

На правах рукописи

Гаджимирзаев Шамиль Мусиевич

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
СОБЫТИЙНОГО ПОДХОДА**

Специальность 1.2.2.

Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

**Пашков Руслан Анатольевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Защита состоится 25 декабря 2025 года в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ФПМИ.1.2.2.062, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех) по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ, Физтех и на сайте организации <https://mipt.ru>.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент

Войтиков К.Ю.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Создание новых математических методов моделирования объектов и явлений и универсальной платформы имитационного моделирования на их основе является крайне актуальной задачей в условиях возрастающей сложности современных систем управления. Такая платформа позволяет исследовать и оптимизировать поведение сложных систем в производстве, логистике, здравоохранении и других областях, где необходимо учитывать множество взаимосвязанных параметров и стохастических факторов. Она предоставляет возможность безопасного тестирования решений и оценки их последствий без риска для реальных объектов, что особенно критично для работы ключевых инфраструктур.

Платформа позволяет проводить глубокий анализ различных сценариев, помогая сокращать издержки, точно определять необходимое количество ресурсов и предотвращать простои. Кроме того, она ускоряет процесс принятия обоснованных решений за счёт визуализации данных и сравнительного анализа альтернативных стратегий.

Важную роль такая платформа играет в сфере образования и научных исследований, предоставляя возможность апробации гипотез и обучения без развёртывания дорогостоящих реальных систем. В условиях нестабильной внешней среды она также становится инструментом для моделирования кризисных сценариев и разработки упреждающих мер, что повышает устойчивость и конкурентоспособность организаций.

Таким образом, разработка платформы имитационного моделирования отвечает потребностям современных организаций в эффективных инструментах для анализа, прогнозирования и принятия решений в условиях высокой неопределённости и динамично меняющейся обстановки.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретические основы дискретно-событийного моделирования можно считать достаточно разработанными. Существует обширный пласт работ, посвящённых методу Монте-Карло, процессно-ориентированному подходу, теории массового обслуживания и системной динамике. Разработаны математические

методы оптимизации, включая симплекс-метод и алгоритмы линейного программирования.

Однако, архитектурные решения для моделирования разнородных предметных областей на единой платформе требуют дополнительного исследования. Практические аспекты реализации высокопроизводительных систем, включая эффективные структуры данных для управления очередями событий и механизмы минимизации накладных расходов на синхронизацию, разработаны недостаточно.

Целью данной работы является разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений, основанных на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий в модели с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий а также программная реализация таких методов и проведение вычислительного эксперимента полученного комплекса программ для нескольких выбранных предметных областей: складской логистики, управления поддержанием готовности участка дорожной сети, анализа динамики рынка информационных технологий Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать существующие подходы к дискретно - событийному моделированию больших систем, описываемых большим количеством событий с высокой плотностью событий во времени.
2. Разработать новые математические методы моделирования больших систем на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий в модели с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий.
3. Разработать архитектуру платформы и ее программную реализацию для моделирования больших систем на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий в модели с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий.

4. На основе разработанной платформы реализовать эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента по изучению динамики российской отрасли информационных технологий.
5. На основе разработанной платформы реализовать эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента по поддержанию готовности участка дороги инженерным подразделением.
6. На основе разработанной платформы реализовать эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента поведения полностью роботизированного склада с стеллажами глубокого хранения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Масштабируемая математическая модель для больших систем, основанная на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий в модели с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий.
2. Новые математические методы моделирования больших систем с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий.
3. Разработаны эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента по изучению динамики российской отрасли информационных технологий.
4. Разработаны эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента по поддержанию готовности участка дороги инженерным подразделением.
5. Разработаны эффективные численные методы и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для

проведения вычислительного эксперимента поведения полностью роботизированного склада с стеллажами глубокого хранения.

### **Научная новизна:**

1. Впервые предложен и формализован универсальный алгоритмический подход для децентрализованного дискретно-событийного моделирования систем с активными агентами, основанный на совместном использовании децентрализованного планирования с локальными очередями ближайших событий (Decentralized Event Scheduling with Local Next-Event Queues).
2. Впервые разработаны и строго обоснованы эффективные численные методы реализации данного подхода, обеспечивающие для широкого класса NP-трудных задач планирования и управления алгоритм ленивой синхронизации и перепланирования событий.
3. Для ряда прикладных задач показано, что предложенный и программно реализованный массив алгоритмов является универсальной и эффективной основой для построения масштабируемых дискретных имитационных моделей принципиально разных сложных систем.

**Практическая значимость** результатов диссертации прямо связана с широким спектром задач, возникающих при изучении и оптимизации масштабируемых систем, описываемых большим количеством событий с высокой плотностью событий во времени. Основными направлениями применения решений являются задачи в области обороны и безопасности, промышленности, транспорта и логистики. Практическая значимость подтверждается применимостью комплекса программ, разработанного на основе этих методов на практике. Это подтверждено практическим применением разработанного комплекса программ при решении задачи мониторинга времени обслуживания авиапассажиров в очередях на территории АО «Международный аэропорт Шереметьево», решении задач управления логистикой в АО «Почта России» а также при выполнении НИР «Создание комплекса программно-аппаратных средств для автономного безэкипажного судовождения» выполняемого в Московском физико -

техническом институте в рамках программы НТИ по искусственному интеллекту.

На разработанное решение получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685504 от 23.09.2025г. *Афанасенко Т.С., Хельвас А.В., Цыбулько Е.А., Гаджимирзаев Ш.М., Пашков Р.А.* Программа дискретного событийного имитационного моделирования SOCCOS.DES

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается аналитическими расчетами и результатами вычислительных экспериментов, полученными с помощью разработанных алгоритмов и комплекса программ. Теоретическую и методологическую основу проведенных разработок и исследований составили труды отечественных и зарубежных авторов в области дискретно - событийного моделирования больших систем, а также технические решения, созданные и опубликованные в российских и зарубежных патентах и свидетельствах на изобретения РФ. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

1. Международной конференции 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Mohammedia, Morocco, May 2023

2. Международной конференции Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0/5.0 (ARCI' 2025): 5th IFSA Winter Conference, GRANADA, SPAIN

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях[1–4], 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1; 2].

**Личный вклад.** Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем:

[1] – разработка программных модулей, подготовка и проведение вычислительных экспериментов и анализ и интерпретация результатов;

[2] – разработка алгоритмов и программных модулей, проведение вычислительных экспериментов, интерпретация и анализ результатов;

[3] – постановка задач, проведение вычислительных экспериментов, интерпретация результата и анализ результатов;

[4] анализ существующих решений, разработка модели, интерпретация результата и анализ результатов.

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена постановке задачи на разработку алгоритмов дискретного моделирования и их программную реализацию. Приведено формальное описание постановки задачи на разработку новых математических методов моделирования больших систем на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий в модели с использованием локальных очередей ближайших событий и избирательной перепланировки событий. Перечислены функциональные и нефункциональные требования к комплексу проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента в ряде прикладных областей.

Вторая глава посвящена теоретическим основам дискретного моделирования, его историческому развитию и ключевым проблемам, связанным с временными ограничениями. Дискретное моделирование представляет собой метод имитации систем, изменяющих состояние в конкретные моменты времени, а не непрерывно. Его становление в середине XX века связано с работами таких учёных, как Джон фон Нейман, Станислав Улам, разработавших метод Монте-Карло, Леонида Канторовича и Джорджа Данцига, заложивших основы линейного программирования, Джеффри Гордона, создавшего первый специализированный язык моделирования GPSS, а также Роберта Шеннона, систематизировавшего теорию в данной области. Значительный вклад в развитие подходов, особенно в рамках теории массового обслуживания, внесли также советские исследователи Андрей Колмогоров и Борис Гнеденко.

Центральной проблемой, рассматриваемой в работе, являются фундаментальные ограничения, связанные с минимальным разрешённым интервалом времени в системе ( $\Delta T$ ). Для решения проблем синхронизации и обеспечения причинно-следственной согласованности событий в распределённых системах используется концепция виртуального времени, введённая Дэвидом Джефферсоном. Виртуальное время acts как глобальная координата, назначаемая событиям и сообщениям, и позволяет управлять порядком их выполнения. Основные правила требуют, чтобы виртуальное время отправки сообщения было меньше времени его получения, а события в рамках одного процесса были упорядочены по возрастанию виртуального времени.

Для практической реализации виртуального времени и обработки ситуаций, когда сообщения поступают получателю в неправильном порядке, используется оптимистичный алгоритм синхронизации Time Warp. Его ключевой механизм — откат состояния процесса и аннулирование ошибочных побочных эффектов с помощью антисообщений — позволяет системе асинхронно продвигаться вперёд, корректируя нарушения причинности по мере их обнаружения. Важную роль играет понятие глобального виртуального времени (GVT), которое монотонно возрастает и отмечает рубеж, после которого события считаются завершёнными и необратимыми. GVT используется для управления памятью, обнаружения завершения моделирования и безопасного выполнения операций ввода-вывода.

Рассматривается применение этих концепций в параллельной дискретно-событийной модели (PDES), целью которой является ускорение имитации за счёт распределения вычислений. Модель представляется как набор логических процессов, взаимодействующих через сообщения. Для минимизации количества отказов используется механизм lookahead, позволяющий процессу безопасно планировать события на некоторый интервал вперёд. Аналитически показано, что вероятность коллизий «одновременных» событий, описываемая распределением Пуассона, снижается с уменьшением интервала  $\Delta T$ , что повышает устойчивость моделирования.

Таким образом, в главе сформирован теоретический фундамент, охватывающий историю, области применения, ключевые проблемы и методы

синхронизации в дискретном моделировании, фокусируясь на преодолении ограничений, связанных с временными интервалами и параллельным выполнением.

В третьей главе приведено описание универсального набора алгоритмов реализованных в виде программной платформы, для децентрализованного дискретно-событийного моделирования, основанного на принципах ленивого обновления состояний и децентрализованного планирования событий.

Перечислим ключевые компоненты входящие в составе архитектуры решения.

**FastAbstractObject** Базовый класс для всех моделируемых объектов. Состоит из двух методов. Первый метод осуществляет обновление состояния моделируемого объекта и второй метод, который осуществляет отбор ближайшего события данного объекта. Объектов может быть множество, Каждый, из которых могут иметь свой набор состояний в зависимости от произошедшего события, которое повлияло на изменение состояния.

```
public abstract class FastAbstractObject {
    public string uid = Guid.NewGuid().ToString();
    public double lastUpdated;

    public abstract (double, FastAbstractEvent) getNearestEvent();
    public abstract void Update(double timeSpan);
}
```

**FastAbstractEvent** Абстракция для событий, изменяющих состояние системы. Состоит из одного метода, который осуществляет исполнение события.

```
public abstract class FastAbstractEvent {
    public string objId = null;

    public abstract void runEvent(
        FastAbstractWrapper wrapper,
        double timeSpan
```

```
);  
}
```

Движок симуляции, управляющий временем и очередью событий. Состоит из нескольких методов, которые осуществляют отбор, добавление, удаление, получение и фильтрацию объектов для корректного запуска симуляции.

```
public abstract class FastAbstractWrapper {  
    protected Dictionary<string, FastAbstractObject> objects;  
    protected SortedList<double, FastAbstractEvent> eventList;  
    protected Dictionary<string, double> objectsEventTime;  
    public double updateTime;  
    private HashSet<string> objectsKeyForUpdate;  
  
    public bool Next() { ... }  
    public void addObject(FastAbstractObject obj) { ... }  
    protected double AddEvent(...) { ... }  
}
```

Ленивое обновление состояний объектов представляет собой фундаментальный принцип оптимизации в дискретно-событийном моделировании, который кардинально меняет традиционный подход к управлению состоянием системы. В отличие от классической парадигмы, где состояние всех объектов системы пересчитывается синхронно перед обработкой каждого события, ленивое обновление предполагает отложенный, по требованию, пересчет состояния объектов только в те моменты, когда они реально вовлекаются в текущие процессы моделирования.

Философия этого подхода основана на наблюдении, что в сложных системах с большим количеством объектов большинство событий затрагивает лишь небольшую часть от общего множества объектов. Поэтому постоянное глобальное обновление всех состояний становится крайне неэффективной операцией, потребляющей значительные вычислительные ресурсы без реальной необходимости. Ленивое обновление решает эту проблему через внедрение строгой инкапсуляции объектов и системы контролируемого доступа к ним.



Рис. 1 — Схема работы алгоритма симуляции

Техническая реализация этого принципа в платформе SOCCOS.DES построена вокруг специализированного метода `getObject`, который выступает в роли единственного легального способа получения доступа к объектам модели. Когда какой-либо компонент системы нуждается в обращении к конкретному объекту, он вынужден использовать этот метод, который выполняет критически важную двухэтапную операцию. На первом этапе метод инициирует актуальное обновление состояния запрашиваемого объекта, гарантируя, что все его параметры соответствуют текущему модельному времени. На втором этапе идентификатор объекта заносится в специальный набор объектов, предназначенных для последующего перепланирования событий.

Таким образом, ленивое обновление состояний объектов является не просто техническим приемом оптимизации, а стратегическим архитектурным решением, которое переопределяет принципы управления состоянием в дискретно-событийных моделях. Его внедрение в платформу SOCCOS.DES позволило преодолеть принципиальные ограничения классических методов моделирования и обеспечить практическую возможность имитации сверхсложных систем с тысячами активных агентов и экстремальной плотностью событий во времени.

Ключевым элементом реализации является ограничение доступа к объектам: получить объект можно только через метод `getObject`. Этот метод выполняет обновление состояния запрашиваемого объекта и добавляет его ключ в специальный список для последующего обновления связанных событий.

```
public FastAbstractObject getObject(string key)
{
    var obj = objects[key];
    obj.Update(updatedTime);
    objectsKeyForUpdate.Add(key);
    return obj;
}
```

Локальное перепланирование событий представляет собой стратегию оптимизации в дискретно-событийном моделировании, которая минимизирует издержки, связанные с корректировкой расписания будущих событий системы. Этот подход основан на ключевом наблюдении: при наступлении большинства событий в модели лишь небольшая часть объектов требует актуализации своих будущих событий, в то время как расписание остальных объектов остается неизменным и достоверным.

Традиционные системы моделирования часто прибегают к глобальному перепланированию — масштабной операции, которая затрагивает все объекты системы независимо от того, были ли они затронуты последними событиями. Такой подход порождает значительные вычислительные издержки, особенно в моделях с большим количеством объектов, где операции с очередями событий имеют логарифмическую или даже линейную сложность. Локальное перепланирование преодолевает эту проблему за счет избирательного подхода к обработке изменений в расписании событий.

Техническая реализация локального перепланирования в платформе SOCCOS.DES построена вокруг двух взаимосвязанных структур данных и строгого протокола взаимодействия. Основным механизмом отслеживания объектов, требующих перепланирования, выступает специализированный набор `objectsKeyForUpdate`, который аккумулирует идентификаторы

объектов, чье состояние было изменено в процессе обработки текущих событий. Этот набор формируется неявно в процессе работы системы — каждый раз, когда объект запрашивается через метод `getObject`, его идентификатор автоматически добавляется в эту коллекцию, что указывает на потенциальную необходимость пересмотра его будущих событий.

Критически важным элементом архитектуры является метод `Next()`, который выполняет функцию координатора процесса перепланирования. После завершения обработки каждого события этот метод анализирует содержимое набора `objectsKeyForUpdate` и инициирует процедуру перепланирования только для тех объектов, которые действительно были затронуты изменениями. Для каждого такого объекта система вызывает метод `getNearestEvent()`, который возвращает временную метку и содержание следующего события, после чего эта информация интегрируется в общую очередь событий модели.

Эффективность данного подхода обеспечивается за счет использования оптимизированных структур данных. Упорядоченный список `eventList`, организованный по временным меткам, обеспечивает быструю вставку новых событий и поддержание временной последовательности. Параллельно словарь `objectsEventTime`, устанавливающий соответствие между объектами и их ближайшими запланированными событиями, позволяет осуществлять операции обновления за время, близкое к константному. Эта комбинация структур делает процесс перепланирования высокоэффективным даже при работе с тысячами объектов.

Преимущества локального перепланирования становятся особенно очевидными в сценариях с высокой плотностью событий, где традиционные подходы демонстрируют неприемлемую производительность. В модели логистического оператора, обрабатывающей миллионы событий в сутки, избирательный характер перепланирования позволил сократить накладные расходы на синхронизацию между тысячами независимых объектов и добиться линейного масштабирования производительности при увеличении сложности модели.

Для реализации локального перепланирования событий в абстрактном классе `FastAbstractWrapper` используется структура данных `HashSet objectsKeyForUpdate`. При каждом обращении к объекту через

метод `getObject` его ключ помещается в этот набор. После обработки текущего события набор анализируется в методе `Next()`, что позволяет перепланировать события только для тех объектов, которые были фактически затронуты.

Эффективность обновления обеспечивается двумя основными структурами данных:

**eventList**: упорядоченный список, где ключом является время, а значением — событие. Эта структура оптимизирована для быстрой вставки и поддержания временного порядка событий.

**objectsEventTime**: словарь, который связывает объект с его ближайшим запланированным событием. Это позволяет обновлять события для конкретного объекта за время, близкое к  $O(1)$ .

Данный подход позволяет оптимизировать ресурсы моделируемой системы. Вместо того, чтобы обходить все объекты и переходить по каждому событию каждого объекта, мы ссылаемся на некоторый набор данных.

Децентрализованное планирование событий представляет собой архитектурный принцип дискретно-событийного моделирования, который перераспределяет ответственность за генерацию и управление событиями от централизованного координатора к отдельным объектам модели. Этот подход фундаментально меняет парадигму управления временем в имитационных системах, преобразуя ее из монолитной централизованной структуры в распределенную экосистему, где каждый активный объект обладает автономией в определении своего временного развития.

В традиционных системах дискретно-событийного моделирования централизованный планировщик выступает в роли единственного источника истины о временной эволюции системы. Такой подход создает узкое место производительности, поскольку каждый объект должен обращаться к центральному планировщику для определения своего следующего состояния, что приводит к значительным накладным расходам на синхронизацию и координацию. Децентрализованное планирование преодолевает это ограничение путем делегирования ответственности за временную логику самим объектам модели.

Техническая реализация децентрализованного планирования в платформе SOCCOS.DES основана на требовании к каждому объекту

модели реализовать метод `getNearestEvent()`, который инкапсулирует логику вычисления следующего события для данного объекта. Этот метод возвращает кортеж, содержащий временную метку следующего события и ссылку на объект события, который должен быть выполнен. Такой дизайн позволяет каждому объекту самостоятельно определять свою временную эволюцию на основе текущего состояния и внутренней логики поведения, без необходимости взаимодействия с централизованным координатором.

Архитектурно децентрализованное планирование реализуется через абстрактный класс `FastAbstractObject`, который определяет контракт, обязательный для всех моделируемых объектов. Каждый конкретный класс-наследник реализует метод `getNearestEvent()` в соответствии со своей предметной областью и логикой поведения. Например, объект "Транспортное средство" может планировать событие "Прибытие в пункт назначения" на основе своей скорости и расстояния, в то время как объект "Светофор" может планировать событие "Смена сигнала" на основе временных циклов.

Преимущества децентрализованного подхода становятся особенно значительными в моделях с большим количеством гетерогенных объектов, где централизованное планирование создает недопустимые задержки и узкие места производительности. В модели национального логистического оператора, включающей десятки тысяч отделений, транспортных средств и сортировочных узлов, децентрализованное планирование позволило достичь практически линейного масштабирования производительности при увеличении сложности модели, поскольку накладные расходы на координацию между объектами минимизированы.

Важным аспектом децентрализованного планирования является его естественное соответствие объектно-ориентированной парадигме программирования. Каждый объект модели инкапсулирует не только свое состояние, но и временную логику своего поведения, что делает систему более модульной, сопровождаемой и расширяемой. Добавление новых типов объектов не требует модификации центрального планировщика — достаточно реализовать контракт `FastAbstractObject` с соответствующей логикой планирования событий.

Интеграция децентрализованного планирования с ленивым обновлением состояний и локальным перепланированием создает

целостную оптимизационную экосистему. Ленивое обновление обеспечивает эффективное управление состоянием объектов, локальное перепланирование минимизирует издержки на актуализацию расписания событий, а децентрализованное планирование устраняет узкие места, связанные с централизованной координацией. Эта триада оптимизационных принципов образует синергетическую систему, где каждый компонент усиливает эффективность других.

Таким образом, децентрализованное планирование событий представляет собой не просто технический прием оптимизации, а фундаментальный пересмотр архитектурных принципов дискретно-событийного моделирования. Его реализация в SOCCOS.DES позволила преодолеть принципиальные ограничения централизованных подходов и создать масштабируемую платформу для моделирования сверхсложных систем с тысячами взаимодействующих агентов, открыв новые возможности для анализа и оптимизации реальных систем в условиях высокой неопределенности и динамически меняющейся обстановки.

Принцип децентрализованного планирования также реализуется на уровне абстрактного класса путем требования к каждому объекту модели реализовать метод `getNearestEvent`. Таким образом, каждый объект в явном виде определяет логику вычисления своего следующего события. Для широкого класса задач реального мира такая декомпозиция является естественной и выполнимой.

Хотя каждый из описанных подходов (ленивое обновление, локальное перепланирование и децентрализованное планирование) ранее применялся по отдельности, в рамках данной работы они были интегрированы в единый абстрактный симулятор. Этот симулятор предоставляет унифицированную основу, сочетающую все три принципа для повышения эффективности моделирования.

```
var simulator = new TrafficSimulator();
simulator.addObject(new Vehicle("Car1"));
simulator.addObject(new TrafficLight("TL1"));

while(simulator.Next())
{
```

```
Console.WriteLine($"Time: {simulator.updatedTime}");  
}
```

Разработанное на основе набора алгоритмов программное решение показало универсальность и эффективность для моделирования разнородных систем, включая логистику и управление ресурсами.

Реализованные алгоритмы обеспечили детерминированность и предсказуемость, что является преимуществом по сравнению с методами обучения с подкреплением (RL).

В четвертой главе приведено описание апробации разработанного комплекса алгоритмов и программ для дискретного событийного имитационного моделирования в применении к следующим прикладным задачам.

1) На основе использования имитационной модели нами предложен новый подход к анализу эконометрических параметров отрасли (на примере отрасли информационных технологий) для оценки уровня консолидированности отрасли.

Исследование базируется на простой модели управления отраслью в соответствии с моделью из теории автоматического управления. Состояние отрасли оценивается на основе ежеквартальных эконометрических параметров получаемых в обезличенном виде от каждой компании отрасли через налогового регулятора.

Одним из возможных методов анализа отрасли является диаграмма разброса (scattering diagramm).

В обычных или логарифмических координатах в двумерном пространстве каждой компании из выборки ставится в соответствие точка некоторого цвета.

Цвета при этом представляют результаты ABCD-анализа по некоторому третьему параметру ( для приведенного примера – уплаченным налогам) (см. рис.2).

Логарифмическая диаграмма разброса для метрик *Доход* и *Численность сотрудников* за 3 кв. 2021 года представлена на Рис. 2.

2) На основе созданной платформы имитационного дискретного моделирования разработана компьютерная модель, позволяющая анализировать поддержание готовности дорожных путей и предложен

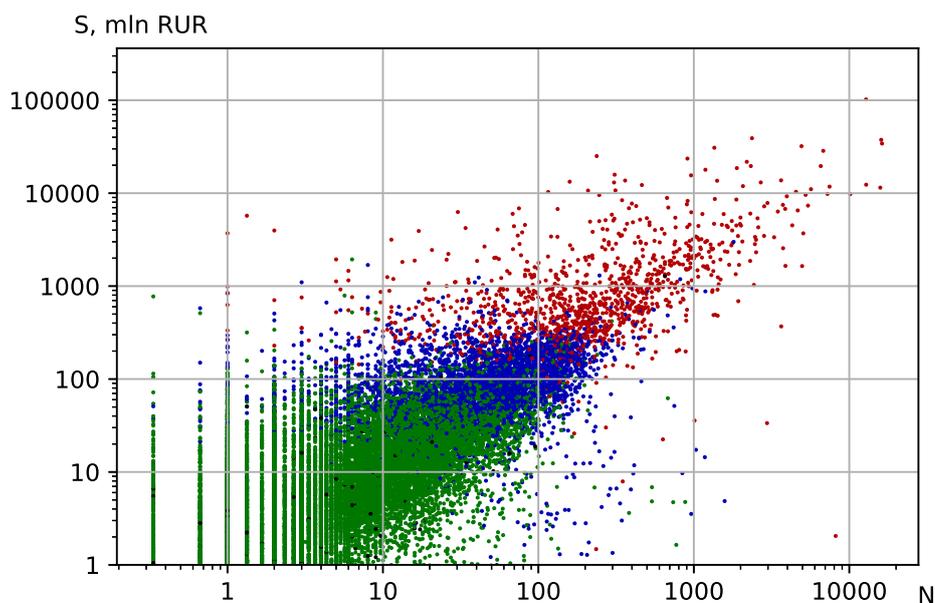


Рис. 2 — Логарифмическая диаграмма разброса для метрик Доход и Численность сотрудников за 3 кв. 2021 года (цвета соответствуют результатам ABCD-анализа по уплаченным налогам: красный-А, синий - В, зеленый-С и черный - D соответственно)

новый подход к определению результативности мероприятий по сохранению дорожной готовности, использующий в качестве ключевого критерия среднюю скорость транспортного потока. Работа была выполнена под методическим руководством сотрудника ВУНЦ Академия сухопутных войск Е.В.Мелешко и опубликована [2].

Целью дискретного имитационного моделирования было воспроизведение взаимодействий, в которых участвуют субъекты модели (в нашем случае средства нанесения ударов по участку дороги и силы и средства применяемые для поддержания готовности, включая БПЛА используемые для разведки заграждений), и изучение поведения и функциональных возможностей исследуемой системы. Для этого выделяются состояния системы и описываются действия, которые переводят ее из одного состояния в другое. Говорят, что система находится в определенном состоянии, когда все ее компоненты находятся в состояниях, совместимых с областью значений, описывающих это состояние характеристик. Таким образом, имитация – это динамический «портрет» состояний системы во времени, т.е. воспроизведение поведения системы во времени.

Рассматривается участок дороги протяженности  $L$  на который осуществляется внешнее воздействие, приводящее к возникновению заграждений  $N$  типов. Каждый тип заграждения описывается плотностью вероятности возникновения и временем устранения.

Полное время выполнения работ по поддержанию готовности участка дороги (время моделирования) составляет  $T_{max}$ . В нашей задаче будем рассматривать  $T_{max} = 720$  минут (12 часов).

Простая схема, иллюстрирующая постановку задачи для случая одной ремонтной бригады и заграждений одного типа, приведена на рисунке 3.

В некоторый момент времени ремонтная бригада находится на участке дороги длины  $L$  в точке с координатой  $x_{m1}$ . Заграждения находятся в точках с координатами  $x_{d1} \dots x_{d5}$ . БПЛА, ведущий разведку заграждений находится в точке с координатами  $x_{UAV}$ .

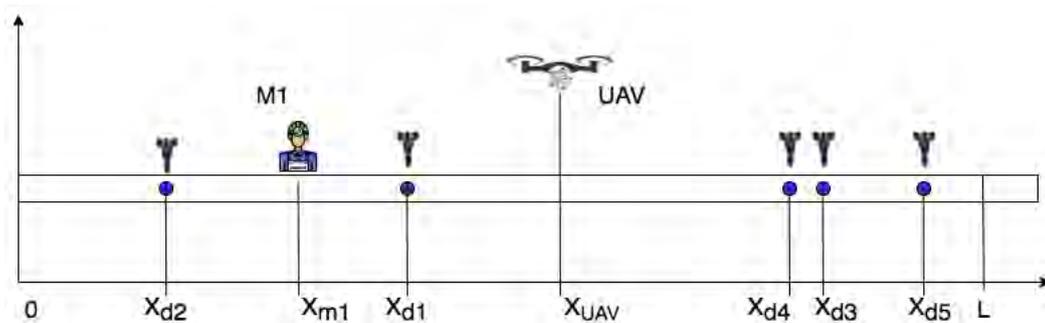


Рис. 3 — Оперативная постановка задачи для случая одной ремонтной бригады и заграждений одного типа

Плотность вероятности появления заграждения  $n$ -го типа составляет  $p_n$ . Место появления заграждения на участке дороги описывается равномерным законом распределения.

Распределение появления заграждений во времени описывается распределением Пуассона, которое описывает последовательность случайных несвязанных событий.

Ликвидацией заграждений занимается одна или несколько ремонтных бригад (инженерных подразделений с соответствующей техникой), выполняющих работы по разграждению участков дороги.

В данной работе мы считаем, что каждая бригада работает как единое целое и не может одновременно вести работы по двум заграждениям.

Среднее время на ликвидацию заграждения  $n$ -го типа составляет  $t_n$ .

Скорость перемещения бригад в интервале между ликвидацией заграждений составляет  $V_1$  (она одинакова для всех бригад, что с хорошей точностью совпадает с реальными экспериментальными данными).

Обнаружение заграждений осуществляется БПЛА имеющим скорость  $V_2$ .

По участку в обе стороны осуществляют движение транспорты со скоростью  $V_3$ . При моделировании будем считать что транспорты входят на участок дороги через равные интервалы времени  $\Delta T$ .

В ходе численного моделирования установлена максимальная длина дорожного участка, который инженерные подразделения могут поддерживать в рабочем состоянии при интенсивном огневом воздействии.

Получена оценка того, как действия дорожно-инженерных формирований влияют на их производительность в контексте поддержания функциональности путей сообщения и дана оценка влияния скорости перемещения беспилотников разведки на показатели, определяющие эффективность обслуживания дорожной инфраструктуры.

Для отображения результатов моделирования разработана циклограмма, детализирующая порядок действий инженерных подразделений, а также предложен метод графического отображения этой информации на основе анализа журналов событий автоматизированных систем.

Пример циклограммы для длины участка  $L = 24$  км приведен на рисунке 4.

3) Третьим прикладным направлением применения разработанных алгоритмов и программных решений является моделирование автоматизированных складов коробчатого типа, которые получают все большее распространение во всем мире.

На эти склады обычно поступают товары на монопаллетах (где все коробки на паллете идентичны), их разгружают (разделяют на отдельные коробки), а затем перемещают эти коробки одну за другой на стеллажи для хранения с помощью кранов-штабелеров или подъемников и мобильных роботов (шаттлов). На выходе складская система собирает смешанные паллеты (состоящие из разных коробок) в соответствии с заказами розничных магазинов или внешних клиентов.

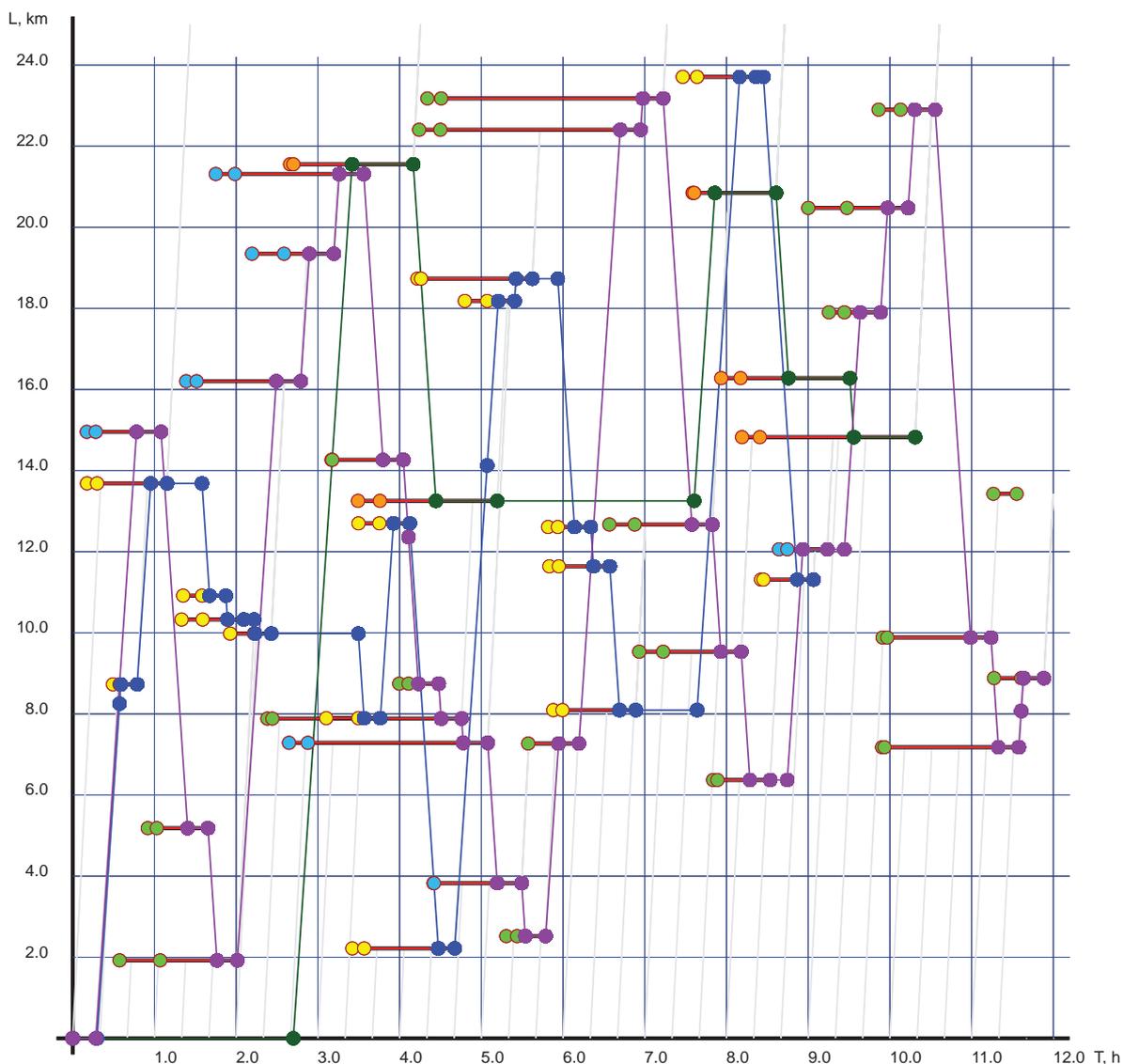


Рис. 4 — Циклограмма поддержки готовности участка дороги

Ключевыми показателями эффективности такой роботизированной складской системы являются:

- Производительность (количество коробок, перемещаемых со стеллажей на паллеты в час/день)
- Плотность хранения коробок (обычно измеряется в кубических метрах товара или количестве коробок на квадратный метр площади склада или кубический метр объема хранилища)
- Параметры укладки коробок на смешанные паллеты (процент использования места на паллетах, средняя высота паллеты, среднее количество коробок на паллете и т.д.)

Высокая плотность хранения достигается за счет предложенной концепции глубоких каналов для хранения. В отличие от большинства



Цель оптимизации - максимально увеличить доступность каждого продукта в любой момент времени. В простейшем случае это означает, что по крайней мере одна упаковка каждого продукта должна быть первой в очереди на выход из своего канала. Более правильный подход предполагает оптимизацию общего времени обработки определенного количества исходящих паллет с заданными характеристиками. Для разных складов свойства наборов паллет могут существенно различаться.

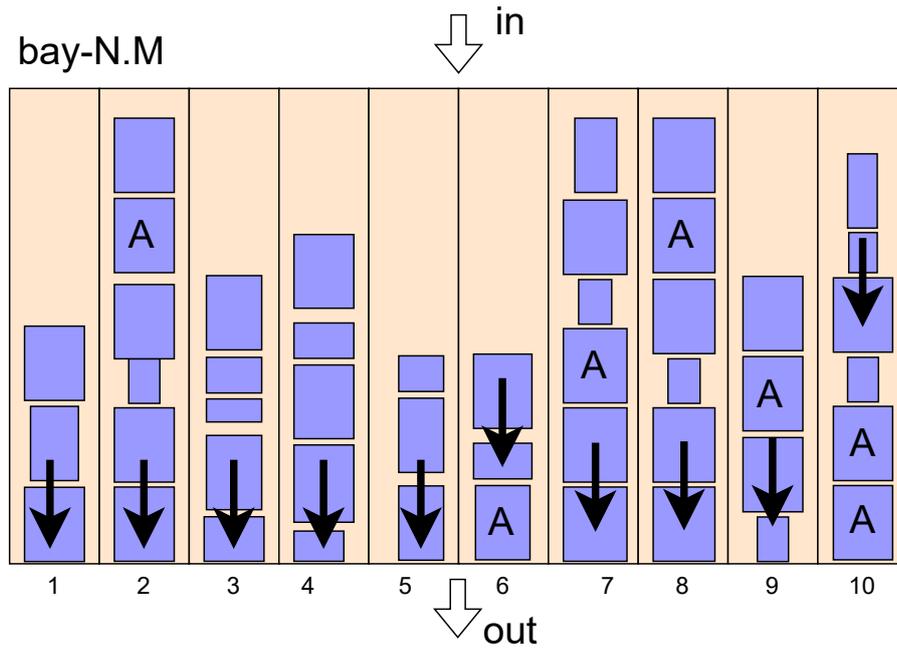


Рис. 6 — Размещение коробок в каналах

На рисунке 6 показано расположение ящиков в каналах для склада, описанное выше. Каналы представляют собой классические очереди из  $N_{CH}^k$  ящиков. Коробки определенного типа находятся в разных "фазах" в разных частях каналов, от входов до выходов.

Архитектура решения, созданного на основе платформы имитационного моделирования показана на рисунке 7.

Управление роботизированным складом осуществляется системой управления роботами 1.2 (RMS) и набором оптимизационных компонентов 1.1 Robots AI.

Целью разработанного решения является минимизация времени обработки набора исходящих паллет.

Математическая модель использует следующие ограничения:

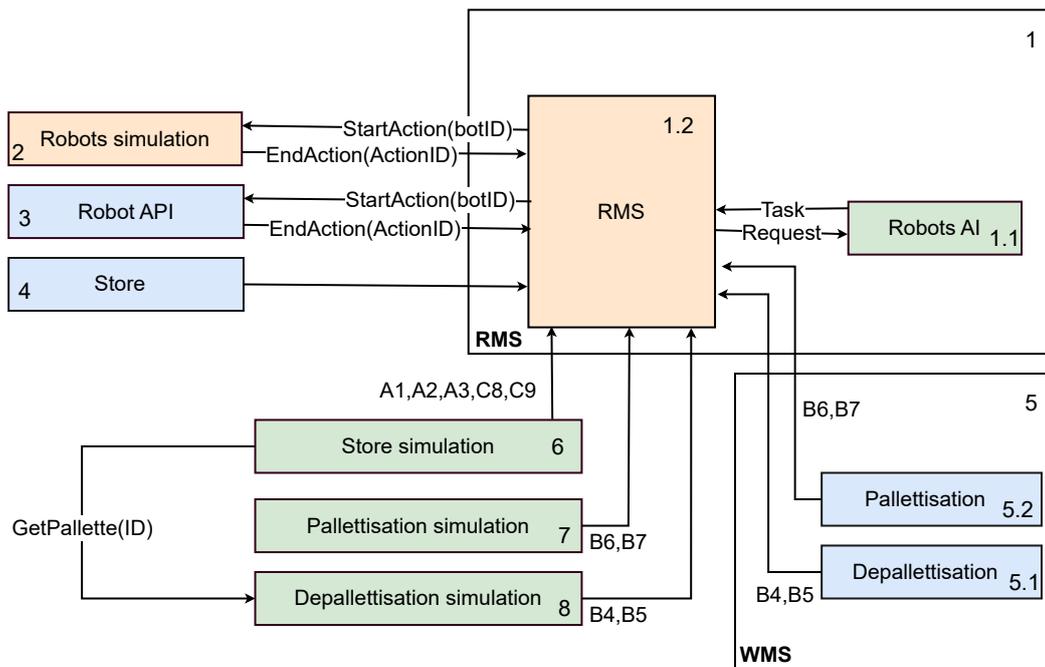


Рис. 7 — Архитектура решения

- Очереди каналов ограничены (subRowNumber) и работают как очереди FIFO.
- Разные роботы не могут занимать один и тот же узел одновременно.
- Роботы не могут начать перемещение к узлу, если он занят.
- Порядок укладки паллеты строго определяется очередью FIFO.

Алгоритм вызывается после каждого шага моделирования модели.

Алгоритм использует следующие основные структуры данных:

- Статус робота *TransportRobotState*
- Задача робота *TransportRobotTask*
- Очередь назначения робота для укладки паллет - FIFO
- Кэшированная матрица кратчайшего пути (shortestPaths), вычисляется с использованием алгоритма Дейкстры для всех пар узлов.

Имитационная модель включает в себя модель склада 6, модель системы укладки паллет 7 и цифровой двойник склада 8.

Разработанная модель позволяет:

- рассчитать оптимального количества роботов на складе;
- оценка осуществимости ежедневных планов отгрузки;

- сравнение различных подходов к размещению продукции на полностью роботизированных многоуровневых складах коробочного хранения.

Результаты численного моделирования алгоритмов размещения и подбора товаров NSPA, MECGP и MFCCGP с использованием 12 роботов для нашей модели конфигурации склада представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение алгоритмов NSPA, MECGP, и MFCCGP

Алгоритм	Время обслуживания	Количество перемещений
NSPA	9.17:49:22	6 739
MECGP	9.17:42:25	6 889
MFCCGP	11.08:31:15	7 293

Модель также позволяет реализовать алгоритмы оптимального размещения товара на складе и назначения задач складским роботам.

**Заключение.** В результате проведенного исследования решен комплекс теоретических и практических задач, что позволило создать универсальную и эффективную платформу имитационного моделирования.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и научно обоснован новый алгоритмический подход. Впервые предложена и формализована масштабируемая модель для больших систем, основанная на принципах ленивого обновления состояний объектов, децентрализованного планирования событий с использованием локальных очередей и избирательной перепланировки. Данный подход является основным элементом научной новизны работы и позволяет преодолеть ограничения классических методов дискретно-событийного моделирования при работе с системами, характеризующимися большим количеством активных агентов и высокой плотностью событий.

2. Создана программная платформа «SOCCOS.DES». Разработана архитектура и осуществлена ее программная реализация, обеспечивающая высокую производительность и масштабируемость. Платформа прошла государственную регистрацию, что подтверждает ее уникальность и законность использования.

3. Доказана практическая значимость и эффективность платформы на реальных примерах. В рамках работы были успешно реализованы и

испытаны три имитационные модели для различных предметных областей. Это подтвердило универсальность подхода и его применимость для решения задач в логистике, транспорте и управлении сложными инфраструктурами.

4. Подтверждена достоверность и апробированы результаты. Степень достоверности полученных результатов обеспечена аналитическими расчетами и результатами вычислительных экспериментов. Основные положения работы были представлены на международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях, включая журналы, рекомендованные ВАК.

Таким образом, диссертационное исследование завершено в полном объеме. Все поставленные задачи решены, а цель достигнута. Разработанная платформа имитационного моделирования и лежащие в ее основе алгоритмические решения представляют собой значительный вклад в развитие инструментов для анализа, прогнозирования и оптимизации сложных систем в условиях неопределенности и динамически меняющейся обстановки. Результаты работы открывают перспективы для дальнейших исследований в области высокопроизводительного имитационного моделирования и его применения в новых предметных областях.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *E.Tsybulko, K.Zhigunov, A.Khelvas, A.Bugaev, T.Afanasenko and Sh.Gadzhimirzaev* Event-Driven Platform for Machine Vision Component Integration with Operation Center, // 2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Mohammedia, Morocco, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRASET57153.2023.10152991.

2. *Мелешко Е.В., Афанасенко Т.С., Гаджимирзаев Ш.М., Пашков Р.А., Гуля-Зетинев А.А., Цыбулько Е.А., Зайцева А.С., Хельвас А.В.* Дискретное моделирование процесса восстановительного ремонта участка дороги // Компьютерные исследования и моделирование, 2022, т. 14, № 6, с. 1255-1268

3. *K.Pankratov, H.Kruchkou, A.Samakhvalau, Sh.Gadzhimirzayev, R.Pashkov, D.Razhkou and A.Khelvas* Digital Twin of Full-automated Warehouse

with Deep Storage Racks // Proceedings of the 5th Winter IFSA Conference on Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0/5.0 (ARCI' 2025). — 2025. — С. 172–179. — DOI:10.13140/RG.2.2.13085.63208. — URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13085.63208>.

4. *Лукьянченко П.П., Данилов А.М., Бугаев А.С., Горбунов Е.И., Пашков Р.А., Ильина П.Г., Гаджимирзаев Ш.М.* Подход к оценке динамики уровня консолидированности отрасли // Компьютерные исследования и моделирование, 2023, т. 15, № 1, с. 129-140 DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-1-129-140

4. *Афанасенко Т.С., Хельвас А.В., Цыбулько Е.А., Гаджимирзаев Ш.М., Пашков Р.А.* Программа дискретного событийного имитационного моделирования SOCCOS.DES // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025685504 от 23.09.2025г.