

УДК 004.94

EDN SJOALP

## Анализ современных подходов к имитационному моделированию роботизированных производственных систем с учетом возможностей специализированных инструментов

**Н.А. Асабаев, Е.В. Семенова, О.В. Иовлева\***

Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, корп. 1, Казань,  
420008, Россия, Республика Татарстан

\*E-mail: olga.beloded@kpfu.ru

**Аннотация.** В данной статье проведен комплексный анализ современных методов имитационного моделирования роботизированных производственных систем (РПС). Особое внимание уделено эволюции от статических моделей, основанных на инструментах визуализации, таких как Visio и Excel, к динамическим дискретно-событийным системам, реализуемым на платформах AnyLogic и FlexSim, и далее – к интеллектуальным цифровым двойникам с интеграцией IoT и машинного обучения, реализуемым в средах ROS/Gazebo и Siemens NX. Анализ основан на сравнительной методологии, учитывающей точность прогнозирования, временные и стоимостные затраты, а также потенциал интеграции. Подчеркивается критическая роль верификации моделей и стандартизации интерфейсов с корпоративными системами управления (MES). Сделан вывод о необходимости сбалансированного подхода, учитывающего как технологические возможности инструментов, так и производственные требования.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, цифровые двойники, роботизированные производственные системы (РПС), автоматизация и интеграция, стандартизация интерфейсов.

## Analysis of modern approaches to simulation modeling of robotic production systems, taking into account the capabilities of specialized tools

**N.A. Asabaev, E.V. Semenova, O.V. Iovleva\***

Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya street, 420008 Kazan, Russia

\*E-mail: olga.beloded@kpfu.ru

**Abstract.** This article provides a comprehensive analysis of modern methods of simulation modeling of robotic production systems (RPS). Special attention is paid to the evolution from static models based on visualization tools such as Visio and Excel, to dynamic discrete-event systems implemented on the AnyLogic and FlexSim platforms, and further to intelligent digital twins with IoT and machine learning integration implemented in the ROS/Gazebo and Siemens NX environments. The analysis is based on a comparative methodology that takes into account the accuracy of forecasting, time and cost considerations, as well as integration potential. The critical role of model verification and standardization of interfaces with enterprise management systems (MES) is emphasized. The paper concludes that a balanced approach is necessary, taking into account both the technological capabilities of the tools and the production requirements.

**Keywords:** simulation modeling, digital twins, robotic production systems (RPS), automation and integration, interface standardization.

## 1. Введение

Современное промышленное производство характеризуется активной роботизацией, что позволяет повышать производительность, снижать издержки и уменьшать участие человека в опасных и трудоемких операциях. В традиционном подходе проектирование и оптимизация РПС опирались на физические прототипы или статические чертежи – процесс был ресурсозатратным, долгим и дорогим.

Имитационное моделирование (ИМ) – инструмент для оптимизации процессов, тестирования сценариев, повышения гибкости систем и снижения рисков. Однако эффективность использования ИМ зависит от правильного выбора методологии, инструментальной платформы и уровня детализации модели [1, 2].

Цель статьи – проанализировать современные подходы к имитационному моделированию РПС, определить их преимущества и недостатки, а также выявить перспективные тенденции развития и интеграции.

## 2. Методология исследования

Базой классификации является трехуровневая модель:

- Базовый уровень: статические модели, визуализация – использующие Visio, Excel, MS Project; низкая точность, быстрое создание;
- Продвинутый уровень: дискретно-событийное моделирование (ДЭС), платформы AnyLogic, FlexSim, средняя и высокая точность, затраты на моделирование выше, но дают возможность анализа динамики систем;
- Интеллектуальный уровень: цифровые двойники (Digital Twin) на базе ROS/Gazebo, Siemens NX, интеграция с IoT, машинным обучением (ML), предиктивной аналитикой – высокая точность, полная интеграция с реальными системами.

Критерии сравнения включают:

- Точность прогноза (от отклонений в моделировании процессов);
- Время на создание и запуск модели;
- Стоимость владения и внедрения;
- Интеграцию с системами управления (MES, SCADA) и IoT-устройствами.

Для формализованной оценки эффективности различных подходов к имитационному моделированию РПС предлагается следующая математическая модель (уравнение 1):

$$ER = \alpha(AP) + \beta(TS) + \gamma(CO) + \delta(IS) \quad (1)$$

где:

- $ER$  – интегральная эффективность решения;
- $AP$  – точность прогнозирования (Accuracy of Prediction);
- $TS$  – время симуляции (Time of Simulation);
- $CO$  – стоимость владения (Cost of Ownership);
- $IS$  – интеграционная способность (Integration Score);
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты определяются эмпирическим путем в зависимости от конкретных требований производства и типа моделируемой системы. Для предприятий с высокой стоимостью простоя оборудования коэффициент  $\alpha$  (точность прогнозирования) принимает более высокое значение, тогда как для быстроразвивающихся производств с частой сменой номенклатуры более значимым становится коэффициент  $\beta$  (время симуляции).

Данный анализ основан на опыте внедрения платформ и спецификациях, а также практических руководствах [3-6].

### 3. Основные результаты и их анализ

#### 3.1. Точность и сложности в моделировании

- Базовые инструменты (Excel, Visio) – обеспечивают точность около 68,4%. Их используют для быстрых визуальных схем и планирования, но они не предназначены для динамического анализа или предиктивных расчетов;
- Дискретно-событийные платформы (AnyLogic, FlexSim) – повышают точность до 88,9%. Позволяют моделировать логистические цепи, очереди, операции, взаимодействия различных элементов системы;
- Интеллектуальные платформы (ROS/Gazebo, Siemens NX) – достигают 97,2%. Благодаря возможностям физического моделирования и интеграции с IoT и ML – позволяют реализовать так называемые цифровые двойники, которые моделируют и отслеживают реальную систему в реальном времени [7, 8].

Ниже представлена таблица сравнительных характеристик (таблица 1):

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики подходов к имитационному моделированию РПС.

| Параметр             | Базовый подход | Продвинутые системы | Интеллектуальные платформы |
|----------------------|----------------|---------------------|----------------------------|
| Точность прогноза, % | 68,4           | 88,9                | 97,2                       |
| Время симуляции      | 4,8 мин        | 16,3-31,7 мин       | 1,2-4,8 мин (с GPU)        |
| Стоимость владения   | 1,0 (отн. ед.) | 3,2 (отн. ед.)      | 5,1 (отн. ед.)             |
| Интеграция с IoT/ИИ  | Отсутствует    | Частичная           | Полная                     |
| Примеры платформ     | Excel, Visio   | AnyLogic, FlexSim   | ROS/Gazebo, Siemens NX     |



**Рисунок 1.** Комплексное сравнение подходов к имитационному моделированию РПС.

Описание рисунка 1 приведено ниже в таблице 2.

**Таблица 2.** Комплексное сравнение подходов к имитационному моделированию РПС.

| Уровень детализации (кол-во параметров) | Базовый подход | Продвинутые системы | Интеллектуальные платформы |
|-----------------------------------------|----------------|---------------------|----------------------------|
| 10                                      | 60             | 60                  | 60                         |
| 100                                     | 68             | 75                  | 78                         |
| 250                                     | 68,4           | 82                  | 88                         |
| 500                                     | 68,4           | 86                  | 93                         |
| 750                                     | 68,4           | 88                  | 96                         |
| 1000                                    | 68,4           | 88,9                | 97,2                       |

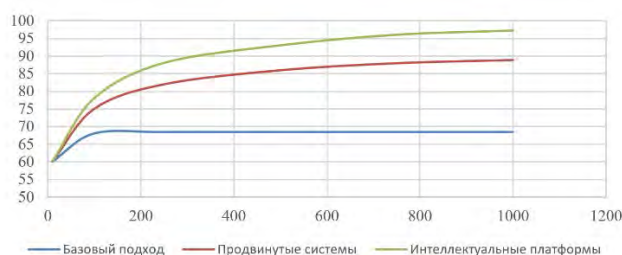


**Рисунок 2.** Зависимость точности имитационного моделирования от уровня детализации для разных подходов.

На рисунке 2 представлена зависимость точности имитационного моделирования от уровня детализации модели. График наглядно демонстрирует фундаментальные различия в

масштабируемости трех анализируемых подходов. Кривая «Базовый подход» (синяя линия) характеризуется быстрым выходом на «плато насыщения» на уровне около 68%. Это свидетельствует о том, что дальнейшее усложнение модели в средах типа Excel или Visio не приводит к росту точности из-за ограничений самого математического аппарата статических инструментов. Кривая «Продвинутые системы» (оранжевая линия) демонстрирует способность эффективно обрабатывать большой объем данных, достигая предела точности в районе 89%. Это подтверждает эффективность дискретно-событийного моделирования для логистических и операционных задач средней сложности. Наибольший интерес представляет кривая «Интеллектуальные платформы» (серая линия). Она показывает отсутствие ярко выраженного предела насыщения на начальных этапах и продолжает асимптотически приближаться к показателям выше 97% по мере повышения детализации. Это объясняется синергией физических движков и алгоритмов машинного обучения, которые способны уточнять модель в реальном времени, превращая количество данных в качество прогноза.

### 3.2. Примеры использования платформ

- Visio и Excel: планирование производственных линий, разработка сценариев до деталей, оценка размещения оборудования; например, моделирование размещения роботов в зоне сборки на листе Excel;
- AnyLogic, FlexSim: симуляция логистических потоков в складе, расчет очередей, моделирование работы автоматизированных складов (например, зону сортировки с использованием мобильных роботов);
- ROS/Gazebo и Siemens NX: виртуальные прототипы роботов, моделирование взаимодействия нескольких устройств в онлайн, отладка алгоритмов ИИ, создание цифровых двойников для предиктивного обслуживания.

### 3.3. Важность стандартизации и верификации

Ключ для успешной реализации систем – гарантия качества моделирования. Стандартизация интерфейсов, API, форматов данных обеспечивает безопасный обмен информацией между моделями и реальными системами.

Недостаток стандартных коммуникационных протоколов увеличивает затраты на интеграцию – в среднем, на 22,3%. Поэтому разработка отраслевых стандартов, таких как OPC UA, MQTT, EDC (Electronic Data Capture), становится актуальной.

Верификация моделей – это процесс проверки:

- их соответствия реальным системам;
- адекватности предсказаний;
- стабильности и надежности работы в различных сценариях.

Пример практических схем:

Ступени верификации модели

1. Построение модели;
2. Проверка на этапе тестирования;
3. Сравнение с реальными данными;
4. Корректировка параметров;
5. Внедрение в эксплуатацию.

Эта последовательность гарантирует, что модель будет соответствовать реальности и предоставит надежную информацию для принятия решений.

### 3.4. Перспективные направления развития

1. Разработка отечественных стандартов

Создание национальных стандартов интеграции и обмена моделями даст возможность упростить внедрение в российских и зарубежных предприятиях.

2. Внедрение адаптивных алгоритмов ML

На базе ИИ создаются системы, способные самосовершенствоваться в процессе эксплуатации. Исследования показывают, что гибридное моделирование (сочетание физических моделей и машинного обучения) позволяет значительно повысить точность воспроизведения реальных процессов. Например, применение нейронных сетей для коррекции параметров имитационной модели может снизить ошибку прогнозирования позиционирования робота более чем на 50% по сравнению с чисто кинематическими моделями [9]. Интеграция цифровых двойников с методами глубокого обучения позволяет обнаруживать аномалии в работе оборудования с точностью до 99% [10].

3. Использование технологий «цифровой тени» (Digital Shadow)

Создавать модели, которые автоматически собирают и анализируют данные с реальных устройств в реальном времени, позволяя своевременно корректировать работу системы.

4. Исследование стандартных платформ

Созданию отраслевых решений, объединяющих в себе возможности виртуальных прототипов и цифровых двойников, с учетом специфики производства, например, машиностроения или электроэнергетики.

### 3.5. Влияние имитационного моделирования на эффективность производства

Практические показатели свидетельствуют о высокой отдаче от внедрения. Согласно отчету McKinsey, технологии цифровых двойников позволяют сократить время выхода продукта на рынок (Time-to-market) до 50% и повысить производительность на 10% [11]. Исследования Deloitte показывают, что компании, использующие предиктивное моделирование и цифровых двойников, отмечают сокращение внеплановых простоев на 15-30% [12].

**Таблица 3.** Пример расчетной эффективности внедрения цифрового двойника для участка сварки.

| Показатель эффективности      | Традиционный подход (без ИМ) | С применением имитационного моделирования | Эффект (изменение)      |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|
| Срок реализации проекта       | 100%                         | 35-40% от базового срока                  | Сокращение на ~60%      |
| Количество ошибок при запуске | Высокое                      | Минимальное                               | Снижение в 3-4 раза     |
| Затраты на исправление ошибок | 10-15% от бюджета проекта    | < 1% от бюджета проекта                   | Экономия бюджета до 15% |

## 4. Заключение

Современные подходы к имитационному моделированию РПС демонстрируют стремительный рост точности и возможностей. Их развитие идет по пути интеграции виртуальных прототипов с IoT и ML-технологиями, что позволяет реализовать концепцию цифровых двойников, максимально приближенных к реальности.

Перспективы развития связаны с созданием отраслевых стандартов, новых алгоритмов в области верификации и адаптивных систем машинного обучения. Комплексный подход, сочетающий базовые визуальные инструменты с высокотехнологичными платформами, предоставляет предприятиям гибкий и расширяемый инструмент для повышения эффективности и снижения рискованности проектов.

## Список литературы

1. Петров, А.М. Имитационное моделирование технологических систем и комплексов: учебное пособие для вузов / А.М. Петров, И.С. Беляев, О.Н. Демченко. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2025. – 112 с.

2. Данилов, Ю.А. Практическое использование NX / Ю.А. Данилов, И.В. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 288 с.
3. Григорьев, И.А. AnyLogic за три дня / И.А. Григорьев. – М.: AnyLogic, 2023. – 256 с.
4. Борщев, А.В. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 8 / А.В. Борщев, И.А. Григорьев. – AnyLogic Corporation, 2022. – 512 p.
5. Attajer A. Comparison of FlexSim and AnyLogic for Distributed Control Systems / A. Attajer, et al. // Journal of Simulation Engineering. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 123-138.
6. Официальный сайт AnyLogic. – URL: <https://www.anylogic.ru>.
7. Официальный сайт ROS. – URL: <http://www.ros.org>.
8. Веремчук, Н.С. Имитационное моделирование как инструмент экономического планирования производственных линий / Н.С. Веремчук // Вестник машиностроения. – 2025. – № 2. – С. 45-58.
9. Wang, J. Deep Learning-Based Dynamic Error Modeling and Compensation for Industrial Robots / J. Wang, et al. // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020.
10. Booyse, W. Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics / W. Booyse, et. al // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Vol. 140. – P. 106612.
11. McKinsey & Company. Digital twins: The foundation of the enterprise metaverse. – 2020.
12. Deloitte. Industry 4.0 and the digital twin: Manufacturing meets its match. – 2017.