

## ***Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования***

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.51

doi: 10.30987/2658-6436-2026-2-4-9

### **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Олег Олегович Данцев**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

dantsev.o.o@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0004-0751-2196>

**Аннотация.** В статье показаны задачи автоматизации процессов производства изделий микроэлектроники. Приведена архитектура системы управления производством и проанализирована типовая технология производства изделий микроэлектроники. Представлен алгоритм обработки партий полупроводниковых пластин при выполнении производственной деятельности операторами в ручном режиме. Разработана диаграмма потоков сообщений между четырьмя компонентами системы управления производством. Синтезирована функциональная модель IDEF0 управления оборудованием, состоящая из семи блоков, механизмами в модели являются диспетчер оборудования и контроллер связи, выходными сигналами рецепт, технологические параметры и журнал предупреждений и ошибок. Результаты, полученные в этой статье, в дальнейших исследованиях должны послужить основой создания модели сети Петри для проверки корректности и оценки производительности и загрузки основного оборудования, входящего в цикл серийного производства изделий микроэлектроники.

**Ключевые слова:** система управления производством, IDEF0, диаграмма потоков сообщений, сеть Петри, диспетчер оборудования.

**Для цитирования:** Данцев О.О. Функциональная модель управления оборудованием для производства изделий микроэлектроники // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №2 (32). С. 4-9. doi: 10.30987/2658-6436-2026-2-4-9.

Original article

Open Access Article

### **FUNCTIONAL MODEL OF EQUIPMENT CONTROL FOR MICROELECTRONICS MANUFACTURING**

**Oleg O. Dantsev**

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

dantsev.o.o@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0004-0751-2196>

**Abstract.** The article discusses the tasks of automating production processes in microelectronics manufacturing. It presents the architecture for a production control system for microelectronics products; analyses the standard manufacturing technology for such products. The paper describes an algorithm for processing batches of semiconductor wafers during manual production operations performed by operators; develops a message flow diagram between the four components of the production control system; synthesizes a functional IDEF0 model for equipment control consisting of seven blocks. The mechanisms within the model include the equipment dispatcher and the communication controller, while the output signals are the recipe, technological parameters, and the warning and error log. The results obtained in this article should serve as a basis for further research aimed at creating a Petri Net model to verify correctness and

assess the performance and workload of the key equipment involved in the serial production cycle of microelectronics products.

**Keywords:** production control system, IDEF0, message flow diagram, Petri Net, equipment dispatcher.

**For citation:** Dantsev O.O. Functional Model of Equipment Control for Microelectronics Manufacturing. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 2 (32). pp. 4-9. doi: 10.30987/2658-6436-2026-2-4-9.

## Введение

Актуальность автоматизации процессов производства изделий микроэлектроники очевидна, и первым этапом при решении этой задачи является организация автоматической связи и интеграции между управляющим компьютером и производственным оборудованием, создание надежной инфраструктуры связи между оборудованием.

В настоящее время на производстве изделий микроэлектроники большая часть оборудования не имеет связи или не интегрирована с системой управления производственными процессами, из-за чего возникают отдельные участки или группы оборудования с различной степенью автоматизации или без нее. В результате невозможно контролировать состояние каждой установки в режиме реального времени, автоматически собирать и анализировать технологические данные и параметры, а также в электронном и автоматическом режиме загружать, скачивать и управлять рецептами.

Для реализации указанных задач автоматизации необходима разработка системы управления и диспетчеризации оборудования, которая должна выполнять следующие функции: автоматическое взаимодействие с различными типами оборудования; одновременный мониторинг нескольких установок технологического процесса; автономная работа; интеграция с системой управления производственными процессами. По сути, диспетчер оборудования является каналом связи между компонентами системы управления производственными процессами и самим оборудованием.

Таким образом, опираясь на современные технологии для выполнения требований к системе автоматизации, следует внедрить интегрируемую систему управления производственными процессами, построенную на основе распределенного объектно-ориентированного подхода [1]. Как показано на рис. 1, эта система состоит из четырех компонентов: системный администратор, планировщик, диспетчер оборудования и база данных. Для связи диспетчера оборудования с оборудованием чаще всего используются промышленные протоколы связи стандарта SECS-I (SEMI E4) и SECS-II (SEMI E5) [2].

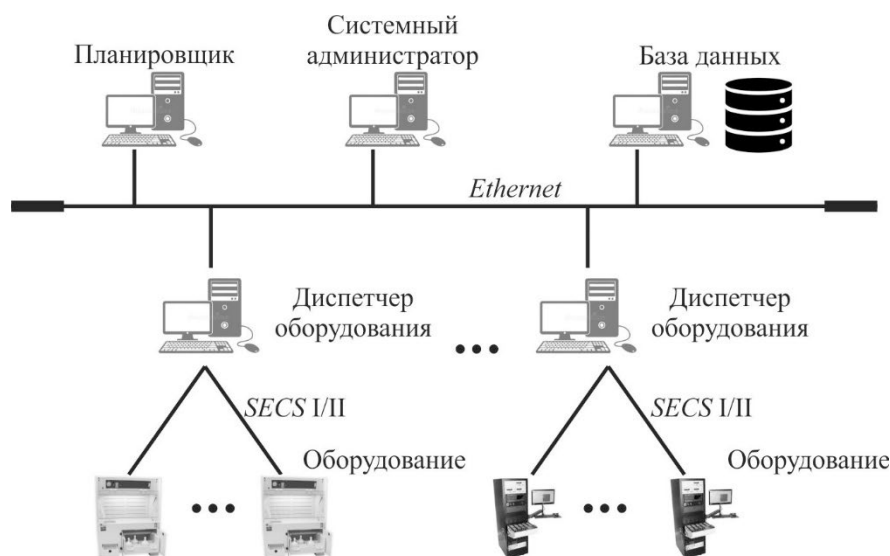


Рис. 1. Архитектура системы управления производством изделий микроэлектроники

Fig. 1. Architecture of semiconductor manufacturing execution system

### Алгоритм управления оборудованием операторами

Производство полупроводниковых изделий микроэлектроники – это комплексный многоэтапный процесс, необходимый для создания интегральных схем и других полупроводниковых приборов. Процессы, связанные с изготовлением изделий микроэлектроники, должны выполняться в строго определенном порядке. В таком производстве выделяют три отдельных этапа: подготовка полупроводниковой пластины; операции изготовления полупроводниковых, диэлектрических структур на пластине и металлизации; финишные операции. На рис. 2 показаны отдельные этапы, из которых состоит непосредственное производство изделий микроэлектроники.

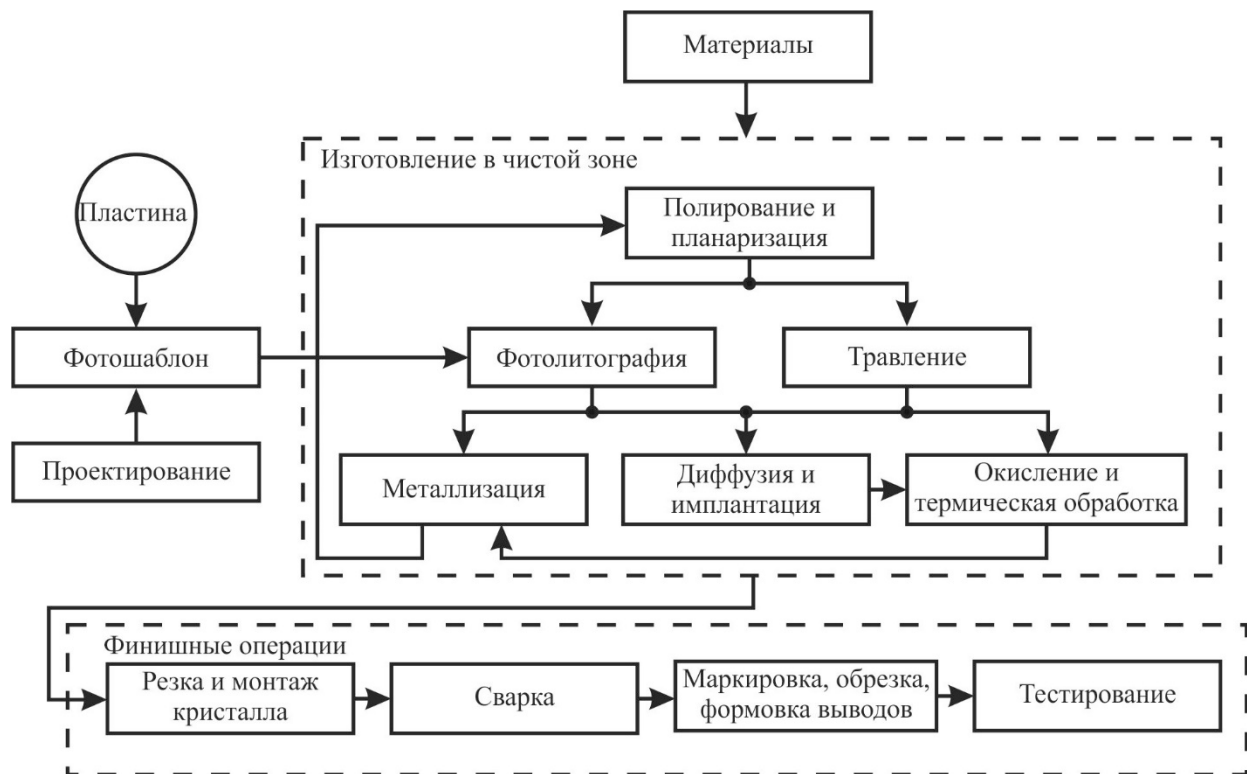


Рис. 2. Технология производства изделий микроэлектроники

Fig. 2. Semiconductor manufacturing technology

Чтобы лучше оценить преимущества, которые дает диспетчер оборудования в составе автоматизированной системы управления производством, сначала рассмотрим, как выглядит алгоритм обработки партий пластин, когда производственная деятельность выполняется операторами-людьми.

Обычно в обязанности оператора входит распределение партий изделий для их обработки на оборудовании, находящемся под его контролем. При обработке партии необходимо выполнить следующие шаги.

Оператор должен проверить, освободилось ли какое-либо оборудование.

Когда оборудование свободно, оператор должен определить, какие ожидающие партии могут быть обработаны на простаивающем и готовом к работе оборудовании.

Из ожидающих партий оператор должен выбрать те, которые будут сформированы в производственную группу для одновременной загрузки в обрабатывающий модуль оборудования, готового к работе в данный момент.

После этого оператор переносит партии к оборудованию и регистрирует операцию загрузки, подтверждая, что партии находятся в установке и готовы к обработке.

Оператор также проверяет технологический рецепт, выбранный на оборудовании для только что загруженных партий, и затем запускает выполнение этого рецепта.

Во время технологического процесса оператор обязан следить за оборудованием на случай возникновения сбойных ситуаций. В случае их появления принимаются меры по обработке ошибок, которые включают: прерывание, продолжение или остановку процесса.

Если обработка партий завершилась успешно, оборудование обычно выдает технологические данные, связанные с использованным рецептом, условиями процесса и т. п. на момент завершения работы. При наличии системы учета оператора обычно просят записать эти технологические данные в систему учета.

Оператор также отмечает что обработка партии на текущем этапе завершена, и он готов к следующему шагу технологического процесса. В зависимости от качества выполнения процесса, оператор затем возвращает партию технологический цикл для проведения следующего этапа.

При реализации автоматизации технологического процесса производства можно выделить три режима: онлайн-режим оборудования (режим мониторинга или режим дистанционного управления) [3,4]; полуавтоматический режим (автоматическая транспортировка партии) [5,6]; полностью автоматический режим, включающий автоматическое оперативное и календарное планирование [7,8] и диспетчеризацию.

Предлагаемый в данной статье диспетчер оборудования обеспечивает реализацию онлайн-режим оборудования.

### Синтез диспетчера оборудования и модели управления оборудованием

На рис. 3 предложена диаграмма потоков сообщений между четырьмя компонентами системы управления производством (рис. 1).

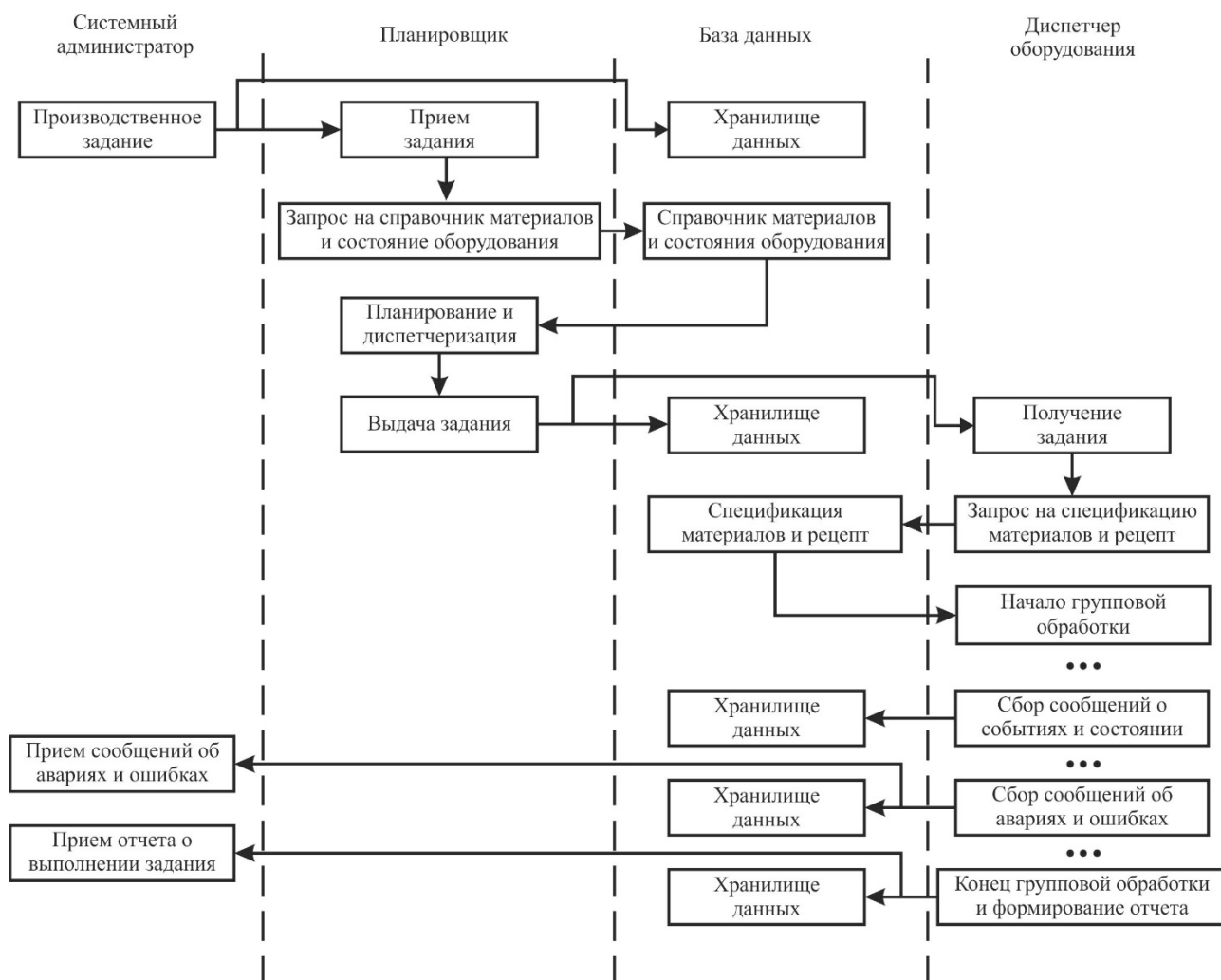


Рис. 3. Диаграмма потоков сообщений системы управления производством

Fig. 3. Message flow diagram of manufacturing execution system

Исходя из алгоритма управления оборудованием, приведенного в предыдущем разделе, функции диспетчера оборудования можно разбить на семь функциональных задач (блоков), которые представлены на рис. 4 в виде функциональной модели IDEF0 [9]. Входными сигналами для модели являются установочные данные (*I1*) и маршрутная карта технологического процесса (*I2*), выходными – рецепт (*O1*), технологические параметры (*O2*) и журнал предупреждений и ошибок (*O3*), в качестве единственного ограничения *C1* выступает максимальная производительность, механизмами *M1* и *M2* являются диспетчер оборудования и контроллер связи, соответственно

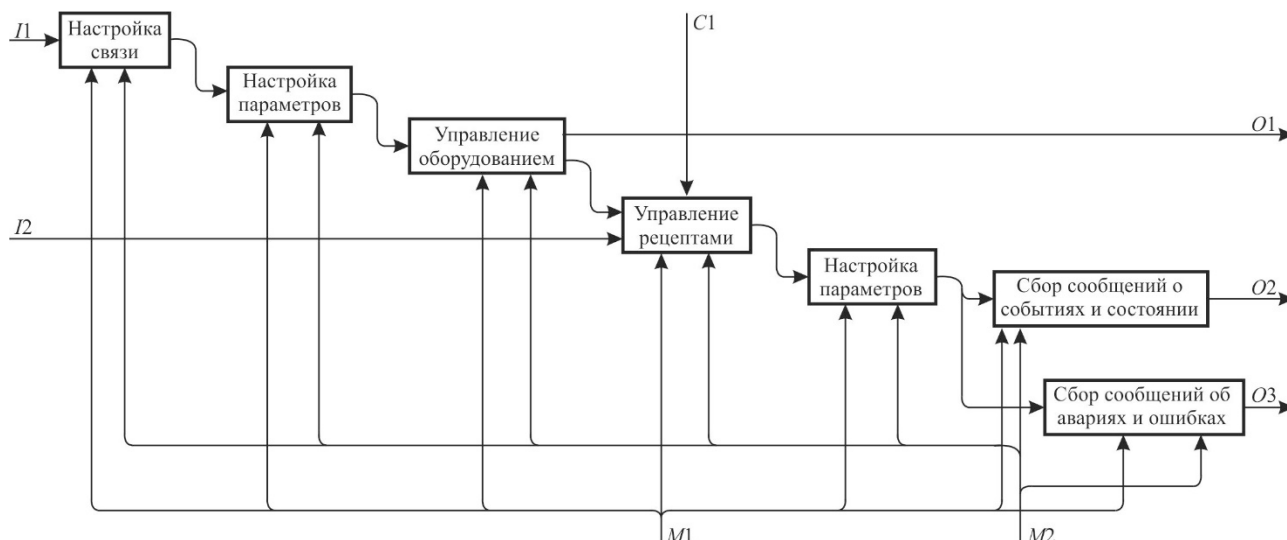


Рис. 4. Функциональная модель IDEF0 управления оборудованием

Fig. 4. IDEF0 model of equipment management

Отметим, что на этой схеме имеется два блока «Настройка параметров». Первая настройка параметров предназначена для пробного (пилотного) запуска, а вторая – для точной настройки после пробного запуска. Вышеуказанные семь функций при необходимости могут быть детализированы на еще более мелкие операции с учетом особенностей конкретного оборудования или технологического процесса.

### Заключение

Предложена методология моделирования и анализа управления оборудованием для автоматизированной системы управления производством изделий микроэлектроники. Разработана диаграмма потоков сообщений системы управления таким производством. Управление оборудованием представлено функциональной моделью IDEF0, одним из механизмов которой является диспетчер оборудования. На основе этой модели в дальнейших исследованиях целесообразно создание модели сети Петри для проверки корректности и оценки производительности. Помимо диспетчера оборудования, все остальные компоненты системы управления производством изделий микроэлектроники также могут быть разработаны с использованием того же подхода. Таким образом, каждую отдельную модель можно интегрировать в полную сетевую модель системы управления производством.

С использованием полной модели можно проводить анализ производительности и загруженности оборудования. Заключительным шагом разработки системы является внедрение разработанного диспетчера оборудования для управления оборудованием. Данная реализация может быть выполнена с использованием объектно-ориентированного подхода.

### Список источников:

1. D. Scott, "Comparative advantage through manufacturing execution system," in The SEMICON Taiwan 96 IC Seminar, 1996, pp. 227–236.

### References:

1. Scott D. Comparative Advantage Through Manufacturing Execution System. In: Proceedings of the SEMICON Taiwan 96 IC Seminar; 1996. p. 227-236.

2. M. Zhu, X. Peng, Y. Sun, S. Fuyang and D. Jiao, "Simulation study of semiconductor communication protocol SECS/GEM," 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid, Hangzhou, China, 2021, pp. 148-152, doi: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00037.

3. Куликов И.Н., Шубников А.В. Объединенный (интегрированный) онлайн контроль полуфабриката и процесса его производства в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2015. № 9. С.43-47.

4. Sheng-Luen Chung and MuDer Jeng, "An overview of semiconductor fab automation systems," 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 1050-1055 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.2003.1241731.

5. Da-Yin Liao, MuDer Jeng and M. Zhou, "Petri net modeling and lagrangian relaxation approach to vehicle scheduling in 300mm semiconductor manufacturing," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 5301-5306, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1302559.

6. K. H. Tantawi, I. Fidan, Y. Musa and A. Tantawy, "Smart Manufacturing: Post-Pandemic and Future Trends," in Applied AI and Multimedia Technologies for Smart Manufacturing and CPS Applications, IGI Global, 2023, pp. 278-300.

7. Четвергов В.А., Волков М.В., Зинец Н.С. Анализ современных концепций планирования для машиностроительных предприятий и их применимость для этапа освоения новых продуктов // Русский инженер. – 2020. – №03(68). – с. 39-41.

8. Шутиков, М. А. Влияние показателя общей эффективности оборудования на контроль деталей после особо ответственной технологической операции с дальнейшим планированием производственного расписания на предприятиях мелкосерийного типа производства / М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 1(64). – С. 22-25.

9. G. Manenti, M. Ebrahimi-arjestan, L. Yang and M. Yu, "Functional Modelling and IDEF0 to Enhance and Support Process Tailoring in Systems Engineering," 2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE), Edinburgh, UK, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/ISSE46696.2019.8984539.

2. Zhu M, Peng X, Sun Y, et al. Simulation Study of Semiconductor Communication Protocol SECS/GEM. In: Proceedings of the 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid; 2021. p. 148-152. doi: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00037.

3. Kulikov IN, Shubnikov AV. Integrated Online Control of the Semi-Finished Product and Its Manufacturing Process in Semiconductor Production. NanoEngineering. 2015;(9):43-47.

4. Chung SL, Jeng M. An Overview of Semiconductor Fab Automation Systems. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003; vol. 1. p. 1050-1055. doi: 10.1109/ROBOT.2003.1241731.

5. Liao DY, Jeng M, Zhou M. Petri Net Modelling and Lagrangian Relaxation Approach to Vehicle Scheduling in 300 mm Semiconductor Manufacturing. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA '04; 2004; vol. 2004, No. 5. p. 5301-5306. doi:10.1109/ROBOT.2004.1302559.

6. Tantawi KH, Fidan I, Musa Y, et al. Smart Manufacturing: Post-Pandemic and Future Trends. In: Oyekanlu E, editor. Applied AI and Multimedia Technologies for Smart Manufacturing and CPS Applications. IGI Global; 2023. p. 278-300.

7. Chetvergova V.A., Volkov M.V., Zinets N.S. Analysis of Modern Planning Concepts for Machine-Building Enterprises and Their Applicability to the Stage of Development of New Products. Russian Engineer. 2020;03(68):39-41.

8. Shutikov M.A., Feofanov A.N. The Influence of the Indicator of the Overall Efficiency of Equipment on the Control of Parts After a Special Responsible Technological Operation with Further Planning of the Production Schedule at Small-Scale Enterprises. Vestnik MSTU "Stankin". 2023;1(64):22-25.

9. Manenti G, Ebrahimi-arjestan M, Yang L, et al. Functional Modelling and IDEF0 to Enhance and Support Process Tailoring in Systems Engineering. In: Proceedings of the 2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE); 2019. p. 1-8. doi:10.1109/ISSE46696.2019.8984539.

#### **Информация об авторах:**

**Данцев Олег Олегович**

аспирант Брянского государственного технического университета

#### **Information about the authors:**

**Dantsev Oleg Olegovich**

Postgraduate Student of Bryansk State Technical University.

**Статья поступила в редакцию 03.05.2026; одобрена после рецензирования 19.05.2026; принята к публикации 22.05.2026.**

**The article was submitted 03.05.2026; approved after reviewing 19.05.2026; accepted for publication 22.05.2026.**