

УДК 004.42:621.865.8

## РАЗРАБОТКА СИМУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГРУЗОВЫХ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ЗАМКНУТОМ ПУТИ

*Машков И.А., студент*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Татур М.М. – д-р техн. наук, профессор*

**Аннотация.** Работа представляет собой описание разработки особой системы моделирования, предназначенной для рассмотрения симуляций мультиагентных систем грузовых роботов. Определяются метрики и параметры для подобной системы. Приводится схема модульного представления системы и описывается назначение обозначенных на схеме модулей. Рассматривается алгоритм описывающий процесс симуляции мультиагентной системы. Описывается визуальная часть готового программного решения.

**Ключевые слова.** Симуляция, моделирование, модель, мультиагентная система, агент, автоматизация, алгоритм, случайность, генератор псевдослучайных чисел, робототехника, робот, роботизация, цикличность, координирование, координатор, коммуникация, модульные системы, модуль.

В условиях стремительного развития технологий автоматизации и роботизации особое место занимают мультиагентные системы. Они всё чаще используются в решении задач логистики и грузоперевозок. Использование симуляционных моделей позволяет исследовать поведение таких систем в контролируемой виртуальной среде, минимизируя риски и затраты, связанные с развёртыванием физических прототипов. Отдельное место занимают системы, функционирующие на замкнутых маршрутах, где цикличность процессов создаёт особые требования к управлению агентами. Данная работа описывает разработанную систему моделирования, предназначенную для симуляции мультиагентных систем грузовых наземных роботов, движущихся по замкнутому пути.

В контексте разработки данной системы необходимо определить следующие важные термины:

1. Агент – субъект некоторой системы, основное предназначение которого является выполнение конкретно поставленной задачи, чаще всего одной единственной [1].

2. Мультиагентная система – это вычислительная система, состоящая из множества взаимодействующих между собой агентов, обладающих поставленными, или динамически поставляемыми, целями и возможностями к их выполнению [2]. В робототехнике такие системы позволяют нескольким роботам работать скоординировано для выполнения сложных задач, которые были бы невозможны или слишком затруднительными для одной отдельной машины.

3. Симуляция, или моделирование – процесс, когда в качестве субъектов и среды тестирования используются виртуальные объекты, которые описывают основные параметры реальных объектов, и виртуальное пространство, соответственно [3]. Основным предназначением для подобной системы является обучение и (или) сбор статистики. По полученным результатам может проводиться оптимизация и (или) улучшение моделируемой системы перед развёртыванием в реальном мире.

Разработка программного обеспечения, предназначенного для симуляции любых мультиагентных систем, является нетривиальной задачей. Перед началом разработки стоит определить основную рассматриваемую задачу, а также какие будут модули и агенты в системе и как они будут коммуницировать между собой.

**Постановка задачи:** разработать и реализовать симуляционную систему, состоящую из модуля создания и управления симуляцией, одного агента-координатора и  $N$  подчиненных ему агентов-роботов, в которой основной задачей является доставка грузов между двумя заданными точками в замкнутом в кольцо пространстве.

Для определения эффективности симулируемой мультиагентной системы требуется определить некоторые характеристики, по которым можно будет определять оптимальные параметры для систем на базе реальных устройств. К таким характеристикам относятся:

- $T_{\text{общ}}$  – время, необходимое для транспортировки всех коробок-грузов;
- $T_{\text{АБ}}$  – время, затраченное на загрузку или разгрузку в соответствующих точках;
- $T_{\text{преп}}$  – время, затраченное на ожидание при возникновении препятствия на маршруте;
- $T_{\text{затоп}}$  – время, затраченное на ожидание в заторах (понятие «затор» будет определено позже по тексту).

Разработана схема модульного представления требуемой мультиагентной системы, схема изображена на рисунке 1.

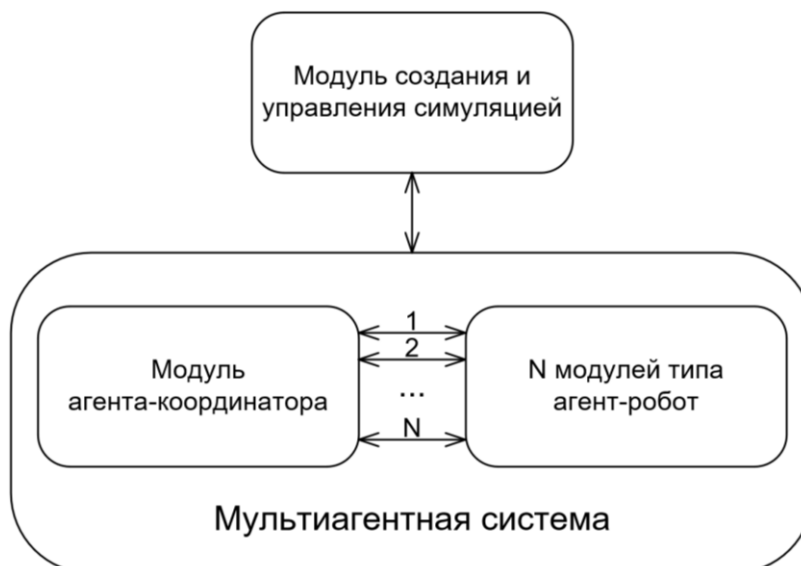


Рисунок 1 – Схема модульного представления мультиагентной системы

Основным блоком на схеме является «Модуль создания и управления симуляцией». Данный модуль объединяет в себе распознавание различных внешних сигналов, а также настройки для определения параметров среды. Под внешними сигналами понимаются те сигналы, которые в реальной ситуации были бы созданы и направлены на работу системы от её оператора. В условиях симуляционной модели данными сигналами управлять будет пользователь данной системы симуляций. Параметрами, в данном случае, являются некоторые характеристики всей симулируемой системы, которые определяют основные и негативные факторы, влияющие на выполнение работы системы. Под негативными понимаются те факторы, которые влияют на систему замедлением выполнения поставленной задачи. Однако, данные факторы предоставляют возможность более точно провести симуляционные эксперименты.

Параметрами данной симуляционной системы являются:

- $v(t) = const$  – постоянная скорость агентов-роботов;
- $s$  – длина пути в одну сторону;
- $N$  – количество активных агентов-роботов;
- $M$  – количество перевозимых коробок-грузов;
- временная и пространственная дискретизации (не задается пользователем);
- временные характеристики загрузки и разгрузки (задаются с помощью генератора псевдослучайных чисел);
- максимальное количество потенциальных препятствий, появляющихся на пути (не задается пользователем);
- количество активных препятствий на пути (задается с помощью генератора псевдослучайных чисел);
- временная характеристика создаваемых препятствий (задается с помощью генератора псевдослучайных чисел).

Мультиагентная система состоит из двух блоков: «Модуль агента-координатора» и « $N$  модулей типа агент-робот».

Агент-координатор является координирующим и управленческим для всех агентов-роботов в мультиагентной системе. Он распоряжается отправкой команд на начало и окончание загрузки или разгрузки, а также определяет начальный и конечный статус у всех подчинённых ему агентов-роботов. Данный модуль управляет обеими основными точками на заданном маршруте, то есть имеет контроль над точкой загрузки и точкой разгрузки.

Последним блоком на схеме является « $N$  модулей типа агент-робот». Агенты-роботы – это исполнители в мультиагентной системе, именно они выполняют заданную им задачу по доставке грузов. Однако, для корректной работы системы из  $N$  одинаковых агентов-роботов у них должны быть описаны алгоритмы по взаимодействию между ними. В зависимости от данных алгоритмов мультиагентные системы делятся на системы с роевым интеллектом, имитирующим реальные биологические системы [4], и на системы с общим координатором. В рассматриваемом случае лучшим решением будет использование именно координирующей системы, так как для корректной работы системы достаточно лишь косвенного сигнализирования через агента-координатора. Данное решение облегчает работу устройству, на котором запущено программное обеспечение, вследствие чего

ускоряется работа агентов-роботов, а также положительно влияет на переносимость алгоритмов на реальные устройства.

В связи с геометрией маршрута (замкнутый маршрут – кольцо) на пути следования агентов-роботов может произойти ситуация затора. Затор – ситуация, когда два и больше агентов-роботов образуют очередь, которая проявляется в связи с препятствием или вследствие достижения точки загрузки или разгрузки агентом-роботом и переход его в состояние загрузки или разгрузки.

Вышеописанные условия и параметры всех модулей определяют следующие основные состояния агента-робота:

- движение агента-робота к следующей точке (точкам) – движение;
- остановка для загрузки – загрузка;
- остановка для разгрузки – разгрузка;
- остановка в связи с препятствием – остановка (препятствие);
- остановка в связи с затором – остановка (затор).

Исходя из поставленных условий было разработано программное решение с помощью, которого пользователь может проводить симуляции мультиагентной системы грузовых наземных роботов на замкнутом пути в заданных пределах и с устанавливаемыми пользователем условиями. Некоторые условия были установлены исключительно в связи с аппаратными ограничениями и оптимальным временем выполнения симуляции.

Основным алгоритмом в данном программном решении является алгоритм основного цикла симуляции, так как он описывает как проходит процесс моделирования данной мультиагентной системы (см. рисунок 2).

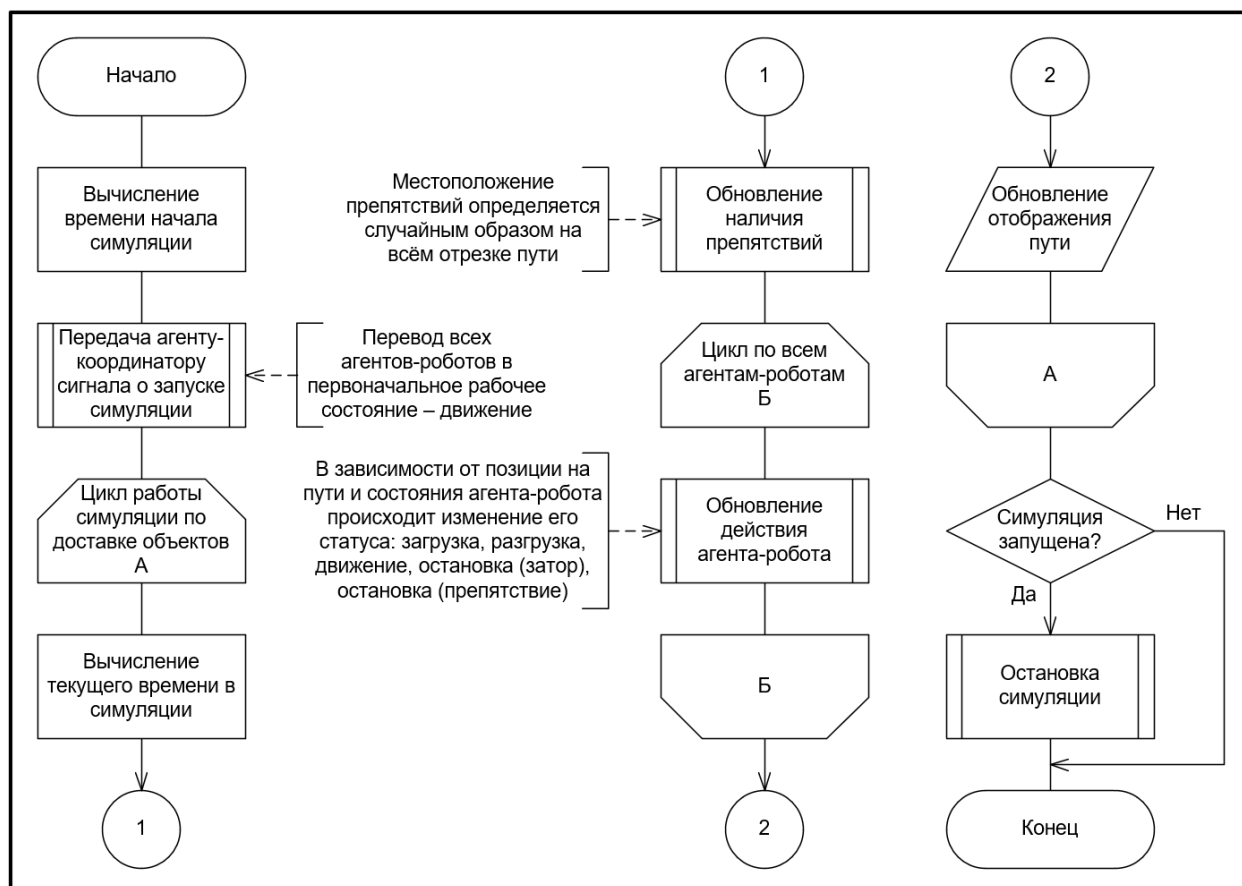


Рисунок 2 – Программная реализация. Блок-схема алгоритма основного цикла работы симуляции мультиагентной системы

После определения параметров симуляции пользователем, он создает и запускает симуляцию. В процессе создания моделируемой системы происходит инициализация всех агентов, участвующих в данной системе, а также первоначальных препятствий на пути следования агентов-роботов. Для обеспечения корректной работы симуляции функция, отвечающая за основной цикл работы симуляции, выносится в отдельный поток, тем самым защищая созданную симуляцию от вмешательства извне. Однако, присутствует возможность к преждевременной остановке симуляции. В конце симуляции, то есть после доставки всех грузов, агент-координатор выдает команду на остановку

всех агентов-роботов, а также выдаются результаты выполнения поставленной симуляционной модели мультиагентной системы.

Визуальное представление программного решения в состоянии запущенного процесса симуляции представлено на рисунке 3.

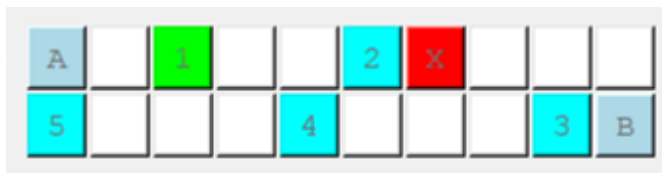


Рисунок 3 – Программная реализация. Визуальная часть при запущенной симуляции

На рисунке 3 можно увидеть различные обозначения для конкретных объектов системы. Клетки с бирюзовым цветом и числом внутри на рисунке обозначены свободные, незагруженные, агенты-роботы, если же цвет клетки зеленый – агент-робот несет груз. Красные клетки с крестом внутри обозначают препятствия. Клетки с обозначением «А» и «В» являются точкой загрузки и точкой разгрузки, соответственно. Белыми клетками обозначены отрезки пути, не занятые ничем.

По итогу проведенной работы была разработана и реализована программная среда для симуляции мультиагентных систем грузовых наземных роботов, функционирующих на замкнутом пути. Созданное решение позволяет моделировать процесс доставки грузов с учетом ключевых параметров, включая возникающие случайные препятствия и появление заторов. Применение модульной схемы с центральным агентом-координатором обеспечило гибкость настройки, масштабируемость количества роботов и упростило логику взаимодействия между элементами системы. Данные получаемые по окончании симуляции (временные характеристики выполнения задач, простои и т.д.) предоставляют возможность провести предварительную оптимизацию параметров системы перед её физическим развертыванием, что существенно снижает риски и затраты. Таким образом, разработанная модель выступает эффективным инструментом для изучения потенциальных оптимизационных возможностей для подобной системы.

**Список использованных источников:**

1. Булгаков С.В. Применение мультиагентных систем в информационных системах // *Перспективы Науки и Образования*. 2015. №5(17). С. 137-140.
2. Беззубова Ю.О. Модели программных агентов в задачах информационного поиска // *Славянский форум*. 2015. №2(8). С. 41-49.
3. *Virtual Environments. In subject area: Computer Science // ScienceDirect.* – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/virtual-environments> (дата обращения: 31.03.2026).
4. *Enhancing drone swarm efficiency through a high-flexibility biomimetic formation algorithm. Drone Systems and Applications // Canadian Science Publishing.* – URL: <https://doi.org/10.1139/dsa-2024-0066> (дата обращения: 31.03.2026).

UDC 004.42:621.865.8

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR A MULTI-AGENT SYSTEM OF GROUND-BASED CARGO ROBOTS OPERATING ON A CLOSED TRACK

*Mashkou I.A., student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Minsk, Republic of Belarus*

*Tatur M.M. – Doctor of Technical Sciences, professor*

**Annotation.** This paper describes the development of a specialized simulation system designed to model multi-agent systems of cargo robots. Metrics and parameters for such a system are defined. A diagram of the system's modular structure is provided, and the functions of the modules indicated in the diagram are described. An algorithm describing the simulation process of a multi-agent system is examined. The visual component of the final software solution is described.

**Keywords.** Simulation, modeling, model, multi-agent system, agent, automation, algorithm, randomness, pseudorandom number generator, robotics, robot, robotization, cyclicity, coordination, coordinator, communication, modular systems, module.