСУП).



Рис. 9. Алгоритм работы программы

Fig. 9. The algorithm of the program

Для детали «Кольцо» программа успешно распознает центральное сквозное отверстие ($\varnothing 162$ мм) и резьбовое отверстие (M16). Выделенные элементы аннотируются на изображении, а параметры экспортируются в структурированный формат, готовый для интеграции в ТМД и последующего планирования маршрута обработки. Данный подход сокращает время технологической подготовки производства деталей на 30 % по сравнению с ручными методами, обеспечивая высокую точность и адаптивность к изменяющимся требованиям производства.

2. Rupinets I.S. [Automation of Process Flow Control in Small-Batch and Single-Item Mechanical Engineering Production]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*. 2021. No. 35. Pp. 756-764 (in Russ.).
3. Malkina I.V. Automation of Quality Control of Geometric Parameters of Parts in Mechanical Engineering // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2022. Vol. 24, no. 3. Pp. 34-41. DOI 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41 (in Russ.).
4. Gatavlin E.G., Usmanov U.K. Innovations in mechanical engineering technology: modern approaches to automation of production processes // *Professional'nye kommunikacii v nauchnoj srede – faktor obespecheniya kachestva issledovanij*. St. Petersburg: Scientia, 2024. Pp. 761-764 (in Russ.).
5. Khan, M. T., et al. (2025). From Drawings to Decisions: A Hybrid Vision-Language Framework for Parsing 2D Engineering Drawings into Structured Manufacturing Knowledge.
6. Papadakis, K., Stavropoulos, P., Mourtzis, D. (2022). Knowledge-based manufacturability assessment for optimization of additive manufacturing processes based on automated feature recognition from CAD models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(5–6), 1567–1583.
7. Devyatov D.A., Koroleva M.R., Lyalin M.S. et al. [Application of methods of system analysis and machine learning to automate reading of drawings]. *Proceedings of MAI*. 2025. No. 142 (in Russ.).
8. Wang, Y., Li, X., Zhang, J. (2024). Adaptive recognition of machining features in sheet metal parts based on a graph class-incremental learning strategy. *Scientific Reports*, 14, Article 61443.
9. Lin, Y.-H., Ting, Y., Huang, Y., Cheng, K., & Jong, W. (2023). Automatic Recognition of 2D Engineering Drawings. *Encyclopedia*, 3(4), 1456–1472.
10. Haar, C., Kim, H., Koberg, L. (2022). AI-based engineering and production drawing information extraction. *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-Data-Technology Nexus*. Editors: K.-Y. Kim, L. Monplaisir, J. [Chapter in proceedings]. *Frontiers in Manufacturing Technology*.
11. Shuhui Ding, ZhongyuanGuo, Bin Wang, Haixia Wang, Fai Ma. MBD Based Machining Feature Recognition and Process. *Machines* 2022, 10(10), 906, 2022.
12. Karmishin A.A., Makarov V.M., Morokhin P.N. [Digital preparation of production in mechanical engineering]. *RITM mashinostroeniya*. 2022. No. 2. Pp. 12-18 (in Russ.).
13. Gnezdilova V.A. [Analysis of machine learning methods for matching multilingual knowledge graphs]. *MNSK-2021*. Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University, 2021. P. 83 (in Russ.).
14. Lygin V.S., Sirota A.A., Golovinsky P.A. [Regularization of the training process of graph neural networks by the label propagation method]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii*. 2024. No. 3. Pp. 92-101 (in Russ.).
15. Khan M. T., et al. (2024). Automatic Feature Recognition and Dimensional Attributes Extraction From CAD Models for Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing.

* * *

Applications of the Part Process Model in Single and Small-Batch Production

D. A. Devyatov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The issues of pre-production engineering automation, especially in single and small-batch production, remain highly relevant. Modern knowledgebase software tools combined with actively developing artificial intelligence methods, including neural networks, creates the potential for the formation and development of fully autonomous automated design systems. Automatic reading graphic and text data from 2D drawings remains one of the key tasks of pre-production engineering automation. For single and small-batch production rapid introduction of new products is a critical factor, the relevance of using the technological model of a part (TMP) increases due to the need for rapid technological process adaptation. In this paper, TMP is presented as a formalized description of the geometric, structural, and technological characteristics of a product adapted to work with 2D drawings. The structured TMP includes blocks for data input, preprocessing, hierarchical structure formation, integration with technological data, analysis and optimization, as well as output of results. Using exclusively 2D drawings minimizes the time required to introduce new products, providing accuracy and adaptability to specific requirements.

The paper proposes the approach to pre-production engineering automation based on TMP and the graph method of searching for structural elements, demonstrating significant potential for improving production efficiency. The developed software system integrating graph analysis with optical character recognition technologies, successfully recognizes elements such as the central hole of a ring-type part and generates structured parameters ready for integration into automated production management systems.

Keywords: automation of production, single and small-batch production, 2D drawings, graph method, machine learning, process optimization, recognition of structural elements.

Получено: 03.10.25

Образец цитирования

Девятков Д. А. Применение технологической модели детали в условиях единичного и мелкосерийного производства // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2025. Т. 23, № 4. С. 16–21. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-16-21.

For Citation

Devyatov D.A. [Applications of the part process model in single and small-batch production]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 16-21 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-4-16-21.