

УДК 004.94

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СНАБЖЕНИЯ СЕТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАГАЗИНОВ

**Красиков А.А., Аксенов К.А., Аксенова О.П. (Екатеринбург)**

### **Введение**

Имитационное моделирование является современным средством исследования сложных систем и процессов [1-5]. Цепи поставок являются сложными технико-экономическими системами, проектирование и управление которыми требует современных решений из-за большого количества факторов, влияющих на эффективность процессов логистики с целью получения конкурентных преимуществ [6]. Начиная от процесса принятия и формирования заказа в магазин, его выполнения, разного рода этапов погрузки в грузовые автомобили, разгрузки товаров у магазинов, заканчивая восполнением своих складов товарами в магазинах, определёнными задержками на разных этапах работы, связанными с затратами времени рабочих и водителей. Все это ведет к тому, что необходимо следить за большим количеством факторов, влияющих на работу системы, необходимо понимать: работает ли она эффективно, есть ли узкие места, которые необходимо устранить. Все вышеперечисленное трудно просчитать обычными методами, и для этого можно воспользоваться имитационным моделированием.

### **Постановка задачи**

Необходимо промоделировать работу системы – поставщика, снабжающего сеть строительных магазинов г. Екатеринбурга и Свердловской области, товарами – базу. Количество строительных магазинов, находящихся в г. Екатеринбурге – 9; в г. Новоуральске – 3; в г. Верхняя Пышма – 4; в г. Первоуральске – 4; в городах-спутниках г. Екатеринбурга – 10, из которых: в Полевской, Сухом Логе, Сысерть, Артемовске – по 1; Алапаевске, Асбесте, Богдановиче – по 2.

Магазинам регулярно требуются товары для продажи и обновления каталога. Для этого они заказывают товары у поставщика, отправляя на его базу заявку на необходимые позиции.

Территориально магазины находятся на различном расстоянии от базы: магазины Екатеринбурга – от 7 до 29 км; Новоуральска – от 85 до 95 км; Первоуральска – от 47 до 58 км; Верхней Пышмы – от 20 до 45 км; остальные магазины (городов-спутников) от 20 км до 135 км.

Заказ на базу из магазинов г. Екатеринбурга приходит раз в сутки; из Верхней Пышмы – раз в 2 дня; из Первоуральска и Новоуральска – раз в 3 дня; из городов-спутников г. Екатеринбурга – раз в 4 дня. Автопарк базы для доставки товаров имеет 25 машин грузоподъемностью 3000 кг каждая. Как только формируется заявка, происходит этап погрузки.

Товар, поставляемый базой, распределён на 5 складах следующим образом: тяжелый негабарит на первом и втором складе, тяжелые европаллеты на третьем, сантехника на четвертом, легкие европаллеты на пятом. Склад имеет 2 поста погрузки, 2 грузчика могут загружать одновременно 2 средних по габаритам грузовика, исходя из следующих правил:

- 1) первым загружается тяжелый негабарит, ограничение – не более 7 металлических листов и конструкций;
- 2) сантехника, ограничение – в грузовую машину помещается не более 2 ванн;

3) тяжелые европаллеты, не более 220 кг;

4) легкие европаллеты, не более 114 кг.

Если грузовик приехал, а грузчики еще не освободились, то грузовик становится в очередь на парковку рядом со складом.

Если ресурсов на складе не хватает для выполнения заявки, их восполняет приезжающий на базу «Камаз». При этом «Камаз» блокирует оба поста погрузки склада на 3 часа, средние грузовики в это время не могут подъехать к складу и загрузиться.

У работников погрузочных работ и водителей грузовиков 12-часовой рабочий день. После погрузки товаров грузовики везут товары в магазины и разгружают его. Как только заказ выполнен, грузовики возвращаются обратно на базу.

Необходимо смоделировать процесс снабжения сети строительных магазинов в дневную и ночную смены, с учетом того, что средняя скорость движения в ночное время увеличивается с 35 км/час до 45 км/час, а стоимость часа водителя и грузчика в ночное время увеличивается на 25 % с базовой ставки 2500 руб/час.

### Математическая постановка задачи

За основу математической постановки задачи взята транспортная задача, но есть определенные нюансы. Допустим, что необходимо перевезти весь груз от базы – поставщика, потребителю – магазину. Считаем, что товары распределены в количестве складов базы от  $i = 1$  до  $m$ . Их необходимо доставить потребителю  $j=1$  до  $n$  строительных магазинов. Для каждого магазина и склада базы заданы следующие величины:  $a_i$  — объем хранения товаров на  $i$ -ом складе базы; объем заказов  $b_j$ , которое запрашивается в пункте заказа  $j$ ;  $c_{ij}$  — затраты при доставке строительных товаров  $i$ -ого склада базы  $j$ -ому строительному магазину.

Предположим, что суммарное количество товаров на базе равно суммарному необходимому количеству товара, заказываемого строительными магазинами.

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (1)$$

Задача – минимизировать затраты базы на доставку заказов в строительные магазины. При построении математической модели транспортной задачи и ее преобразовании получаем целевую функцию задачи, имеющую вид:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij} x_{ij}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $x_{ij}$  – объемы перевозок со складов базы  $i$  до строительных магазинов  $j$ , где  $x_{ij} \geq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ .

Система ограничений для целевой функции, следующая:

$$\sum_j x_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где  $a_i$  – объем товаров, который может быть отправлен из  $i$ -го склада базы

$$\sum_j x_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $b_j$  – объем товаров, которые необходимо доставить в строительный магазин  $j$ . Такая задача называется задачей с правильным балансом, ее математическая модель будет закрытого типа, и есть проблема: в частности, мы не можем утверждать, что сумма мощностей поставщиков равна сумме мощности потребителя из формулы (1). Так как может возникнуть ситуация, при которой сумма заказа может быть больше той, что имеется на складе поставщика, или, наоборот, на складе окажутся нереализованные товары. Тогда баланс задачи становится неправильным, и математическая модель принимает вид открытой. Тогда сумма мощностей в случае, когда мощность поставщиков меньше мощности потребителей, примет вид:

$$\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j \quad (5)$$

Либо – при сумме мощностей поставщиков больше суммы мощностей потребителя – вид:

$$\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j \quad (6)$$

К ограничениям транспортной задачи относятся следующие:

- не учитывается время задержки на этапе погрузки товаров в грузовики на складе;
- не учитывается время задержки при восполнении ресурсов складов, которые занимает «Камаз»;
- неоднородность товаров, загружаемых в грузовики и их допуски и ограничения в возможности совместной перевозки. Так как товары имеют неоднородный вид, разный объем, может произойти ситуация, при которой товары в заказе могут занимать больший объем, чем вместимость грузовиков, из-за чего такой заказ будет распределен на несколько грузовиков;
- не учитывается время, затрачиваемое на доставку и разгрузку грузовика у магазина;
- неоднозначность сопоставления количества товаров, заказываемых потребителем и имеющимся у поставщика, в случае, когда необходимых товаров из заявки нет.

На основании этого было принято решение воспользоваться методом имитационного моделирования.

#### **Описание имитационной модели**

В качестве средства разработки использовалась система имитационного моделирования AnyLogic [7-8]. Исходя из поставленной задачи, имитационная модель будет содержать в себе ГИС-карту, на которой будет расположена популяция агентов [9-12], моделирующих 30 магазинов строительной техники. По заданным условиям формируются заявки, отправляемые агенту-базе, имеющему внутри популяцию агентов-складов. Далее происходит этап погрузки в грузовик, после чего заказ будет направлен в магазин. Как только заказ будет доставлен, грузовик возвращается на базу, и заказ считается выполненным. Учитывается, что при ситуации, когда на складе не окажется необходимых товаров для доставки, склад ожидает его пополнение, которое организывает агент «Камаз», блокируя склад на 3 часа. Имитационная модель в программной системе AnyLogic приведена на рис. 1.

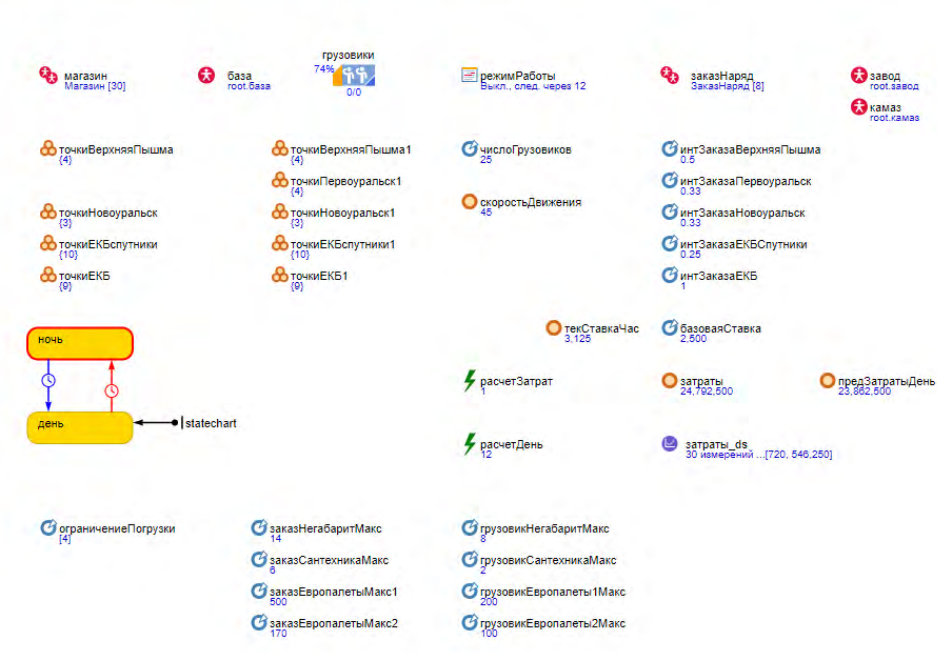
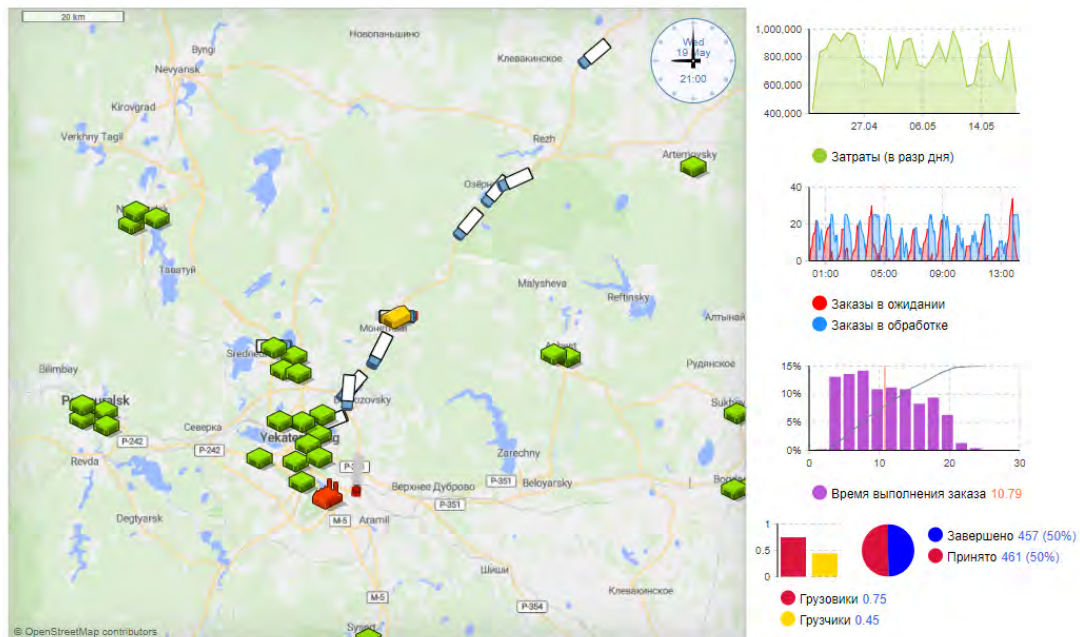


Рис. 1. Имитационная модель в программной системе AnyLogic

В AnyLogic есть возможность гибкой настройки запуска, прогона и тестирования созданной имитационной модели. В результате моделирования система показала средние результаты, из которых видно, что водители и грузчики недостаточно задействованы в работе, так как их процент загрузки составил 74% и 45% соответственно. Почти все заказы были выполнены, кроме 4-х, находящихся в очереди. Среднее число машин, задействованных для развоза всех заявок, – 18 из 25, следовательно, 7 машин вовсе не используются, что требует проведения дополнительных экспериментов.

### Анализ экспериментов

Необходимо провести ряд экспериментов, направленных на поиск наилучших результатов прогона модели. В таблице 1 представлен номер эксперимента,

изменяемый параметр и текущее значение. В частности, необходимо варьировать параметры количества машин, фиксированную ставку и процент от ночной прибавки к оплате труда, скорость грузовиков. Повышение интенсивности заявок, хотя и начнет нагружать систему, однако не поможет найти ее узкие места, так как главная цель – сократить затраты на выполнение заказов, повысив загруженность водителей и грузовиков.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Эксперимент, №	Параметр						
	Принято заказов на базу	Завершено заказов	Загрузка грузовиков, %	Загрузка грузчиков, %	Затраты на выполнение всех заказов, тыс. руб.	Среднее число машин, задействованных	Среднее время выполнения заказа, час
1	520	515	92	68	22120,6	19	11 часов 15 мин
2	517	510	89	72	22740,6	19	11 часов 25 мин
3	534	530	90	77	22560,2	19	11 часов 27 мин
4	498	489	87	73	22312,7	19	12 часов 13 минуты
5	532	532	89	71	23455,5	19	12 часов 14 минуты
6	525	525	86	72	22133,3	19	12 часов 21 минуты
7	518	518	89	73	24683,2	18	11 часов 42 минуты
8	534	534	91	71	22578,2	18	11 часов 33 минуты
9	539	539	92	72	23214,5	17	12 часов 15 минуты
10	528	528	91	71	22456,7	18	11 часов 55 минуты
11	537	537	85	73	23215,5	18	11 часов 34 минуты
12	553	553	86	74	23325,2	18	12 часов 43 минуты
13	523	523	90	72	23111,3	18	12 часов 43 минуты

В результате проведения экспериментов было выявлено, что количество грузовиков колеблется от 17 до 20, в таком случае нет необходимости держать автопарк из 25 машин. Самым лучшим результатом оказался эксперимент под номером 3, при котором удалось достичь наибольшего числа выполненных заказов, хотя время и увеличилось, но количество заказов намного возросло, что является одним из главных критериев. При этом процент загрузки водителей составил 90%, в то время как процент загрузки грузчиков стал 77%. Даже с учетом повышения оплаты рабочих и водителей до 2560 руб. /час, но со снижением процента надбавки за ночную смену до 21 и увеличения допустимой скорости до 40 км/час в дневную смену, удалось уменьшить число расходов, до 22 560,2 тыс. руб.

### Выводы

В результате анализа объекта моделирования была структурирована проблемная ситуация и спроектирована имитационная модель снабжения сети строительных магазинов г. Екатеринбурга и Свердловской области.

Был проведен ряд экспериментов над моделью с целью поиска наиболее эффективного сочетания условий в процессе снабжения сети строительных магазинов. Основываясь на результатах проведенных экспериментов, были предложены дальнейшие пути ее развития. Эксперимент под номером 3, в результате которого число машин автопарка было снижено до 19 ед., показал, что можно достичь наиболее благоприятных условий, при которых анализируемая сеть сможет достичь большего числа выполненных заказов.

Разработанная модель помогает оценить эффективность работы системы, с помощью такой модели можно динамически проанализировать затрачиваемые ресурсы на ее поддержание, загруженность системы, уменьшить время выполнения заказов, вследствие чего появляется возможность составить план действий по устранению обнаруженных проблемных мест.

### Литература

1. **Беловол А.В., Ключко А.А., Набока Е.В., Скоркин А.О., Шелковой А.Н.** Имитационное моделирование в задачах производства – Текст: электронный: [сайт]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/211066529.pdf> (дата обращения: 27.09.2023)
2. Имитационное моделирование: учебник / Н.Б. Кобелев, В.В. Девятков, В.А. Половников. – 2-е изд. – Москва: КУРС, 2022. – 352 с.
3. **Averill M. Law.** Simulation Modeling and Analysis // Averill M. Law, W. David Kelton. Fourth Edition. – McGraw-Hill, 2007. – 768 p.
4. **Девятков В.В.** Применение системы GPSS World при проектировании и модернизации судосборочных комплексов в составе современных судостроительных верфей / В.В. Девятков, М.В. Федотов, М.А. Долматов, В.А. Коренько, А.М. Плотников // Прикладная информатика. – 2014. – № 2 (50). – С. 103-108.
5. **Вивчарь Р.М., Птушкин А.И., & Соколов Б.В.** Риск-ориентированное управление созданием организационно-технических систем на основе использования имитационных моделей их функционирования // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – 2. – С. 17-31. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3502>
6. **Шумаев В.А.** Основы логистики: учеб. пособие / В.А. Шумаев. — М.: Юридический институт МИИТ, 2016. — 314 с.
7. AnyLogic моделирование для обоснованных решений – Текст: электронный: [сайт]. URL: <https://www.anylogic.ru/#tab3> (дата обращения: 27.09.2022).
8. **Боев В.Д., Кирик Д.И., Сыпченко Р.П.** Компьютерное моделирование. Пособие для курсового и дипломного проектирования – Текст: электронный: [сайт]. URL: [https://www.anylogic.ru/upload/Books\\_ru/Boev\\_Computer\\_Simulation\\_AnyLogic.pdf](https://www.anylogic.ru/upload/Books_ru/Boev_Computer_Simulation_AnyLogic.pdf) (дата обращения: 27.09.2023).
9. **Aksyonov K., Antonova A., Aksyonova O.** Method for Planning the Supply of Petroleum Products to Filling Stations Based on Multi-agent Resource Conversion Processes // Lecture Notes in Electrical Engineering: Book Series. – Springer. 2023. – Vol. 986. – P. 176-185. Chapter 18. (Advances in Automation IV). doi: 10.1007/978-3-031-22311-2\_18
10. **Antonova A.S., Aksyonov K.A., Aksyonova O.P.** An imitation and heuristic method for scheduling with subcontracted resources // Mathematics – 2021. – 9 (17). – 2098; DOI: 10.3390/math9172098 <https://doi.org/10.3390/math9172098>

11. **Емельянова А.А., Пелымская И.С., Гончарова Н.В.** Финансово-экономическая модель горнодобывающего предприятия: теоретический аспект // Экономика и менеджмент систем управления. – 2022 – 3 (45). – С. 31-39.

12. **Аксенов К.А., Гончарова Н.В.** Гибридное моделирование мультиагентных процессов: монография. – М.: Издательский дом Академии естествознания, 2019. – 222 с. URL: [https://elar.ufr.ru/bitstream/10995/79339/1/978-5-91327-606-3\\_2019.pdf](https://elar.ufr.ru/bitstream/10995/79339/1/978-5-91327-606-3_2019.pdf) (дата обращения: 27.09.2023)