

**Краснобаев Дмитрий Алексеевич**, аспирант, Российский университет  
транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва

**СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ: ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ И СРЕД  
РАЗРАБОТКИ**

**Аннотация.** В статье подробно рассматриваются основы имитационного моделирования, его ключевые концепции и области применения. Описаны основные методологии моделирования: системная динамика, агентное моделирование и дискретно-событийный подход, которые позволяют воспроизводить поведение систем различной природы – от производственных процессов и логистических цепочек до социальных и экономических структур. Рассматриваются такие среды имитационного моделирования, как GPSS Studio, Arena и AnyLogic, каждая из которых обладает уникальными функциональными возможностями и подходит для решения специфических задач. Рассмотрены преимущества и наиболее частые области применения данных сред разработки.

**Annotation.** The article provides a detailed overview of the fundamentals of simulation modeling, its key concepts, and areas of application. It describes the main modeling methodologies: system dynamics, agent-based modeling, and discrete-event simulation, which enable the reproduction of the behavior of systems of various types – from production processes and logistics chains to social and economic structures. The article examines simulation environments such as GPSS Studio, Arena, and AnyLogic, each of which offers unique functionalities and is suitable for solving specific tasks. The advantages and the most common application areas of these development environments are also discussed.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, GPSS Studio, AnyLogic, цифровое моделирование

**Keywords:** simulation modeling, GPSS Studio, AnyLogic, digital modeling

При изучении систем массового обслуживания долгое время наиболее действенным считался аналитический подход, при котором описание динамики функционирования СМО производится на основе математической модели и представляет собой совокупность формул, уравнений, определяющих характеристики состояний системы в зависимости от ее параметров. Когда система имеет сложную структуру с большим количеством взаимосвязанных переменных либо содержит случайные или стохастические элементы, аналитический метод может оказаться неприменимым из-за чрезмерной сложности математических расчетов. В этом случае более целесообразным становится использование имитационного моделирования.

Имитационное моделирование может рассматриваться как частный случай математического моделирования, при котором модель разрабатывается на базе алгоритмов и средств программирования, а не математических формул, и представляет собой описание логики функционирования исследуемой системы, взаимодействия её базовых компонентов во времени, с учетом наиболее существенных причинно-следственных связей.

В настоящее время методы имитационного моделирования находят применение в разнообразных сферах человеческой деятельности. Исследования с применением различных методов моделирования проводятся в таких областях, как: производство, экономика и финансы, бизнес-процессы, логистика и цепи поставок, транспорт, медицина и здравоохранение, образование, ИТ-инфраструктура, социальные процессы.

Имитационное моделирование применяет широкий спектр методов, каждый из которых применяется в зависимости от характера системы, которую нужно смоделировать. Среди них можно выделить несколько основных концепций: системная динамика, агентное моделирование, дискретно-событийное моделирование.

Основной идеей системной динамики является понимание системы как целостной сущности, а не как совокупности отдельных элементов. В связи с этим, данный метод применяется для изучения поведения сложных систем, рассматривая составляющие элементы только с точки зрения влияния на систему в целом и опуская их индивидуальные характеристики.

Метод системной динамики предусматривает построение графических диаграмм причинных связей, также известных как "карты причинно-следственных связей" или "диаграммы влияния". Затем, на основе этих диаграмм создается компьютерная модель, имитирующая динамику системы [3].

На рисунке 1 представлена структура модели системной динамики.

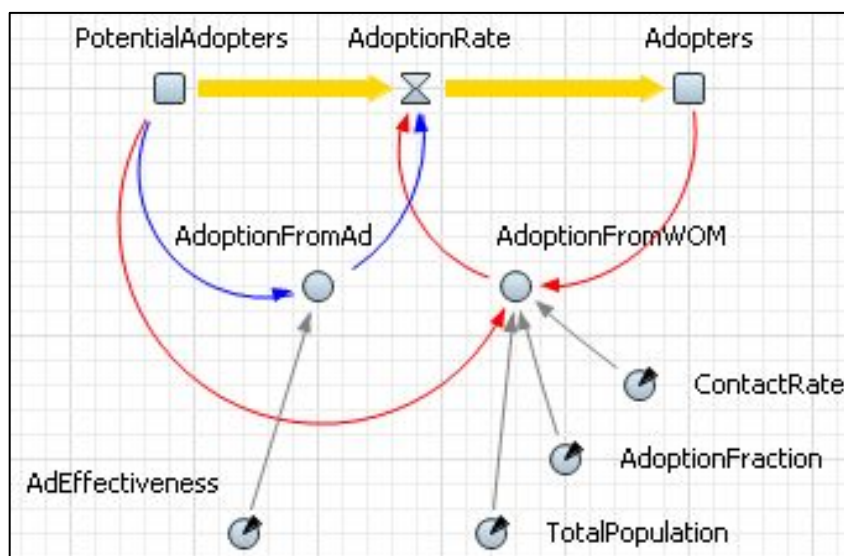


Рисунок 1 – Структура модели системной динамики

Системная динамика оперирует на высоком уровне абстракции, уделяя внимание разработке и принятию стратегических решений, касающихся долгосрочных целей и направлений развития организации или системы.

Данный метод используется таких областях, как энергетика, экология, биология, управление ресурсами и др.

Агентное моделирование – это метод, в котором система рассматривается как совокупность агентов, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой. В контексте моделирования агент определяется как некая сущность, обладающая активностью и автономным поведением. Агенты

способны адаптироваться к изменениям в окружающей среде и изменять свое поведение и стратегии в соответствии с новыми условиями [5].

В отличие от метода системной динамики, агентное моделирование используется для изучения систем, в которых динамика функционирования определяется не глобальными правилами, а индивидуальной активностью объектов, находящихся в системе.

Модель представляет собой комплекс взаимодействующих сущностей, каждая из которых оказывает воздействие на формирование системы в целом. На рисунке 2 представлена структура агентной модели.

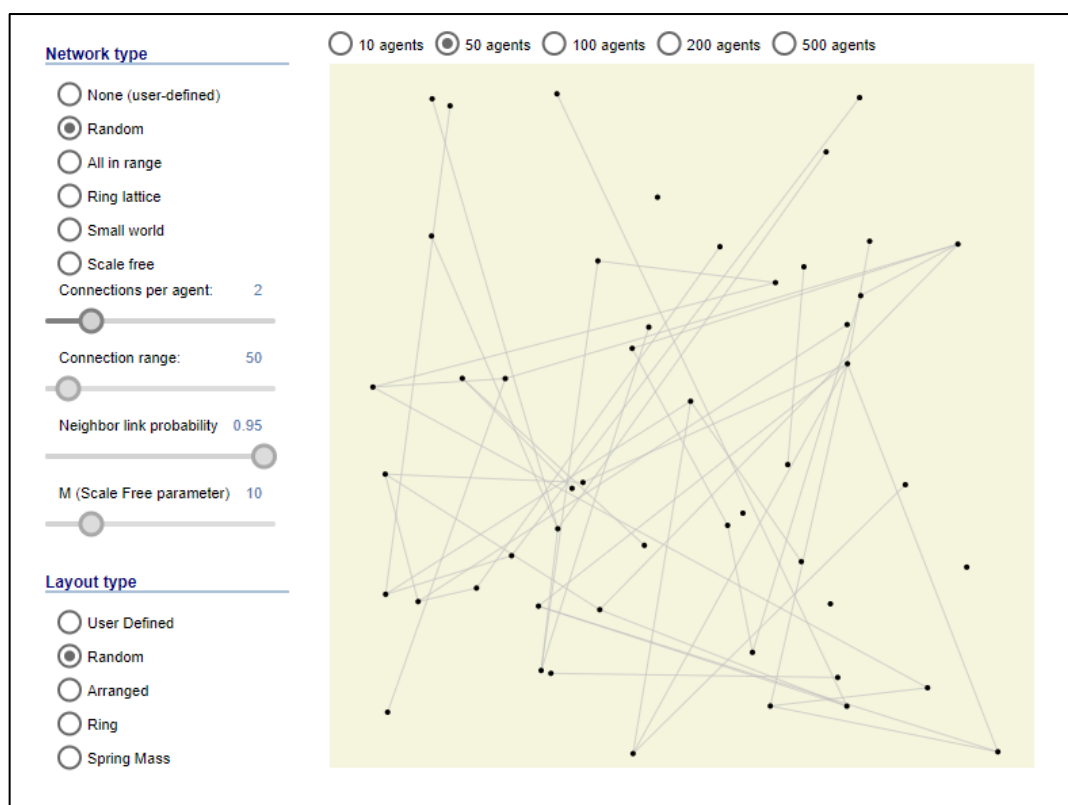


Рисунок 2 – Структура агентной модели

Метод агентного моделирования используется для оптимизации использования ресурсов и процессов в системах с множеством взаимодействующих автономных агентов. Такие системы часто встречаются в сфере транспорта, поэтому рассматриваемый метод может быть использован для моделирования транспортных потоков, оптимизации маршрутов и управления транспортными сетями.

Дискретно-событийное моделирование (Discrete-Event Simulation, DES) является одним из наиболее распространенных методов. Модели, создаваемые при данном подходе, характеризуются следующими признаками:

- динамические, то есть изменяющиеся во времени;
- дискретные – изменение состояния системы происходит мгновенно, в конкретные моменты времени;
- стохастические – состояния системы связаны с случайными или вероятностными явлениями.

Все эти признаки определяют дискретно-событийное моделирование как наиболее эффективный метод для моделирования и анализа систем массового обслуживания, так как они характеризуются такими дискретными событиями, как прибытие заявок в систему, а также начало и завершение их обслуживания. Помимо этого, данный метод позволяет моделировать очереди ожидания, что дает возможность оценить такие параметры, как среднее время ожидания, пропускная способность системы, эффективность использования ресурсов.

Данный тип моделирования используется при среднем и низком уровне абстракции, когда значительная часть детальных параметров не принимается во внимание, но при этом каждый объект, входящий в состав системы, рассматривается отдельно от других.

Система изображается в виде потоковой диаграммы (блок-схемы), где каждый блок представляет собой определенный элемент системы, отражающий последовательность операций (например, прибытие, задержка) над агентами, представляющими клиентов, транспортные средства и т.п. На рисунке 3 представлена структура дискретно-событийной модели.

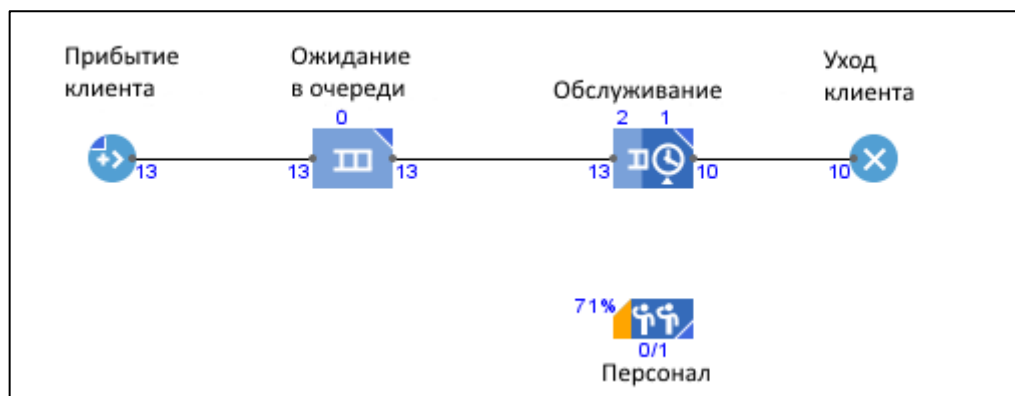


Рисунок 3 – Структура дискретно-событийной модели

Дискретно-событийное моделирование позволяет моделировать различные сценарии, а также проводить подробный статистический анализ производительности системы и оценивать показатели её работы [2].

Следует отметить, что выбор наиболее подходящего вида имитационного моделирования зависит от конкретных характеристик изучаемой системы, включая такие показатели, как: тип системы, наличие случайных переменных, наличие очередей и ресурсов и т.д [4].

Одним из наиболее важных этапов процесса имитационного моделирования является выбор программного обеспечения. Рассмотрим наиболее распространенные среды разработки имитационных моделей.

GPSS (General Purpose Simulation System) – это общецелевая система моделирования, в основу которой положен язык имитационного моделирования, разработанный американским инженером Дж. Гордоном. Среда GPSS позволяет моделировать как дискретные, так и непрерывные процессы, предоставляет широкий набор инструментов для анализа результатов моделирования, включая статистические отчеты, графики и визуализацию данных. Данная система имеет несколько версий, которые отличаются по функциональности и возможностям.

GPSS Studio является современной, расширенной версией GPSS с удобным, наглядным интерфейсом. Данное программное обеспечение разработано отечественной компанией ООО «Элина-Компьютер».

Система GPSS Studio предназначена для профессионального моделирования сложных систем и процессов в таких областях, как производство, логистика, транспорт, здравоохранение, финансы и др [1].

Arena – программное обеспечение, созданное компанией Systems Modeling Corporation, является одним из наиболее эффективных инструментов имитационного моделирования. Программа имеет широкий набор средств управления и инструментов, используемых для построения моделей. Модули в Arena могут принимать очень сложные формы, потому создание имитационных моделей требует предварительного глубокого анализа моделируемых бизнес-процессов. Данная программная среда формирует отчеты по объектам, находящимся в системе, образующимся очередям, задействованным ресурсам и другим показателям.

Arena предоставляет оптимальную среду для моделирования дискретно-событийных систем, таких как производственные линии, системы обслуживания и процессы в снабжении.

AnyLogic – это мощное программное обеспечение, разработанное компанией The AnyLogic Company, которое обладает рядом особенностей, делающих его одним из самых популярных инструментов для имитационного моделирования [6].

Основная специфика AnyLogic заключается в том, что данная среда позволяет моделировать системы с использованием различных методов, включая дискретно-событийное, агентное и системно-динамическое моделирование, а также любую комбинацию этих подходов в пределах одной модели. Это позволяет создавать более полные и реалистичные модели, учитывающие разнообразные аспекты функционирования системы. Кроме того, AnyLogic обладает удобным графическим интерфейсом, широким набором инструментов для создания моделей и анализа результатов, а также возможностью интеграции с другими системами и языками программирования.

Благодаря этим особенностям, AnyLogic позволяет эффективно моделировать и анализировать самые разнообразные системы в различных отраслях, включая производство, логистику, здравоохранение, транспорт и многое другое.

В целом, современные подходы к разработке программного обеспечения для имитационного моделирования в первую очередь ориентированы на удобство использования и эффективность созданной модели. Также учитываются возрастающие требования к точности моделирования, скорости расчетов и визуализации результатов. С развитием вычислительных технологий и появлением новых инструментов для анализа данных, имитационное моделирование становится еще более доступным и действенным. Это открывает новые возможности для применения данного подхода в широком спектре областей.

#### **Список литературы**

1. Девятков, В. В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO : учебное пособие / В.В. Девятков, Т.В. Девятков, М.В. Федотов ; под общ. ред. В.В. Девяткова. — Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2024. — 283 с. - ISBN 978-5-9558-0595-5.
2. Кузьмин, Д. В. Дискретно-событийная имитационная модель работы перекрестка / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова // Академик Владимир Николаевич Образцов - основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2021. – С. 487-497. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65. – EDN TJOCUB.
3. Лебедева Л. Н. Имитационное моделирование как инструмент эффективного управления цепочкой поставок // Московский экономический журнал. – 2021. – №. 5. – С. 436-441.

4. Малыгина С. Н., Неупокоева Е. О. Обзор современных средств имитационного моделирования // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 13. – №. 2. – С. 134-143.
5. Минязев А. И. Агентно-ориентированный подход в имитационном моделировании // E-Scio. – 2020. – №. 8 (47). – С. 196-201.
6. Рыжова П. А., Заревич А. И. Моделирование логистических систем в среде AnyLogic // Новые аспекты моделирования систем и процессов. – 2023. – С. 427-434.

### **References**

1. Devyatkov, V. V. Simulation studies in the GPSS STUDIO modeling environment: a tutorial / V. V. Devyatkov, T. V. Devyatkov, M. V. Fedotov; edited by V. V. Devyatkov. - Moscow: University textbook: INFRA-M, 2024. - 283 p. - ISBN 978-5-9558-0595-5.
2. Kuzmin, D. V. Discrete-event simulation model of intersection operation / D. V. Kuzmin, V. V. Baginova // Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov - the founder of transport science: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021. - Moscow: Russian University of Transport, 2021. - Pp. 487-497. - DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65. - EDN TJOCUB
3. Lebedeva L. N. Simulation modeling as a tool for effective supply chain management // Moscow Economic Journal. - 2021. - No. 5. - P. 436-441.
4. Malygina S. N., Neupokoeva E. O. Overview of modern simulation tools // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 134–143.
5. Minyazev A. I. Agent-based approach in simulation modeling // E-Scio. - 2020. - No. 8 (47). - P. 196-201.
6. Ryzhova P. A., Zarevich A. I. Modeling of logistics systems in the AnyLogic environment // New aspects of modeling systems and processes. - 2023. - P. 427-434.