

**РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ**

Научная статья

УДК 658.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185643>

EDN: <https://www.elibrary.ru/LXMWDY>

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ МАССОВОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Евгения Анатольевна Лийн¹✉, Екатерина Викторовна Борисова²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Москва, Россия

¹elijn@bk.ru✉

²borisovaev@mai.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы использования элементов системы массового обслуживания (СМО) в математическом моделировании производственных процессов. Представлен метод имитационного моделирования, направленный на анализ загрузки производственного оборудования, выявление узких мест и оптимизацию потоков материалов. Разработан подход, основанный на введении суперэлементов, позволяющий адаптировать модель к изменяющимся условиям производства. Осуществлено моделирование на примере процессов изготовления печатных плат, как одного из важных технологических этапов производства авиационной и ракетно-космической техники. Проведён анализ

влияния ключевых параметров системы на производственную эффективность. Полученные результаты могут быть использованы для цифровизации и оптимизации производственных процессов в высокотехнологичных отраслях.

Ключевые слова: имитационное моделирование, оценка эффективности производства, система массового обслуживания, диаграмма состояний, цифровая трансформация

Для цитирования: Лийн Е.А., Борисова Е.В. Применение элементов системы массового обслуживания в задачах математического моделирования производственных процессов // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185643>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

APPLICATION OF QUEUEING SYSTEM ELEMENTS IN MATHEMATICAL MODELING OF PRODUCTION PROCESSES

Evgeniya A. Lijn^{1✉}, Ekaterina V. Borisova²

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russia

¹elijn@bk.ru ✉

²borisovaev@mai.ru

Abstract. The article explores the application of queueing system (QS) elements in mathematical modeling of production processes. Simulation modeling is used to analyze the load of production equipment, identify bottlenecks, and optimize material flows. Within the

research, a model is presented, the behavior of which is described by a developed state diagram, and the introduction of superelements for its description is also considered. The developed model will simplify the process of hardware modernization of production while minimizing downtime. Additionally, the introduction of QS parameters into the system is described, along with an analysis of efficiency using the example of printed circuit board production. The results obtained can be used for the digitalization and optimization of production systems.

The transition to the Industry 4.0 concept is accompanied by the digitalization and automation of production processes. To improve the efficiency of such processes, simulation modeling is widely used, allowing the prediction of equipment load, identification of bottlenecks, and development of optimization strategies. However, traditional modeling methods do not always account for the variability of system parameters. The article proposes the use of QS as a tool for analyzing and optimizing production processes.

The study uses simulation modeling methods to investigate the behavior of the production system under different load parameters. The operation of production positions is described by a finite state machine with defined states and transitions. The approach based on superelements is also considered, which allows treating positions individually by isolating them from the general node, increasing the flexibility of the model. The analysis takes into account the time parameters of processing and the transfer of semi-finished products between positions.

Modeling of printed circuit board production processes showed that the use of QS elements allows for a more accurate analysis of equipment load and identification of bottlenecks. The introduced superelements provide the ability to adapt models to changing

conditions. The analysis showed that the use of QS allows for analyzing downtime, throughput, and optimizing resource allocation based on the results. Optimization options include increasing equipment capacity and parallel aggregation of production positions.

The application of simulation modeling methods with the use of QS elements improves the accuracy of analysis and the efficiency of managing production processes. The introduction of superelements facilitates the creation of universal models applicable in different conditions. The results obtained can be used for the digitalization of industrial enterprises and the development of adaptive production systems. Further research may focus on expanding the model by incorporating additional factors that influence the production environment.

Keywords: simulation modeling, production efficiency assessment, queueing system, state diagram, digital transformation

For citation: Lijn E.A., Borisova E.V. Application of Queueing System Elements in Mathematical Modeling of Production Processes. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185643>

Введение

С переходом мировой промышленности к концепции Индустрии 4.0 в производственных системах происходят серьёзные изменения, связанные с цифровизацией и автоматизацией процессов. Индустрия 4.0 направлена на создание так называемых «умных» производств, интегрирующих цифровые технологии для повышения гибкости и эффективности [1–4]. Основные задачи такой трансформации включают оптимизацию ресурсов, сокращение времени простоя, повышение качества

продукции и адаптацию к быстро меняющимся условиям рынка. В условиях многономенклатурного мелкосерийного производства эта адаптивность становится критически важной, так как предприятия должны иметь возможность гибкого реагирования при колебаниях спроса оперативно изменять производственные процессы и эффективно управлять затратами [5–7].

Одним из ключевых инструментов для моделирования и анализа сложных производственных систем является имитационное моделирование [8–10]. Этот подход позволяет воспроизводить реальные процессы на уровне цифровых моделей, тестируя различные сценарии и оценивая влияние изменений на производительность и качество, при этом сохраняя возможность исследовать производственные системы не только с детерминированными параметрами, но и в условиях изменяющихся параметров и случайных факторов, что помогает принимать более обоснованные управленческие решения, опираясь на моделирование возможных ситуаций, выявлять потенциальные «узкие места» и разрабатывать стратегии оптимизации. Целью применения имитационного моделирования становится не просто описание системы, но и нахождение оптимальных путей улучшения её производительности в реальных условиях [11, 12].

Исходные данные для введения элементов системы массового обслуживания

В общем виде производство можно представить в виде иерархической системы, где первым уровнем является само производство, которое делится на производственные участки, которые, в свою очередь, делятся на рабочие зоны, а именно — позиции [13].

Работа каждой производственной позиции может быть описана в виде модели конечного автомата состояний, где состояния представляют собой различные виды занятости [14]. Пусть:

- S_i — множество состояний i -й производственной позиции;
- T — такт времени (абстрактная единица измерения времени);
- $P_i(t)$ — состояние позиции i на такте времени t (например, «ожидание материала», «работа», «передача» и т. д.);
- t_i — время переноса полуфабриката между позициями i и $i+1$.

Определим пять состояний, в которых может находиться позиция производственного участка: $S1$ — свободен; $S2$ — ожидает полуфабрикат для начала работы; $S3$ — выполняет технологическую операцию; $S4$ — ожидает выдачу на следующую позицию; $S5$ — перенос полуфабриката на следующую позицию.

На основе принципов работы конечного автомата для описания работы производства построим диаграмму состояний с возможными переходами между описанными состояниями (1), в зависимости от условий, которые в кратком виде можно описать, как (1).

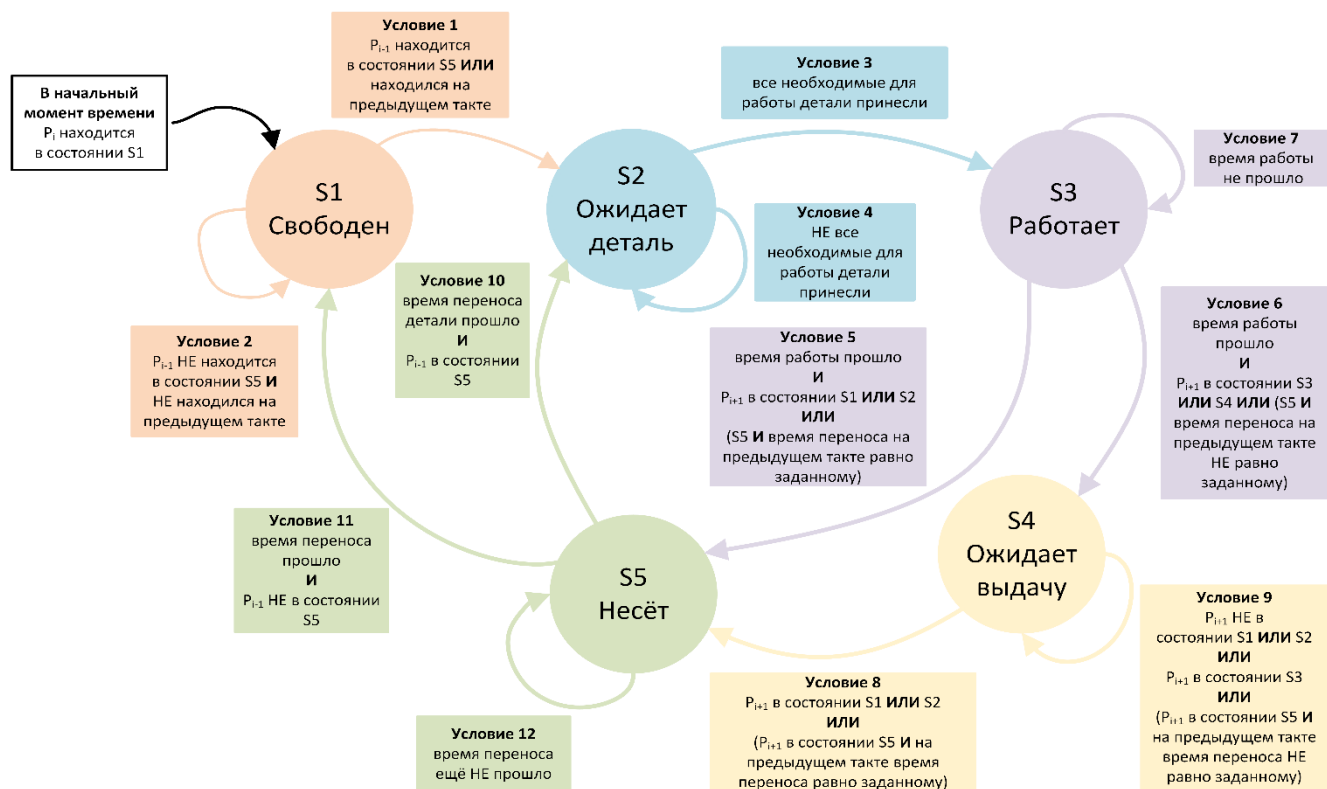


Рисунок 1 — Разработанная диаграмма состояний на основе конечного автомата

$$P_i(t) = \begin{cases} S1, & \text{если отсутствует задача и полуфабрикаты;} \\ S2, & \text{если предыдущая позиция в состоянии } S5; \\ S3, & \text{если все материалы для работы получены;} \\ S4, & \text{если операция завершена, а следующая позиция занята;} \\ S5, & \text{если следующая позиция готова принять полуфабрикат.} \end{cases} \quad (1)$$

Для имитации производственного процесса важно учитывать как время обработки на каждой позиции, так и время переноса полуфабрикатов между позициями:

- Время обработки t_i на позиции i можно рассматривать как фиксированное или случайное (в зависимости от заданных параметров).
- Время переноса полуфабриката t_i между позициями i и $i+1$ также может быть фиксированным или случайным.

При тестировании работы конечного автомата на примере последовательного запуска деталей на производственных позиции, была подтверждена адекватность

работы модели. При этом сохраняется важное ограничение: добавление обратных связей приводит к дополнительному простоям. При проведении моделирования, была выявлена закономерность: в текущем варианте рассмотрения работы производства простой вычисляется как:

$$T_{Pi} = T_{\max} - (t_{i-1} + T_i + t_i), \quad (2)$$

где T_{Pi} — время простоя i -й позиции; $T_{\max}$ — максимальная длительность работы (из всех позиций); T_i — время работы i -й позиции; t_{i-1} — время перехода от предыдущей позиции к текущей; t_i — время перехода от текущей к следующей позиции.

В формуле (2) можно заметить, что в расчёт параметров текущей i -й позиции входят не только её собственные параметры, но и время перехода от предыдущей позиции (t_{i-1}), что приводит к невозможности рассмотрения позиции отдельно от производственного участка.

Описанную проблему возможно решить при помощи исключения из конечного автомата состояния $S2$ (ожидает деталь), на основе чего получаем:

$$T_{Pi} = T_{\max} - (T_i + t_i). \quad (3)$$

В таком варианте появляется возможность рассмотрения блоков позиций вне цепочки производственного участка, а значит, возможен переход к суперэлементам (Рисунок 2).

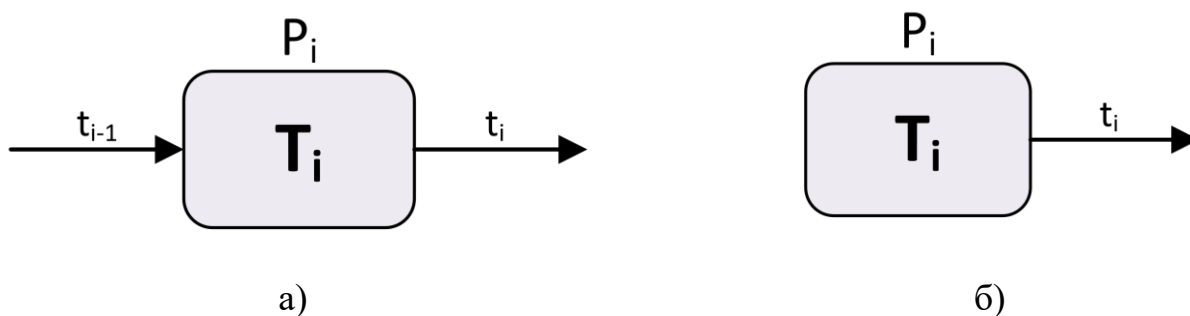


Рисунок 2 — Вид рассмотрения блока позиции а) в первом варианте, б) при переходе к суперэлементам

Суперэлемент представляется собой блок позиции, представленный в общем виде (например: с одним выходным потоком или несколькими, с обратной связью и без, и т. д.). Подобный подход позволяет упростить процесс оцифровки производства, так как становится возможным создание библиотеки универсальных суперэлементов, на основе которых можно, как из конструктора, собирать новые исследуемые производства. Всё это приводит к необходимости исследования и создания библиотеки суперэлементов, а также формирования заранее определённых связей между ними.

Введение элементов системы массового обслуживания

Имитационное моделирование является общим методом, позволяющим создавать цифровые модели реальных производственных систем для анализа их поведения в условиях различных сценариев. Однако для моделирования потоков заявок, материалов и нагрузки на производственные мощности, в чистом виде его может быть недостаточно [15–17]. Для расширения возможностей моделирования предлагается дополнительно ввести рассмотрение каждой позиции как системы массового обслуживания (СМО).

Это позволяет формализовать процессы на каждом этапе производства, анализируя интенсивность поступления полуфабрикатов и скорость их обработки. СМО является упрощённой моделью, описывающей работу производственного оборудования и поток заказов как системы с очередями. Имитационное моделирование, в свою очередь, может воспроизводить сложное поведение системы, моделируя одновременно несколько таких очередей и анализируя их взаимодействие. СМО же позволяет нам эффективно описывать работу отдельных производственных узлов как одноканальные системы с очередями. В рамках имитационного моделирования эти узлы объединяются в единую модель для оценки общего времени цикла и загрузки системы.

Определим основные используемые параметры СМО:

- 1) λ — интенсивность поступления заявок на позицию (является средним числом поступающих заявок за единицу времени);
- 2) μ_i — интенсивность обработки на каждой позиции n_i (скорость обработки на определённой позиции).

После определения основных параметров, они могут быть использованы при моделировании для анализа различных сценариев. Например, при изменении параметров скорости обслуживания или количества рабочих мест, можно количественно оценить влияние этих изменений на общую производственную эффективность [18–19].

Рассмотрение СМО на примере процесса производства печатных плат

Процесс производства печатных плат (ПП) состоит из нескольких основных этапов [20–22]:

- 1) разработка — создание схемы и планировки платы;
- 2) фрезеровка и сверление — физическая обработка заготовки;
- 3) ламинирование и травление — нанесение медного слоя и удаление лишнего материала;
- 4) нанесение защитного покрытия — покрытие для защиты от коррозии и внешних воздействий;
- 5) монтаж компонентов — установка и пайка электронных компонентов;
- 6) тестирование — оценка выходных характеристик.

Каждый из этих этапов может быть смоделирован как одноканальная система массового обслуживания (СМО), где полуфабрикаты (заготовки плат) проходят через различные производственные этапы (позиции).

Производственный процесс изготовления ПП можно рассматривать в формате нескольких обслуживающих каналов (рабочих позиций). Из выделенных ранее для моделирования можно определить такие, как:

1. P_1 — фрезеровка и сверление.
2. P_2 — травление.
3. P_3 — ламинирование.
4. P_4 — нанесение защитного покрытия.
5. P_5 — монтаж компонентов.
6. P_6 — тестирование.

Этап, связанный с дизайном и подготовкой макета, является внешним, относительно непосредственно производственного процесса, поэтому рассмотрение ведётся без него. Каждый этап производства можно рассматривать как

одноканальную систему с ожиданиями, где в каждый момент времени обрабатывается одна плата, при этом остальные находятся в очереди.

Например, если для позиции P_1 (фрезеровка и сверление) будет:

1. $\lambda = 10$ плат в час — интенсивность поступления плат на позицию фрезеровки.
2. $\mu_1 = 4$ ПП в час — интенсивность обработки на фрезеровке (если каждая ПП будет обрабатываться 15 минут).

Тогда коэффициент загрузки для первого этапа будет равен:

$$\rho_1 = \frac{\lambda}{\mu_1} = \frac{10}{4} = 2,5, \quad (4)$$

что говорит о перегрузке на этапе P_1 , т.к. поступление заявок превышает возможности позиции.

На следующих этапах (травление P_2 и ламинирование P_3) интенсивность обработки будет отличаться:

1. $\mu_2 = 3$ платы в час — травление;
2. $\mu_3 = 2$ платы в час — ламинирование.

Тогда время ожидания на каждой позиции можно рассчитать по формуле для среднего времени ожидания в очереди:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}, \quad (5)$$

где ρ — коэффициент загрузки.

Для этапа P_1 с $\rho_1 = 2,5$:

$$W_1 = \frac{2,5}{4(1-2,5)} = \frac{2,5}{4*(-1,5)} = -0,417 \text{ часа.} \quad (6)$$

Отрицательное значение указывает на перегрузку, что свидетельствует о том, что очередь на позиции P_1 не может быть обработана своевременно, вследствие чего возникают задержки.

На основе анализа загруженности оборудования можно принимать решения о необходимости корректировки производственного процесса [23].

Оптимизация процесса. Вариант 1: Увеличение мощности

Чтобы снизить нагрузку на этапе фрезеровки P_1 , можно уменьшить время, затрачиваемое на обработку на станке (за счёт замены на более мощный, изменения оснастка, изменения технологии и т.д.), что позволит повысить его интенсивность обработки, например, до $\mu_1 = 6$ ПП в час.

Тогда новый коэффициент загрузки:

$$\rho_1 = \frac{10}{6} = 1,67, \quad (7)$$

что уменьшит время ожидания:

$$W_{q1} = \frac{1,67}{6(1-1,67)} = -0,33 \text{ часов.} \quad (8)$$

При увеличении мощности загрузка снижается, но система всё ещё перегружена. Рассмотрим возможность параллельной работы станков.

Оптимизация процесса. Вариант 2: Параллельное агрегатирование

Выполнение этапа фрезеровки можно оптимизировать путём параллельного агрегатирования, в таком случае поступление заявок разделится на два потока, при этом интенсивность обработки возрастёт до $\mu_1 = 8$ ПП в час, и коэффициент загрузки снизится:

$$\rho_1 = \frac{10}{8} = 1,25, \quad (9)$$

что позволит значительно сократить время ожидания:

$$W_{q1} = \frac{1,25}{8(1-1,25)} = 0,1 \text{ часа}, \quad (10)$$

Анализ периодов на каждой позиции на основе результата моделирования позволит вносить более точные и эффективные коррективы в процесс производства для его оптимизации.

Заключение

За счёт модификации конечного автомата сокращается уровень влияния процесса моделирования на расчётные данные по простоям исследуемого производства, а также появляется возможность для введения обратных связей, что в свою очередь приводит к необходимости расширения метода использования имитационного моделирования и включения параметров системы массового обслуживания.

Одним из ключевых преимуществ введения СМО является упрощение формализации сложных процессов через простые модели, а имитационное моделирование, в свою очередь, позволяет проанализировать работу всей системы с учётом случайных факторов и динамики процесса, что в совокупности даёт более точную оценку работы каждого производственного узла и прогнозы по времени выполнения заказов и загрузке оборудования. Этот подход даёт возможность не только оценивать текущую работу системы, но и прогнозировать её поведение при изменении входных параметров.

Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшей автоматизации и цифровизации производственных систем, а также для разработки гибких производственных линий, способных быстро адаптироваться к изменениям в условиях рынка.

Список источников

1. R. Belinski, A.M.M. Peixe, G.F. Frederico., J.A. Garza-Reyes. Organizational learning and Industry 4.0: findings from a systematic literature review and research agenda // Benchmarking: An International Journal. 2020. Vol. 27, No. 8. P. 2435–2457. DOI: [10.1108/BIJ-04-2020-0158](https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2020-0158)
2. K. Fettig, T. Gacic, A. Köskal, A. Kühn, F. Stuber. Impact of Industry 4.0 on Organizational Structures // 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart, Germany. 2018. P. 1–8. DOI: [10.1109/ICE.2018.8436284](https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436284)
3. G. Hoellthaler, S. Braunreuther, G. Reinhart. Requirements for a methodology for the assessment and selection of technologies of digitalization for lean production systems // Procedia CIRP. 2019. Vol. 79, P. 198–203. DOI: [10.1109/ICE.2018.8436284](https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436284)
4. Мечикова М.Н., Климачев Т.Д. Практика и перспективы внедрения технологий Индустрии 4.0 на российских промышленных предприятиях в неблагоприятных внешнеэкономических условиях // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2023. № 12 (2). С. 100–106. URL: <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2023-2-100-106>
5. Денискин Ю.И., Дубровин А.В., Подколзин В.Г. Управление качеством процессов жизненного цикла инновационной продукции на основе компьютерной системы

- менеджмента качества // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84603>
6. Зайцева Н.И., Погарская Т.А. Разработка программного комплекса для анализа и оптимизации сборочного процесса в авиастроении // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167106>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-23)
7. Макеев П.А., Чермошенцев С.Ф. Апробация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате на практических примерах // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481>
8. A. Negahban, J.S. Smith. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis // Journal of Manufacturing Systems. 2013. No. 33. P. 241–261. DOI: [10.1016/j.jmsy.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007)
9. Ванцов С.В., Хомутская О.В., Лийн Е.А. Новые возможности автоматизации технологических процессов в приборостроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2023. № 3 (66). С. 129–136.
10. C. Sassanelli, P. Rosa, S. Terzi. Supporting disassembly processes through simulation tools: A systematic literature review with a focus on printed circuit boards // Journal of Manufacturing Systems. 2021. No. 3360. P. 429–448. DOI: [10.1016/j.jmsy.2021.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.009)
11. Железняков А.О., Сидорчук В.П., Подрезов С.Н. Имитационная модель системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165538>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)

12. Куренных А.Е. Разработка программного обеспечения для интеграции моделей поддержки принятия решений // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165567>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-19)
13. Лийн Е.А., Хомутская О.В., Ванцов С.В. Применение методов алгоритмизации в процессе имитационного моделирования технологических процессов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2023. № 1. С. 122–127. DOI: [10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127)
14. Лийн Е.А., Коробков М.А., Хомутская О.В., Ванцов С.В. Формализация работы производственного участка для разработки имитационной модели выполнения сменно-суточного задания // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 212–215.
15. Герасимчук В.В., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П. Методические аспекты моделирования стохастического вибродинамического воздействия // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183467>
16. Хатунцева О.Н. О "детерминизации" стохастических процессов при увеличении в системе степеней свободы // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171388>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-07](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-07)
17. Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>
18. Дорожко И.В., Мусиенко А.С., Сундиев Д.С. Имитационная модель, связывающая показатели надежности с показателями тестового и функционального контроля

технических систем // Труды МАИ. 2023. № 130. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)

19. Павлов Д.А., Попов А.М., Ткаченко В.В. Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования // Труды МАИ. 2023. № 131. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=175928>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-22)

20. Куликов Н., Хомутская О., Ванцов С. Цифровой метод автоматизированной оценки деформации печатной платы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 2 (173). С. 186–191. DOI: [10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191)

21. Исаев В. Взаимосвязь параметров, влияющих на надежность печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. 2020. № 5 (196). С. 128–137. DOI: [10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134)

22. Васильев Ф.В. Физическая надежность электроники. - М.: МАИ, 2022. – 160 с.

23. Кузнецов А.С., Кручинин А.А., Ушкар М.Н. Методика повышения надежности и эффективности конструкций бортовой радиоаппаратуры на ранних этапах проектирования // Труды МАИ. 2024. № 137. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=181879>

References

1. R. Belinski, A.M.M. Peixe, G.F. Frederico., J.A. Garza-Reyes. Organizational learning and Industry 4.0: findings from a systematic literature review and research agenda. *Benchmarking: An International Journal*. 2020. Vol. 27, No. 8. P. 2435–2457. DOI: [10.1108/BIJ-04-2020-0158](https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2020-0158)

2. K. Fettig, T. Gacic, A. Köskal, A. Kühn, F. Stuber. Impact of Industry 4.0 on Organizational Structures. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Germany. 2018. P. 1–8. DOI: [10.1109/ICE.2018.8436284](https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436284)
3. G. Hoellthaler, S. Braunreuther, G. Reinhart. Requirements for a methodology for the assessment and selection of technologies of digitalization for lean production systems. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 79, P. 198–203. DOI: [10.1109/ICE.2018.8436284](https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436284)
4. Mechikova M.N., Klimachev T.D. Practice and prospects of implementing Industry 4.0 technologies in Russian industrial enterprises under adverse external economic conditions. *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologii*. 2023. No. 12 (2). P. 100–106. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2023-2-100-106>
5. Deniskin Yu.I., Dubrovin A.V., Podkolzin V.G. Innovative production life cycle processes quality management on basis of computer aided quality management system. *Trudy MAI*. 2017. No. 95. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84603>
6. Zaitseva N.I., Pogarskaya T.A. Development of software complex for analysis and optimization of the aircraft assembly process. *Trudy MAI*. 2022. No. 124. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167106>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-23)
7. Makeev P.A., Chermoshentsev S.F. Testing the method of automated placement of elements on a rigid-flexible printed board using practical examples. *Trudy MAI*. 2024. No. 134. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178481>

8. A. Negahban, J.S. Smith. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*. 2013. No. 33. P. 241–261. DOI: [10.1016/j.jmsy.2013.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007)
9. Vantsov S.V., Khomutskaya O.V., Liin E.A. New automation opportunities for technological processes in instrument engineering. *Vestnik MGTU «Stankin»*. 2023. No. 3 (66). P. 129–136. (In Russ.)
10. C. Sassanelli, P. Rosa, S. Terzi. Supporting disassembly processes through simulation tools: A systematic literature review with a focus on printed circuit boards. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. No. 3360. P. 429–448. DOI: [10.1016/j.jmsy.2021.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.009)
11. Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P., Podrezov S.N. Simulation model of the system of maintenance and repair of electronic equipment. *Trudy MAI*. 2022. No. 123. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165538>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-26](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-26)
12. Kurennykh A.E. Software development for the integration of decision support models. *Trudy MAI*. 2022. No. 123. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165567>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-19)
13. Liin E.A., Khomutskaya O.V., Vantsov S.V. Application of algorithmization methods in the process of simulation modeling of technological processes. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2023. No. 1. P. 122–127. (In Russ.). DOI: [10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2023.222.1.122.127)
14. Liin E.A., Korobkov M.A., Khomutskaya O.V., Vantsov S.V. Formalization of the work of a production site for the development of a simulation model for shift-daily task execution. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2023. No. 5. P. 212–215. (In Russ.)

15. Gerasimchuk V.V., Efanov V.V., Kuznetsov D.A., Telepnev P.P. Methodological aspects of modeling stochastic vibrodynamic effects. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183467>
16. Khatuntseva O.N. On the «determinization» of stochastic processes with increasing degrees of freedom in the system. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171388>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-07](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-07)
17. Dorozhko I.V., Musienko A.S. A model for monitoring the technical condition of complex using artificial intelligence. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181885>
18. Dorozhko I.V., Musienko A.S., Sundiev D.S. Simulation model linking reliability indicators with indicators of test and functional control of technical systems. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)
19. Pavlov D.A., Popov A.M., Tkachenko V.V. A model for correcting the initial marking of a classical Petri net based on solving a discrete programming problem. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175928>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-22)
20. Kulikov N., Khomutskaya O., Vantsov S. Digital method for automated assessment of printed circuit board deformation. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2018. No. 2 (173). P. 186–191. (In Russ.). DOI: [10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.186.191)
21. Isaev V. Relationship of parameters affecting the reliability of printed circuit boards. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2020. No. 5 (196). P. 128–137. (In Russ.). DOI: [10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134](https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.196.5.128.134)

22. Vasil'ev F.V. *Fizicheskaya nadezhnost' elektroniki* (Physical reliability of electronics). Moscow: MAI Publ., 2022. 160 p.

23. Kuznetsov A.S., Kruchinin A.A., Ushkar M.N. Methodology for increasing the reliability and efficiency of on-board radio equipment structure at the early stages of design.

Trudy MAI. 2024. No. 137. (In Russ.). URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181879>

Статья поступила в редакцию 28.02.2025

Одобрена после рецензирования 31.03.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 28.02.2025; approved after reviewing on 31.03.2025; accepted for publication on 25.08.2025