

<https://doi.org/10.21122/2309-6667-2026-23-66-74>

УДК 330.4:004.94

Оригинальная исследовательская статья. Original Research Article

JEL C53, C63, D81, O14



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

© С. Е. Барыкин^{a*}, Н. С. Алексеева^a^a Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация* Корреспондирующий автор, sbe@list.ru

Аннотация. В статье предложен методический подход к использованию цифрового двойника технологического процесса как инструмента прогнозирования и поддержки управленческих решений. Актуальность исследования обусловлена ростом сложности экономических и технологических систем, усилением взаимосвязанности их элементов, а также необходимостью учета динамики потоковых процессов и неопределенности при принятии решений. **Целью работы** является разработка подхода, объединяющего моделирование состояния системы и формирование управленческих воздействий в рамках единой концепции цифрового двойника. Подход основан на представлении технологического процесса как динамической системы взаимосвязанных материальных, информационных и энергетических потоков, формирующих текущее и прогнозируемое состояние объекта управления. **Методология исследования** включает методы системного анализа, экономико-математического моделирования, а также элементы обработки данных и интеллектуального анализа. Цифровой двойник формализуется как динамическая модель, позволяющая не только отражать текущее состояние системы, но и прогнозировать ее развитие на основе анализа траекторий изменения параметров. **Результаты исследования** показывают, что предложенный подход обеспечивает возможность сценарного прогнозирования, оценки вероятности переходов системы в критические состояния и формирования опережающих управленческих воздействий. По сравнению с традиционными реактивными методами управления, предлагаемый подход ориентирован на предотвращение неблагоприятных ситуаций. Применение цифрового двойника позволяет связать модель состояния системы с задачами управления на уровне формирования управленческих воздействий. **Практическая значимость работы** заключается в возможности применения разработанного подхода для повышения эффективности управления технологическими процессами, выявления узких мест и обеспечения устойчивого функционирования систем в условиях неопределенности и изменчивости внешней среды.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологический процесс, прогнозирование, управление, поддержка принятия решений, экономические системы, потоковые структуры, риск, опережающее управление.

Благодарности. Исследование выполнено без дополнительного финансирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование ИИ. При написании статьи ИИ не использовался.

Для цитирования: Барыкин С. Е., Алексеева Н. С. (2026). Цифровой двойник технологического процесса для прогнозирования и опережающего управления. *Экономическая наука сегодня*. № 1 (23). С. 66–74. <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2026-23-66-74>

DIGITAL TWIN OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR FORECASTING AND ANTICIPATORY CONTROL

© S. E. Barykin^{a*}, N. S. Alekseeva^a^a Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation* Corresponding author, sbe@list.ru

Abstract. This article proposes a methodological approach to using a digital twin of a technological process to forecast and support management decisions. The relevance of this research is driven

by the growing complexity of economic and technological systems, the increasing interconnectedness of their elements, and the need to consider the dynamics of flow processes and uncertainty in decision-making. The aim of this study is to develop an approach that integrates system state modeling and the generation of management actions within the unified concept of a digital twin. This approach is based on representing a technological process as a dynamic system of interconnected material, information, and energy flows that shape the current and predicted state of a controlled object.

The research methodology incorporates system analysis, economic and mathematical modeling, and elements of data processing and intelligent analysis. The digital twin is formalized as a dynamic model that not only reflects the current state of the system but also predicts its evolution based on the analysis of parameter change trajectories. The results of the study demonstrate that the proposed approach enables scenario forecasting, assessment of the probability of the system transitioning to critical states, and generation of anticipatory management actions. Compared with traditional reactive management methods, the proposed approach focuses on preventing unfavorable situations. The use of a digital twin allows for linking the system state model with management objectives at the level of generating management actions. The practical significance of this work lies in the potential application of the developed approach to improving the efficiency of technological process management, identifying bottlenecks, and ensuring the stable operation of systems amid environmental uncertainty and variability.

Keywords: digital twin, technological process, forecasting, management, decision support, economic systems, flow structures, risk, advanced management.

Acknowledgments. This research received no funding.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Use of AI declaration. No AI was used in writing this article.

For citation: Barykin S. E., Alekseeva N. S. (2026). Digital twin of the technological process for forecasting and anticipatory control. *Economic science today*. 1(23), 66–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2026-23-66-74>

Введение. В современных экономических и технологических системах существенно возрастает сложность процессов управления, обусловленная усилением взаимосвязанности элементов, динамичностью среды функционирования и наличием неопределенности. Это делает необходимой разработку подходов, позволяющих не только описывать текущее состояние системы, но и прогнозировать ее поведение с последующим формированием обоснованных решений.

В научной литературе активно развиваются направления, связанные с цифровой трансформацией экономики, развитием сетевых форм организации и управлением сложными системами (Алексеева, Барыкин, 2024; Барыкин, Алексеева, 2024; Щепинин и др. 2024; Chopra, Meindl, 2016; Grieves, 2014; Ivanov, 2021; Kritzing et al., 2018; Negri et al., 2017; Sterman, 2000; Tao et al., 2018). Цифровые двойники рассматриваются как инструмент моделирования и анализа сложных систем, позволяющий формировать представление о текущем и прогнозируемом состоянии объекта на основе совокупности данных и моделей (Grieves, 2014; Kritzing et al., 2018; Tao et al., 2018). Вместе с тем существующие подходы в значительной степени ориентированы либо на моделирование процессов, либо на задачи принятия решений, что приводит к недостаточной интеграции этих аспектов в рамках единого методического подхода.

Особую актуальность данная проблема приобретает при управлении технологическими процессами, где динамика взаимосвязанных потоков (материальных, информационных и энергетических) определяет состояние системы и влияет на эффективность ее функционирования (Chopra, Meindl, 2016; Ivanov, Dolgui, 2020; Ivanov, 2021). В условиях высокой изменчивости параметров и наличия рисков перехода системы в критические состояния требуется инструмент, обеспечивающий не только мониторинг, но и опережающее управление.

В этой связи целью статьи является разработка методического подхода к использо-

ванию цифрового двойника технологического процесса как инструмента прогнозирования и поддержки управленческих решений. Предлагаемый подход основан на представлении технологического процесса как динамической системы потоков, формировании модели состояния и использовании цифрового двойника для перехода от наблюдаемого состояния к пространству управленческих решений.

В отличие от существующих подходов, в работе предложена интеграция моделирования динамики системы, оценки риска и формирования управленческих воздействий в рамках единого контура цифрового двойника.

Теоретические основы моделирования технологических систем на основе цифрового двойника. В современных исследованиях технологические и экономические системы рассматриваются как сложные динамические образования, характеризующиеся высокой степенью взаимосвязанности (Клейнер, 2021; Forrester, 1961; Sterman, 2000), а также учетом факторов неопределенности и риска в развитии социально-экономических систем (Солодовников, 2018а, 2018b; Солодовников и др., 2019). Их функционирование определяется не только параметрами отдельных компонентов, но и структурой взаимодействий между ними, а также внешними воздействиями.

Одним из перспективных подходов к анализу и управлению такими системами является использование концепции цифрового двойника (Grieves, 2014; Kritzinger et al., 2018; Negri et al., 2017; Tao et al., 2018). В отличие от существующих подходов к цифровой трансформации и управлению сложными системами (Алексеева, Барыкин, 2024; Барыкин, Алексеева, 2024; Щепинин и др. 2024), ориентированных на отдельные аспекты цифровизации и управления, в работе предлагается интегрированный подход к моделированию реального объекта или процесса с учетом его текущего и прогнозируемого состояния на основе данных и математических моделей.

В рамках данного исследования технологический процесс рассматривается как система взаимосвязанных потоков, включающих материальные, информационные и энергетические компоненты. Такое представление позволяет формализовать структуру процесса и описать его состояние через совокупность параметров, характеризующих интенсивность и согласованность потоков.

Состояние технологической системы в каждый момент времени определяется вектором параметров, формируемым под воздействием как внутренних, так и внешних характеристик процесса (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Существенное влияние при этом оказывают переходы между различными режимами функционирования системы, включая нормальные, переходные и критические состояния.

Использование цифрового двойника позволяет связать модель состояния с задачами управления на уровне формирования воздействий. Анализ текущих параметров в сочетании с прогнозом их изменения дает возможность формировать управленческие воздействия, ориентированные на достижение заданных целей функционирования. В этом контексте цифровой двойник выступает не только как инструмент описания и анализа процессов, но и как основа для поддержки принятия решений.

Разработанный подход опирается на представление системы в виде потоковой структуры, дополненное механизмами прогнозирования и оценки рисков (Ivanov, Dolgui, 2020; Negri et al., 2017). Такое сочетание позволяет выявлять проблемные участки, оценивать вероятность перехода системы в нежелательные состояния и вырабатывать управленческие воздействия, направленные на их предотвращение.

Методический подход к использованию цифрового двойника в управлении технологическим процессом. Рассматриваемый методический подход основан на интеграции моделей динамики технологической системы и механизмов формирования управленческих решений в рамках концепции цифрового двойника. Ключевая идея заключается в переходе от описания состояния системы к выработке управленческих воздействий на основе анализа и прогнозирования ее поведения.

В рамках подхода технологический процесс рассматривается как динамическая система, состояние которой определяется совокупностью параметров, характеризующих интенсивность и согласованность материальных, информационных и энергетических потоков. Пусть состояние системы в момент времени t описывается вектором:

$$X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)), \quad (1)$$

где $x_i(t)$ – параметры, отражающие ключевые характеристики процесса. Динамика системы может быть представлена в общем виде как:

$$X(t + 1) = F(X(t), U(t), \xi(t)), \quad (2)$$

где $U(t)$ – управляющее воздействие;

$\xi(t)$ – совокупность внешних факторов и случайных воздействий;

$F(\cdot)$ – функция перехода, определяемая структурой системы.

Подобное представление динамики системы согласуется с подходами стохастического моделирования и анализа динамических систем (Forrester, 1961, Shapiro, 2007).

Цифровой двойник в рамках данного подхода представляет собой модель, реализующую отображение текущего состояния системы в прогнозируемое состояние:

$$\hat{X}(t + 1) = \hat{F}(X(t)), \quad (3)$$

Это позволяет оценивать возможные траектории развития системы при различных сценариях.

В рамках рассматриваемого подхода особое значение имеет анализ вероятности перехода системы в нежелательные, в том числе критические, состояния. Для формализации этого аспекта вводится функция риска:

$$R(t) = P(X(t) \in S_{crit}), \quad (4)$$

где S_{crit} обозначает множество состояний, соответствующих неэффективному либо потенциально опасному режиму функционирования системы.

Оценка риска осуществляется с использованием стохастических показателей, в частности, показателя условной стоимости под риском (CVaR) (Negri, 2017). На основе прогноза состояний системы и рассчитанных значений риска определяется управленческое воздействие, направленное на достижение целевых параметров ее функционирования:

$$U^*(t) = \arg \min_U L(X(t), U(t)), \quad (5)$$

где L – функция потерь, учитывающая как отклонение от целевых значений, так и уровень риска.

Таким образом, процедура принятия решений может быть представлена в виде последовательности: текущее состояние системы $\rightarrow$ прогноз его изменения $\rightarrow$ оценка риска $\rightarrow$ выбор управляющего воздействия.

Реализация данного подхода предполагает использование методов обработки данных и машинного обучения для аппроксимации функции перехода F , а также интеграцию цифрового двойника с существующими информационными системами предприятия.

Применение методов машинного обучения для аппроксимации динамики системы соответствует современным подходам интеллектуального моделирования (Sterman,

2000). Отличительной особенностью подхода является его ориентированность на опережающее управление, при котором решения принимаются не только на основе текущего состояния системы, но и с учетом прогнозируемой динамики и вероятности наступления нежелательных состояний.

Применение цифрового двойника для управления технологическим процессом.

Рассмотрим применение предложенного подхода на примере технологического процесса обработки изделия на промышленном предприятии (Ivanov, Dolgui, 2020; Tao et al., 2018). Данный процесс включает последовательность операций, связанных с преобразованием исходного сырья в готовую продукцию, и характеризуется наличием взаимосвязанных материальных, информационных и энергетических потоков.

В качестве объекта исследования рассматривается участок обработки, на котором осуществляется последовательная обработка деталей. Основными параметрами, определяющими состояние системы, являются:

- интенсивность поступления заготовок;
- скорость выполнения операций;
- уровень загрузки оборудования;
- время обработки;
- наличие отклонений и сбоев в работе оборудования.

Состояние технологического процесса в каждый момент времени определяется совокупностью параметров, формирующих вектор состояния системы. На основе информации о текущем состоянии формируется цифровая модель, обеспечивающая возможность анализа динамики параметров процесса и оценки потенциальных направлений его развития.

В рамках концепции цифрового двойника рассматриваются альтернативные сценарии функционирования системы. Так, увеличение интенсивности поступления заготовок при неизменной производительности оборудования обуславливает рост уровня загрузки и повышает вероятность формирования очередей. Указанные изменения приводят к снижению эффективности функционирования системы и увеличению продолжительности выполнения операций. Аналогично – уменьшение скорости обработки, вызванное износом оборудования или воздействием внешних факторов, влияет на устойчивость технологического процесса.

Предложенный подход обеспечивает прогнозирование состояния системы на последующих временных интервалах, а также оценку вероятности перехода в критические режимы, включая перегрузку оборудования и увеличение продолжительности выполнения операций.

На основе полученных оценок принимаются управленческие решения по обеспечению устойчивости функционирования технологического процесса, к которым могут быть отнесены следующие:

- перераспределение потоков заготовок между производственными участками;
- корректировка режимов функционирования оборудования;
- изменение параметров технологического процесса;
- планирование и проведение профилактического обслуживания.

Результаты применения цифрового двойника подтверждают преимущества использования прогнозной информации, обеспечивающей выявление узких мест системы и предотвращение развития неблагоприятных сценариев. В отличие от реактивного управления, при котором решения принимаются после возникновения отклонений, рассматриваемый подход ориентирован на опережающее управление, направленное на снижение вероятности реализации рисков.

Следовательно, применение цифрового двойника технологического процесса способствует повышению эффективности функционирования системы за счет более обоснованного принятия управленческих решений и учета динамики протекающих процессов.

Результаты и их обсуждение. Результаты применения предложенного методического подхода свидетельствуют о его применимости при анализе и управлении технологическими процессами. Использование цифрового двойника обеспечивает переход от описательного анализа состояния системы к прогнозированию ее динамики и формированию обоснованных управленческих решений.

Анализ полученных результатов показывает, что применение цифрового двойника позволяет выявлять узкие места технологического процесса на ранних этапах его функционирования. Моделирование динамики потоков обеспечивает выявление участков, характеризующихся накоплением нагрузки, снижением производительности или увеличением продолжительности выполнения операций. Это создает возможность оперативной корректировки параметров системы и снижения вероятности развития неблагоприятных сценариев.

Отдельным результатом является возможность количественной оценки риска перехода системы в критические состояния. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на анализ уже реализованных отклонений, рассматриваемый метод учитывает вероятностный характер изменений и позволяет анализировать альтернативные траектории развития процесса. В результате управленческие решения формируются с учетом не только текущего состояния, но и ожидаемых изменений системы.

Сопоставление с традиционными методами управления показывает, что последние преимущественно носят реактивный характер и базируются на анализе уже произошедших событий (Chopra, Meindl, 2016; Ivanov, 2021), что соответствует классическим подходам к системам поддержки принятия решений (Ivanov, 2021). В рамках предлагаемого подхода формирование управленческих решений осуществляется с учетом прогнозируемой динамики системы, что позволяет заранее учитывать возможные изменения состояния.

Дополнительным преимуществом является возможность интеграции цифрового двойника в существующую информационную инфраструктуру предприятия без существенного изменения ее архитектуры. Реализация подхода может рассматриваться как функциональное расширение действующих процессов управления.

Вместе с тем следует учитывать, что эффективность применения подхода определяется качеством исходных данных и степенью адекватности используемой модели. При увеличении сложности системы возрастает вычислительная нагрузка, связанная с прогнозированием ее динамики, что необходимо учитывать при практическом применении.

В рамках предлагаемого подхода акцент смещается в сторону опережающего управления, предусматривающего учет прогнозируемых изменений состояния системы. Это обеспечивает снижение вероятности возникновения критических ситуаций и делает возможным повышение устойчивости функционирования технологического процесса.

В целом использование цифрового двойника в качестве инструмента прогнозирования и поддержки принятия решений направлено на повышение обоснованности управления технологическими процессами, снижению уровня рисков и более устойчивому функционированию системы в условиях неопределенности.

Выводы. В работе разработан подход к использованию цифрового двойника технологического процесса при решении задач прогнозирования и поддержки управленческих решений, основанный на представлении системы в виде совокупности взаимосвязанных потоков, динамика которых определяет ее текущее состояние и изменение во времени.

Показано, что объединение модели состояния системы с управленческими воздействиями обеспечивает учет возможных траекторий развития процесса, что дает возможность ориентировать управленческие решения на предотвращение нежелательных изменений в функционировании системы.

Прикладное значение цифрового двойника заключается в выявлении проблемных участков технологического процесса, последующей оценке влияния изменения параметров, а также учете потенциальных отклонений на ранних стадиях их проявления.

Применение цифрового двойника способствует повышению устойчивости функционирования системы и снижению вероятности перехода в критические состояния.

Предложенный подход может быть использован при разработке систем поддержки принятия решений и цифровых инструментов управления в различных отраслях (промышленности, логистике и сфере услуг), где значение имеет учет динамики процессов и факторов неопределенности.

Дальнейшее развитие исследования связано с уточнением моделей динамики, расширением методов обработки данных и адаптацией подхода к различным типам экономических и технологических систем.

Список использованных источников

- Алексеева Н. С., Барыкин С. Е. (2024). Сетевые организации как новая основа управления научно-техническим сотрудничеством. *Мировая экономика и бизнес-администрирование* : сборник материалов и докладов 20-ого Международного научно-практического семинара, Минск, 02–03 октября 2024 г. Минск: Четыре четверти, 2024. С. 10–11.
- Барыкин С. Е., Алексеева Н. С. (2024). Управленческие модели координации участников инновационной экосистемы. Тенденции экономического развития в XXI веке : материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию экономического факультета БГУ. В 2 ч., Минск, 28–29 февр. 2024 г. Минск: Белорусский государственный университет. С. 266–268.
- Клейнер Г. Б. (2021). Системная экономика : шаги развития. Автор предисловия В. Л. Макаров; Центральный экономико-математический институт РАН. Москва: Научная библиотека. 746 с.
- Солодовников С. Ю. (2018a). Взаимосвязь структурной политики государства и модернизации реального сектора экономики. *Экономическая наука сегодня*. № 7. С. 84–94.
- Солодовников С. Ю. (2018b). Понятие хаоса и его роль в развитии социально-экономических систем. Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых социальных и инженерных подходов: сборник материалов XII Международной научно-практической конференции. 15 марта 2018 г., г. Минск: БНТУ. С. 26–30.
- Солодовников С. Ю., Сергиевич Т. В., Мелешко Ю. В. (2019). Модернизация белорусской экономики и экономика рисков: актуальные проблемы и перспективы. Минск: БНТУ. 491 с.
- Щепинин В. Э., Абушова Е. Е., Авдеева И. Н. и др. (2024). Глобальные вызовы цифровой трансформации рынков: теория и практика современного управления, экономики и сферы услуг. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 1028 с. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-559>
- Chopra S., Meindl P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. Pearson.
- Forrester J. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Grieves M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White Paper.
- Ivanov D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*. Vol. 59, No. 12, P. 3534–3552.
- Ivanov D., Dolgui A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks. *International Journal of Production Research*. No. 58 (7), P. 2184–2203. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630908>
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review. *IFAC-PapersOnLine*. No. 51 (11), P. 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. No. 11, P. 939–948.
- Shapiro J. (2007) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury Press.
- Sterman J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. No. 48, P. 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>

References

- Alekseeva N. S., Barykin S. E. (2024). Network-centric organizations as a new basis for managing scientific and technical cooperation [Setetsentricheskie organizatsii kak novaya osnova upravleniya nauchno-tekhnicheskim sotrudnichestvom]. *Global Economy and Business Administration: Proceedings and Papers of the 20th International Scientific and Practical Seminar*, Minsk, October 2–3, 2024. Minsk: Four Quarters. P. 10–11. (In Russ.).
- Barykin S. E., Alekseeva N. S. (2024). Management models for coordinating participants in the innovation ecosystem [Upravlencheskie modeli koordinatsii uchastnikov innovatsionnoy ekosistemy]. *Trends in Economic Development in the 21st Century: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Faculty of Economics of BSU*. In 2 parts, Minsk, February 28–29, 2024. Minsk: Belarusian State University. Pp. 266–268. (In Russ.).
- Chopra S., Meindl P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. Pearson.
- Forrester J. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Grieves M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper.
- Ivanov D. (2021). Supply chain viability and the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3534–3552.
- Ivanov D., Dolgui A. (2020). A digital supply chain twin for managing the disruption risks. *International Journal of Production Research*. 58(7), 2184–2203. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630908>
- Kleiner G. B. (2021). *Sistemnaya ekonomika: shagi razvitiya* [Systemic Economy: Steps of Development]. Author of the foreword: V. L. Makarov; Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Scientific Library. (In Russ.).
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review. *IFAC-PapersOnLine*. 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 11, 939–948.
- Shapiro J. (2007) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury Press.
- Shchepinin V. E., Abushova E. E., Avdeeva I. N. et al. (2024). *Global'nye vyzovy tsifrovoy transformatsii rynkov: teoriya i praktika sovremennogo upravleniya, ekonomiki i sfery uslug* [Global Challenges of Digital Transformation of Markets: Theory and Practice of Modern Management, Economics, and the Service Sector]. Saint Petersburg: Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-559>
- Solodovnikov S. Yu. (2018a). Relationship of structural policy of the state and modernization of the real sector of economics. *Economic science today*. 7, 84–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2309-6667-2018-7-84-94>
- Solodovnikov S. Yu. (2018b). The concept of chaos and its role in the development of socio-economic systems [Ponyatie khaosa i ego rol' v razvitii sotsial'no-ekonomicheskikh sistem]: Modernization of the economic mechanism through the prism of economic, legal, social and engineering approaches: collection of materials of the XII International Scientific and Practical Conference. Minsk, BNTU. Pp. 26–30. (In Russ.).
- Solodovnikov S. Yu., Serhiyevich T. V., Meleshko Yu. V. (2019). *Modernizatsiya belorusskoi ekonomiki i ekonomika riskov: aktual'nye problemy i perspektivy* [Modernization of the Belarusian economy and risk economy: current problems and prospects]. Minsk, BNTU publ. (In Russ.).
- Sterman J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 48, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>

Статья поступила 17.02.2026, прошла рецензирование 15.03.2026, принята 03.04.2026.

Received: Feb 17, 2026, reviewed: Mar 15, 2026, accepted: Apr 3, 2026.

Авторство и вклад в научное исследование

С. Е. Барыкин: разработка концепции, методология, научное руководство, формальный анализ, написание текста – рецензирование и редактирование.

Н. С. Алексеева: проведение исследования, обработка данных, визуализация, написание текста – первоначальный вариант.

Author contributions

S. E. Barykin: conceptualization, methodology, supervision, formal analysis, writing – review & editing.

N. S. Alekseeva: investigation, data curation, visualization, writing – original draft.

Информация об авторах

Барыкин Сергей Евгеньевич – доктор экономических наук, профессор, профессор Высшей школы сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б, г. Санкт-Петербург, Россия, sbe@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>

Алексеева Наталья Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б, г. Санкт-Петербург, Россия, alekseeva_ns@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7355-3277>

Information about the authors

Sergey E. Barykin – Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor at the Higher School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, external ter. city municipal district Akademicheskoe, Politekhnikeskaya st., 29, building B, St. Petersburg, Russia, sbe@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>

Natalia S. Alekseeva – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Higher School of Industrial Management, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, external ter. city municipal district Akademicheskoe, Politekhnikeskaya st., 29, building B, St. Petersburg, Russia, alekseeva_ns@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7355-3277>