



ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Е. А. Гайдук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Статья посвящена разработке унифицированного алгоритма построения имитационных моделей для поддержки принятия решений в условиях неопределенности. Предложен структурированный трехфазный алгоритм, включающий концептуально-аналитическую, реализационно-техническую и экспериментально-аналитическую фазы, обеспечивающий итерационный процесс разработки и верификации моделей. Особое внимание уделено методологии выбора и интеграции различных подходов моделирования в зависимости от целей исследования и характеристик системы.

Ключевые слова: имитационное моделирование, многоподходное моделирование, системный анализ, цифровые двойники.

Для цитирования:

Гайдук, Е. А. Формализация алгоритма построения имитационной модели / Е. А. Гайдук // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 5(48). – с. 95-100. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-95-100.

FORMALIZATION OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A SIMULATION MODEL

E. A. Gaiduk

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article is devoted to the development of a unified algorithm for constructing simulation models to support decision-making in conditions of uncertainty. A structured three-phase algorithm is proposed, which includes conceptual-analytical, implementation-technical and experimental-analytical phases, providing an iterative process of model development and verification. Special attention is paid to the methodology of selecting and integrating various modeling approaches, depending on the objectives of the study and the characteristics of the system.

Keywords: simulation modeling, multi-approach modeling, system analysis, digital twins.

For citation:

Gaiduk, E. A. Formalization of the Algorithm for Constructing a Simulation Model / E. A. Gaiduk // System analysis and logistics. – 2025. – № 5(48). – p. 95-100. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-95-100.

Введение

В условиях возрастающей сложности управленческих и инженерных задач в сферах логистики, производства и городского планирования, принятие решений сопряжено с высокой степенью неопределенности, обусловленной динамичностью и стохастичностью процессов. Традиционные аналитические методы не всегда способны адекватно отразить поведение нелинейных систем. Это усложняет выработку стратегий в условиях меняющейся внешней среды. Зачастую внедрение решений при недостаточной аналитике приводит только к ухудшению ситуации [1].

В этом контексте становится актуальным применение имитационного моделирования, так как оно позволяет воспроизводить поведение сложных систем в различных условиях. С его помощью исследователь может проводить эксперименты, невозможные в реальности [2]. В арсенале исследователя находятся три основных подхода, каждый из которых применяется для решения задач различного уровня абстракции и при различной структуре систем. Многоподходный метод, объединяющий их в рамках единой модели, позволяет моделировать систему более точно, отражая различные аспекты.

Целью данной статьи является разработка унифицированного алгоритма построения имитационной модели. В работе систематизируется опыт применения различных методов и анализируются стратегии управления неопределенностью. Предлагаемый алгоритм, охватывающий полный цикл работы над моделированием системы, призван структурировать процесс для минимизации рисков принятия ошибочных решений.



Алгоритм построения модели

Представленный на рисунке 1 алгоритм построения имитационной модели представляет собой структурированный процесс, организованный в три последовательные, но итерационно связанные фазы. Ключевой особенностью алгоритма является его цикличность — возможность возврата к предыдущим этапам по мере получения новой информации о системе, что обеспечивает постоянное уточнение и повышение адекватности модели. Алгоритм строится вокруг трех центральных фаз: концептуально-аналитической, реализационно-технической и экспериментально-аналитической. Переход между фазами осуществляется последовательно. Корректировать ранее принятые решения позволяют обратные связи. Такой подход отражает реальный исследовательский процесс, где первоначальные гипотезы и концепции могут пересматриваться на основе результатов формализации или верификации.

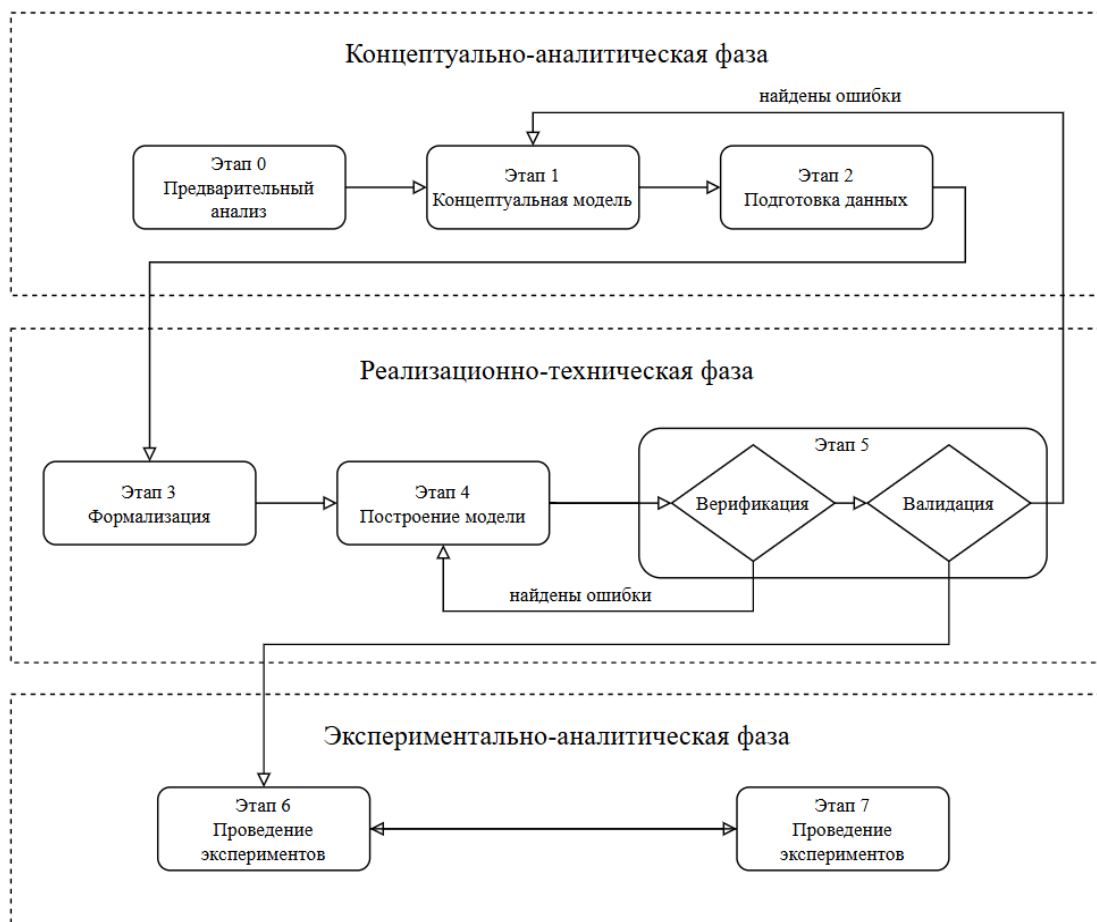


Рис. 1. Алгоритм построения имитационной модели

Концептуально-аналитическая фаза

Концептуально-аналитическая фаза — ключевой этап в создании имитационной модели, определяющий её адекватность и ценность. На этом этапе происходит переход от неструктурированных проблем к формализованному проекту модели, что требует системного анализа объекта.

Этап 0. Предварительный анализ и определение целей.

Начало работы над любой системой — формулировка проблемы и определение границ моделируемой системы. Без этого этапа разработка модели имеет мало смысла, так как без чёткой цели работы невозможно рационально оценить эффективность внедряемых решений [3]. На этом этапе формируется документация проекта. Она должна включать описание проблемы и обоснование имитационного моделирования, конкретные, измеримые и



практикоориентированные цели, определение границ системы и внешней среды, а также ключевые показатели эффективности для оценки результатов.

Этап 1. Разработка концептуальной модели.

Центральным элементом концептуально-аналитической фазы является создание концептуальной модели, которая представляет собой абстрактное описание системы с выбранным уровнем детализации. Для этого могут использоваться различные нотации: BPMN для описания бизнес-процессов, IDEF0 для функционального моделирования, UML — для объектно-ориентированного. В общем случае концептуальная модель должна включать описание основных структурных элементов системы и их взаимосвязей, характеристику потоков в системе, определение правил и алгоритмов поведения элементов системы [4].

После формирования концептуального представления системы осуществляется выбор методологии имитационного моделирования, наиболее подходящей целям исследования и характеристикам объекта. В практике имитационного моделирования выделяют три основных метода. Специалисту необходимо выбирать подход как опираясь на суть системы, так и на цели исследования. Агентное моделирование идеально подходит для анализа систем, глобальное поведение которых вытекает из взаимодействия множества автономных, принимающих решения агентов. Дискретно-событийное моделирование используется для анализа процессов, ориентированных на потоки объектов и оптимизацию использования ресурсов. Системная динамика применяется для стратегического моделирования сложных систем с непрерывными потоками. Сравнительный анализ подходов представлен в таблице 1. Для комплексного анализа многоуровневых систем все чаще применяется многоподходное моделирование, позволяющее интегрировать разные методы в рамках единой модели [5].

Таблица 1 – Сравнение методов имитационного моделирования

Критерий	Агентное моделирование		Дискретно-событийное моделирование		Системная динамика
	Микроуровень		Мезоуровень		Макроуровень
Уровень абстракции					
Основная сущность	Агент с автономным поведением		Событие, очередь		Поток, запас, обратная связь
Природа времени	Дискретная	или	Дискретная (по событиям)	(по	Непрерывная
Область применения	Рыночное поведение, распространение инноваций, пешеходные потоки		Логистические цепочки, производственные системы, больничные процессы		Долгосрочное стратегическое планирование, рыночная и отраслевая динамика
Сильные стороны	Учет гетерогенности и адаптивности агентов, эмерджентность		Высокая эффективность процессно-ориентированных систем		Учет сложных нелинейных обратных связей, стратегический взгляд
Слабые стороны	Вычислительная сложность при большом количестве агентов		Сложность учета индивидуального принятия решений		Высокий уровень агрегации, отсутствие индивидуальных сущностей



Этап 2. Подготовка и анализ данных.

Завершающий этап концептуально-аналитической фазы — работа с данными, которые необходимы для параметризации и последующей верификации концептуальной модели. Этот этап включает сбор и систематизацию исходных данных о системе, их анализ, определение законов распределения случайных величин, оценку качества и достаточности данных для решения поставленных задач. При нехватке эмпирических данных организуется работа с экспертами для получения качественных оценок параметров системы.

Реализационно-техническая фаза

Реализационно-техническая фаза представляет собой процесс перехода от концептуального проекта к функционирующей и корректной имитационной модели. Данная фаза включает формализацию модели, её построение и проверку на адекватность, что в совокупности формирует основу для получения достоверных результатов в ходе последующих экспериментов.

Этап 3. Формализация модели.

На этапе формализации концептуальное описание системы преобразуется в строгие математические и логические конструкции для однозначной интерпретации и программной реализации. Формализация позволяет перейти от качественного описания к количественному анализу. Определяются типы и отношения сущностей, формализуются правила их взаимодействия и подбирается математический аппарат. Для разных систем это могут быть системы дифференциальных уравнений, графы процессов или описание поведения агентов. В сложных системах эффективно разбивать процесс на подпроцессы и анализировать каждый из них отдельно.

Этап 4. Построение имитационной модели

Этап построения модели заключается в программной реализации формализованного описания. Важным аспектом является выбор инструментария, определяемого сложностью модели, требуемой производительностью и необходимостью визуализации. В случае многоподходного моделирования сложных систем можно применить Anylogic, так как он позволяет совмещать несколько методов в рамках одного инструмента, а также гибко настраивать базовые блоки.

Этап 5. Верификация и валидация модели.

Заключительная часть реализационно-технической фазы включает проверку корректности и адекватности модели: верификацию и валидацию. Если верификация отвечает на вопрос «Правильно ли мы построили модель?», то валидация — на вопрос «Правильную ли модель мы построили?». Верификация проверяет техническую корректность программной реализации, отсутствие ошибок и логических противоречий через отладку и тестирование. При ошибках, найденных на этом этапе, необходимо вернуться на этап построения имитационной модели [6]. Валидация оценивает соответствие поведения модели реальной системе, используя сравнение с историческими данными, экспертный анализ и проверку на крайних значениях параметров. Если проблемы обнаружены здесь, то необходимо переработать концептуальную модель.

Экспериментально-аналитическая фаза

Экспериментально-аналитическая фаза — это заключительный этап исследования, в ходе которого осуществляется практическое применение разработанной имитационной модели и извлечение знаний о поведении системы в различных условиях. Данная фаза объединяет планирование и проведение вычислительных экспериментов с последующей интерпретацией результатов. На этом этапе исследователь формирует методологическую основу для обоснования управленческих решений.



Этап 6. Планирование и проведение экспериментов

Качество и достоверность результатов имитационного исследования напрямую зависят от корректного планирования эксперимента. Согласно подходу Клейна [7], успешное планирование включает в себя выявление ключевых факторов, определение диапазонов их изменения и разработку стратегии проведения прогонов модели. На данном этапе формулируются конкретные исследовательские гипотезы, подлежащие проверке, и выбираются соответствующие методы планирования эксперимента - от простого однофакторного анализа до сложных многофакторных схем.

Аспект, на который исследователь должен обратить особое внимание — определение необходимого количества прогонов модели для обеспечения статистической значимости результатов, что особенно актуально для стохастических систем с высокой вариативностью выходных параметров.

Этап 7. Анализ результатов и выработка решений

Анализ результатов имитационного эксперимента включает статистическую обработку данных, их интерпретацию и формулировку практических рекомендаций. Основной целью является не только определение итоговых значений параметров, но и оценка точности полученного результата. Для выполнения этих целей аналитик может применять методы дисперсионного и регрессионного анализа, визуализацию данных.

Результаты эксперимента интерпретируются в контексте исходных целей исследования. На основе этой информации формулируются конкретные рекомендации для лиц, принимающих решения. Особенно важна оценка рисков реализации предлагаемых решений.

Заключение

Проведенное исследование предлагает систематизированный подход к процессу построения имитационных моделей, который может быть полезен исследователям и практикам в различных областях. Разработанный алгоритм служит структурной основой для организации проектов имитационного моделирования, обеспечивая последовательное прохождение всех необходимых этапов — от первоначального анализа проблемы до интерпретации результатов. Работа структурирует процесс имитационного моделирования, что может способствовать разработке единых стандартов в данной области. Предлагаемый алгоритм может служить руководством при планировании и реализации проектов, связанных с созданием имитационных моделей сложных систем.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на апробацию предложенного алгоритма в различных предметных областях, а также на разработку специализированных методик для отдельных классов задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hubbard, D. W.* The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It. 2nd Edition / D. W. Hubbard. – E.: John Wiley and Sons, 2020. – 301 p.
2. *Borshchev A.* The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6 / A. Borshchev. – B.: AnyLogic North America, 2013. – 612 с.
3. *Sterman J.* Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World / J. Sterman. – M.: Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division Working Paper Series, 2002. – С. 1-20.
4. *Гайдук Е. А.* Концептуальная модель пересадочного узла с применением цифровых технологий / Е. А. Гайдук, А. А. Силина, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 2(45). – С. 121-132. – DOI 10.31799/2077-5687-2025-2-121-132.
5. *Попков Т. В.* Многоподходное моделирование: практика использования // 4-я



Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию ИММОД 2009. – СПб., 2009. – С. 62-67.

6. *Исаева О. С.* Метод структурно-графического анализа и верификации интеллектуальной имитационной модели / О. С. Исаева, Н. В. Кулясов, С. В. Исаев // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 50. – С. 79-88. – DOI 10.17223/19988605/50/10.
7. *Jack P. C.* Kleijnen Design and Analysis of Simulation Experiments. 2nd Edition. / P. C. Jack – Switzerland: Springer Cham, 2015. – 322 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гайдук Елена Александровна

Студент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gaiduk Elena Alexandrovna

Student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

Дата поступления: 01.12.2025

Дата принятия: 02.12.2025