

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>  
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://resources.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/23INOR419.pdf>

DOI: 10.15862/23INOR419 (<http://dx.doi.org/10.15862/23INOR419>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Юданова В.В. Имитационное моделирование систем массового обслуживания // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2019 №4, <https://resources.today/PDF/23INOR419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/23INOR419

**For citation:**

Yudanova V.V. (2019). Imitating modeling of mass service systems. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, [online] 4(6). Available at: <https://resources.today/PDF/23INOR419.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/23INOR419

**УДК 004.94**

**ГРНТИ 28.17.33**

**Юданова Вера Валерьевна**

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»  
Технический институт (филиал) в г. Нерюнгри, Нерюнгри, Россия

Старший преподаватель

E-mail: [udanov\\_sb@mail.ru](mailto:udanov_sb@mail.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=639113](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=639113)

## **Имитационное моделирование систем массового обслуживания**

**Аннотация.** Теория массового обслуживания находит свое применение во многих сферах человеческой деятельности – экономическое хозяйство, стратегические задачи, вычислительная техника и технологии, задачи естествознания и пр. Аналитические методы исследования систем массового обслуживания (СМО) позволяют получить лишь набор определенных характеристик параметров изучаемого объекта. Методы имитационного моделирования дают возможность не только построить наглядные модели функционирования сложных систем с любой степенью детализации, но и реализовать различные виды вычислительных алгоритмов для обработки и анализа данных. Теоретические аспекты применения имитационных моделей в теории массового обслуживания в литературе изложены обширно, но не системно, вопросы использования современных программно-вычислительных средств в задачах моделирования таких систем представлены только несколькими источниками. В данной статье автором раскрываются вводные вопросы в использовании концепции дискретно-событийного вида имитационного моделирования как основного инструмента исследования дискретных объектов со стохастическим характером функционирования. Выполняется сравнение элементов систем массового обслуживания и компонентов дискретно-событийной модели. На примерах решения практических заданий по моделированию одноканальных и многоканальных систем массового обслуживания рассматриваются возможности программной среды для имитационного моделирования Anylogic: библиотека моделирования процессов с возможностью сбора и представления статистических данных, элементы программирования для расширения функциональности модели, реализации объектно-ориентированного подхода в структуре самой модели и в средствах разработчика. Результаты моделирования разбираются на примере выполнения простого эксперимента в программе Anylogic.

**Ключевые слова:** системы массового обслуживания; заявка; имитационное моделирование; дискретно-событийный подход; программные системы моделирования; объектно-ориентированный подход; агент

Имитационное моделирование – это универсальный инструмент цифрового представления реальной системы с помощью средств компьютерной техники и программного обеспечения, вычислительных алгоритмов и технологий программирования. На сегодняшний день используются три основных концепции построения имитационной модели: системная динамика, дискретно-событийный и агентный подходы [1]. Класс дискретно-событийных моделей является наиболее представительным. Начиная с 1960-х годов, когда Дж. Гордоном была спроектирована, а затем реализована на IBM среда для дискретно-событийного моделирования – GPSS, появилось достаточно много программных продуктов, поддерживающих данный подход. В основе его – изучение процессов изменения состояния моделируемой системы, а именно событий, которые вызывают эти изменения. Каждое событие связано с определенным моментом времени, что обуславливает дискретность поведения модели. Многие задачи дискретно-событийного моделирования тесно связаны с теорией массового обслуживания. Системы массового обслуживания (СМО): вычислительные системы, системы связи, торговля, склад, производство и пр., оперируют понятием заявки или транзакта. Такие события, как приход новой заявки, начало ее обслуживания и др. вызывают изменение состояния системы и образуют поток событий [2]. Для данного потока присуще не только свойство дискретности, но и стохастический характер функционирования, т. к. заявки поступают на обслуживание не регулярно, а в случайные моменты времени, обслуживание заявки длится не постоянное, заранее известное, а случайное время [3]. Таким образом, системы массового обслуживания в имитационном моделировании трактуются в терминах дискретных систем, исследование которых выполняется посредством многочисленных прогонов разработанной компьютерной модели при испытании ее случайными сигналами, с применением различных механизмов сбора статистических данных. Используя симбиоз понятий теории массового обслуживания и дискретно-событийного подхода, представленных в таблице ниже, можно исследовать достаточно сложные алгоритмы работы банковских систем, систем документооборота, call-центров, торговых предприятий, бизнес-процессов и т. д. [4–6].

Таблица

**Основные элементы систем массового обслуживания и компоненты дискретно-событийной модели**

Основные элементы СМО	Компоненты ДС модели
Поток заявок – вход/выход некоторых дискретных объектов в систему. Поток может быть однородным (один тип заявок) или неоднородным, стационарным (равномерное поступление заявок) или не стационарным, ординарным или неординарным (несколько заявок прибывают одновременно). Очередь – это место ожидания начала обслуживания. Очередь характеризуется дисциплиной выбора заявок: FIFO – первым пришел, первым ушел, LIFO – последним пришел, первым ушел или по приоритету. Организация очереди может быть неограниченной или ограниченной по времени или по длине. Узел обслуживания – обозначает одушевленный или неодушевленный объект, который	Событие – это мгновенное изменение состояния некоторого объекта системы (примерами событий является поступление заявки в систему, начало обслуживания, постановка в очередь и др.). События должны быть упорядочены по времени возникновения и образовывать список событий. Часы (модельное время) – служат для установки хронологии событий. Поскольку в дискретно-событийной имитационной модели все изменения происходят только во время возникновения событий, периоды бездействия системы просто пропускаются, и часы переводятся со времени возникновения одного события на время возникновения другого [7]. Генератор псевдослучайных чисел – моделирует случайные моменты времени наступления событий. Так как одни события могут быть более вероятными,

Основные элементы СМО	Компоненты ДС модели
взаимодействует с заявками. Основными характеристиками обслуживающих устройств является их число (постоянное или непостоянное), дисциплина обслуживания (параллельно, последовательно или смешанным образом, работа независимо или взаимодействуя друг с другом), количество одновременно обслуживаемых заявок (одна или несколько) [8; 9].	а другие менее, случайные числа подвергаются преобразованию в соответствии с выявленной статистической закономерностью, т. е. законом распределения. Сбор статистики – это получение и обработка результатов по пребыванию заявки в системе (средняя занятость (доступность) ресурсов, максимальное, минимальное время пребывания в системе, длина очереди и пр.).

Актуальность использования методов имитационного моделирования в теории систем массового обслуживания обусловлена с одной стороны их прогрессирующей сложностью, что определяется увеличением разветвленной функциональности предприятий, организаций и учреждений, возрастающими объемами перерабатываемой информации, высокой скоростью ее обработки и т. д. С другой стороны, наращиванием возможностей и функционала аппаратно-программной платформы имитационного моделирования. Современные программные системы моделирования (Arena, AnyLogic, ExtendSim, AutoMod, Promodel и др.) используют концепции объектно-визуального проектирования, имеют автоматизированные средства формально-статистического анализа и обработки данных, отличаются мощными возможностями разработки графического интерфейса модели, что позволяет наглядно, компактно и достоверно представить информацию, повысить гибкость и простоту модификации модели.

На рынке отечественного программного обеспечения особенно хотелось бы отметить систему имитационного моделирования Anylogic. Она пользуется большим спросом, т. к. поддерживает все парадигмы моделирования, платформа ее ориентирована на объектно-ориентированную технологию работы с данными – как в самой структуре модели, так и в программном коде, который открыт для доработки на языке Java, имеет встроенную поддержку загрузки и выгрузки значений в таблицы баз данных, графические средства разработки интерфейса модели и анимационных 2D и 3D эффектов. Кроме того, наличие инструментария встроенных библиотек дает разработчику богатый выбор в моделировании пешеходной динамики, движения железнодорожного и автотранспорта, потоков жидкостей и газов, с использованием ГИС-технологий, интерактивных компонентов и пр.

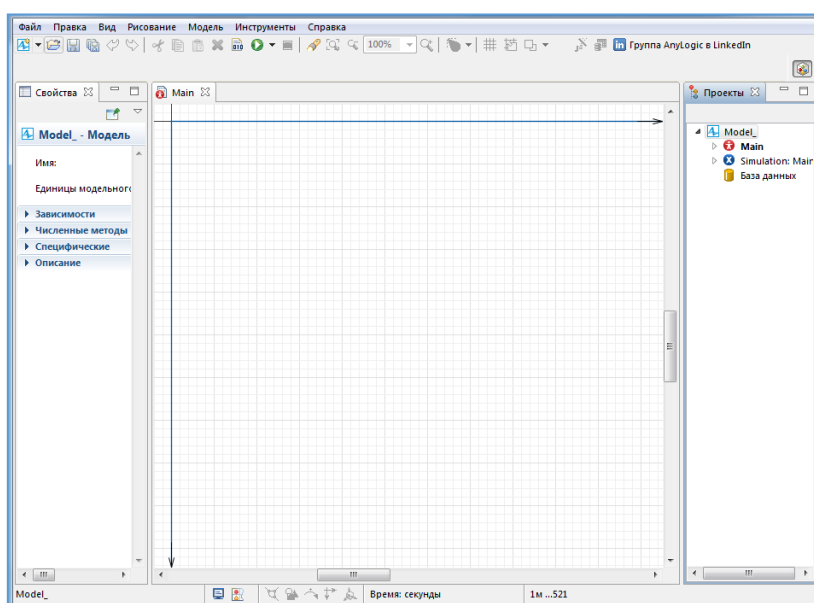


Рисунок 1. Интерфейс окна программы Anylogic (разработано автором)

Основным инструментом в Anylogic для разработки дискретно-событийной модели является библиотека моделирования процессов. С помощью блоков этой библиотеки строят диаграмму процессов обработки агентов. При создании модели в ее структуре уже присутствует агент верхнего уровня Main (рис. 1). В объектно-ориентированной манере агента интерпретируют как сущность, которая инкапсулирует данные, функции обработки этих данных как единое целое [10]. Для каждого агента имеется возможность визуальной настройки его структуры и поведения в окне графического редактора (рис. 1).

Рассмотрим возможности моделирования систем массового обслуживания в Anylogic на различных примерах.

### Одноканальная модель системы массового обслуживания

Пусть требуется промоделировать работу дежурного врача в течение  $s = 360$  ед. времени. Интервалы приходов пациентов:  $a = 10$  ед. времени распределены по экспоненциальному закону. Время приема  $b = 15 \pm 5$  ед. времени распределено равномерно. Пациенты принимаются в порядке «первым пришел – первым обслужен».

В структуре модели присутствует компонент Simulation – это простой эксперимент, в свойствах которого можно настроить продолжительность работы модели (рис. 2). Единицы модельного времени также необходимо выбрать на начальном этапе разработки, по умолчанию это секунды.

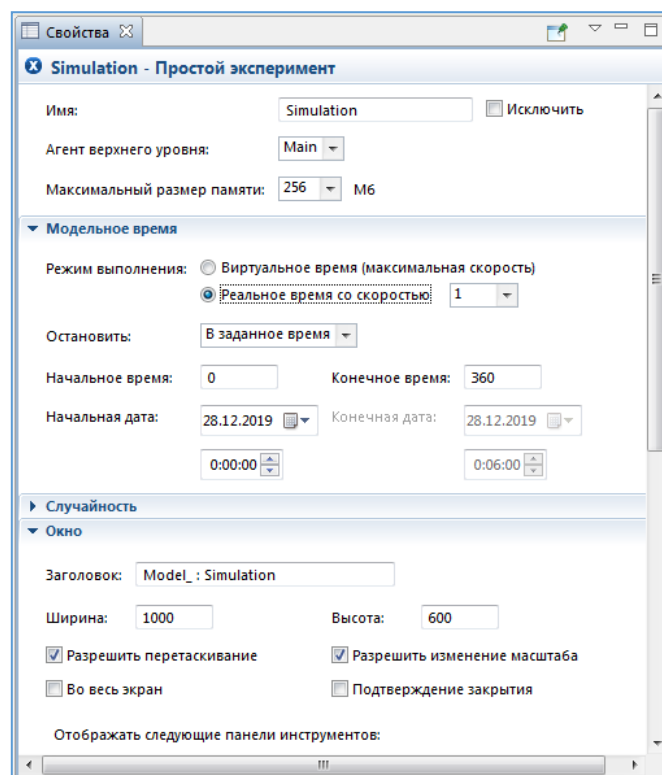


Рисунок 2. Свойства простого эксперимента (разработано автором)

Построение диаграммы процессов для данной модели выполняется с помощью следующих блоков: source – генератор пациентов, queue – служит для ожидания пациентом обслуживания в очереди, delay – задерживает пациента на заданный период времени, блок sink – служит для уничтожения пациента при выходе из системы (рис. 3).

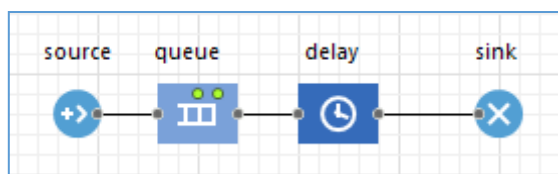


Рисунок 3. Диаграмма процессов для одноканальной СМО (разработано автором)

Каждый блок имеет настройки, перечень которых отображается на панели свойств. Так, блок source должен моделировать приход пациентов согласно экспоненциальному закону распределения с параметром  $\lambda$  – частота событий в единицу времени (рис. 4).

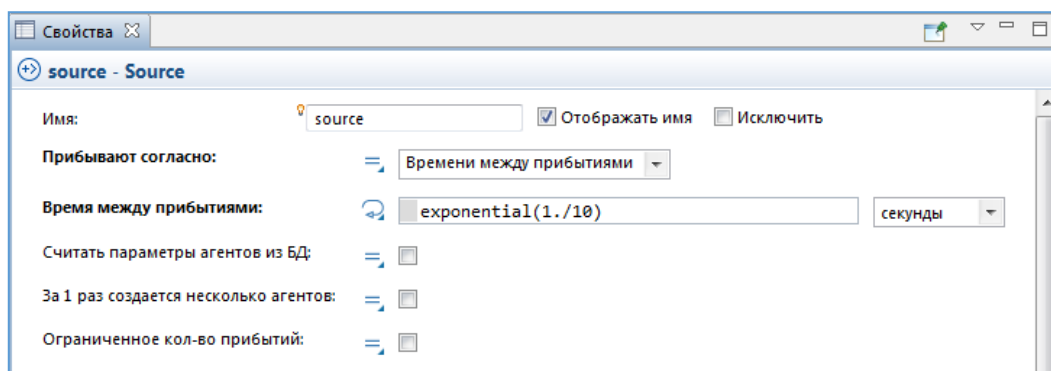


Рисунок 4. Свойства блока source (разработано автором)

В блоке delay имитируется время приема пациента одним врачом согласно равномерному закону распределения (рис. 5).

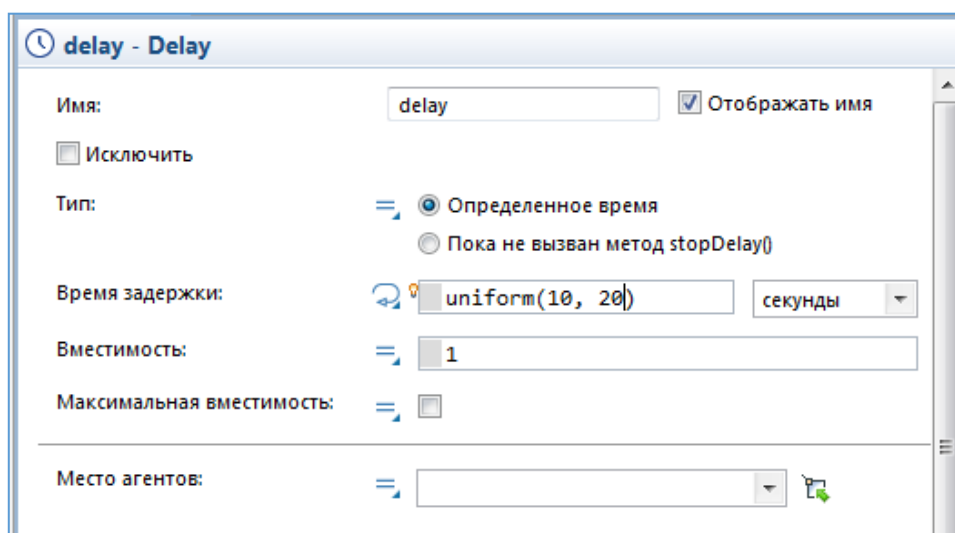


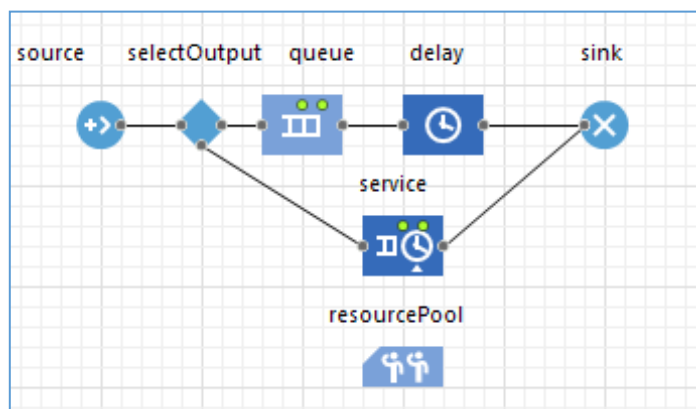
Рисунок 5. Свойства блока delay (разработано автором)

### Многоканальная модель системы массового обслуживания

Пусть пациенты идут на прием либо к дежурному врачу с вероятностью 0,3, либо к врачу – терапевту. Прием ведут два врача-терапевта. Время приема пациентов  $d = 15 \pm 5$  у них также соответствует равномерному распределению.

В модель добавляются блоки selectOutput, который разветвляет движение агента в модели на один из двух выходных портов с заданной вероятностью или согласно условию,

service – имитирует работу устройства обслуживания, которое для организации работы с агентом должен захватывать один из трех ресурсов из блока ресурсов resourcePool (рис. 6).



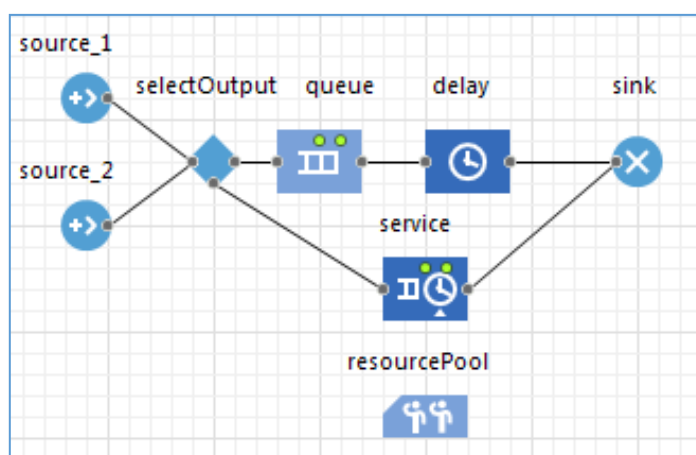
**Рисунок 6.** Диаграмма процессов для многоканальной СМО (разработано автором)

Настройка блоков selectOutPut – заключается в указании значения вероятности для выхода к дежурному врачу, service – необходимо связать с набором ресурсов resourcePool и установить время задержки агента, resourcePool – должен иметь количество ресурсов – 2.

### Многоканальная модель системы массового обслуживания с неоднородным потоком заявок

Пусть к дежурному врачу приходят на первичный прием через интервалы  $e = 20$  ед. времени в соответствии с экспоненциальным законом распределения. Врачей – терапевтов посещают уже повторно, время их прихода также распределено экспоненциально в том же интервале  $a$ .

Пациенты, пришедшие на первичный и вторичный приемы, генерируются в модели разными блоками source\_1 и source\_2, с соответствующими настройками времени между прибытиями (рис. 7).



**Рисунок 7.** Диаграмма процессов для многоканальной СМО с неоднородным потоком заявок (разработано автором)

По умолчанию все блоки диаграммы процесса имеют тип агента – Агент, в программном коде Java он реализуется классом Agent. Агент в диаграмме процесса является аналогом заявки и с помощью добавления переменных, параметров, функций в протокол его класса можно моделировать память, поведение, контакты (зависимости) заявки. Типы агентов могут



разрабатываться самим пользователем. Так для учета разных пациентов, приходящих на прием, необходимо создать класс Patient производный от класса Agent и добавить в него переменную type целого типа int (рис. 8).

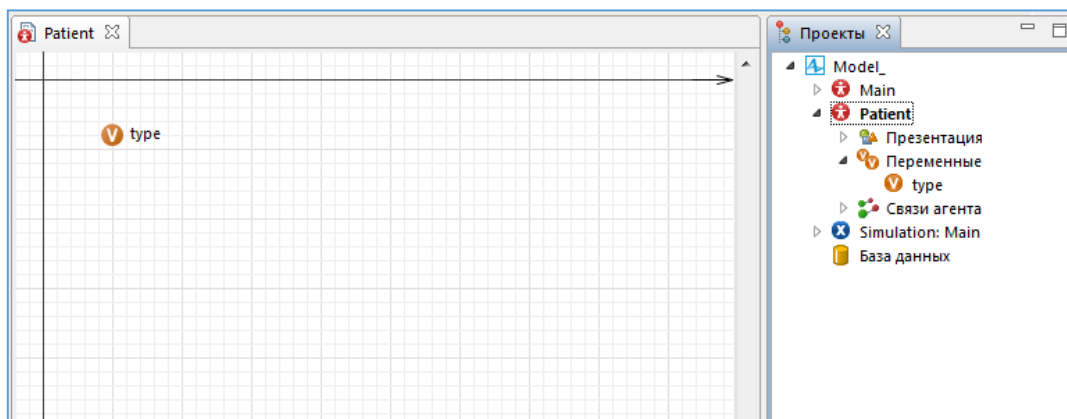


Рисунок 8. Структура агент Patient (разработано автором)

Для всех блоков модели останется только настроить Тип агента: Patient. Пациентов, которые поступают на первичный или вторичный прием, необходимо отметить в source\_1 и source\_2, присвоив переменной type соответственно значение 1 или 2 (рис. 9).

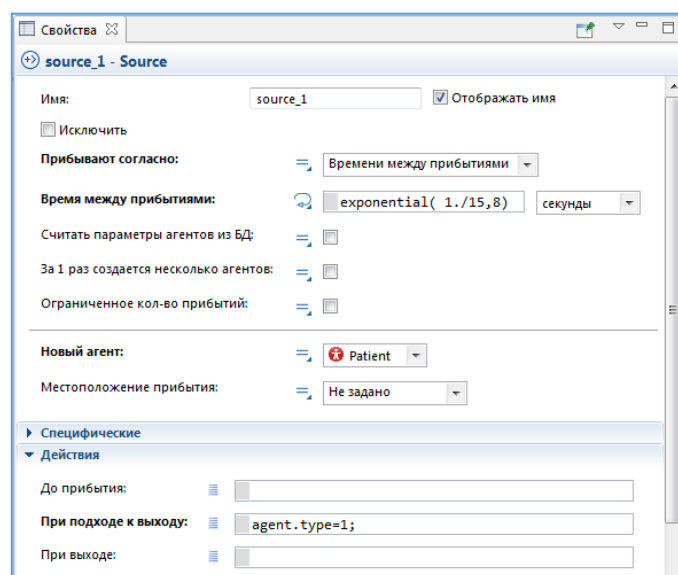


Рисунок 9. Свойства source\_1 (разработано автором)

В данном случае выход из блока source и вход в блок selectOutPut в Anylogic являются одновременными событиями, поэтому определить тип пациента следует при подходе к выходу из source, чтобы при проверке условия ветвления значение переменной type было известно (рис. 10).

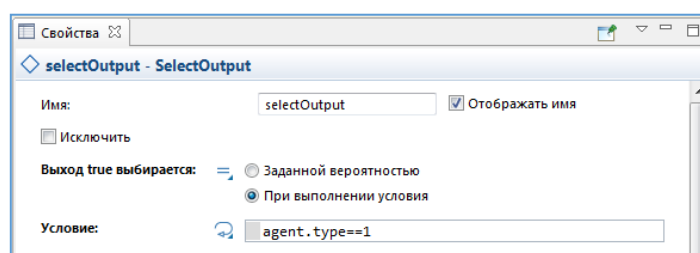


Рисунок 10. Свойства selectOutPut (разработано автором)

### Сбор статистических данных

Пусть необходимо определить среднее время, проведенное пациентами в очереди к дежурному врачу и к врачам-терапевтам. И также сравнить среднее время пребывания в поликлинике пациентов, пришедших на первичный и вторичный прием.

В Anylogic используются разные механизмы сбора статистики. С помощью инструмента Статистика выполняется сбор данных с любого блока диаграммы. Размер очереди к врачам-терапевтам в объекте `service` определяется с помощью функции `queueSize()`. Возвращаемые ею значения сохраняются в наборе данных `statistics_service` (рис. 11).

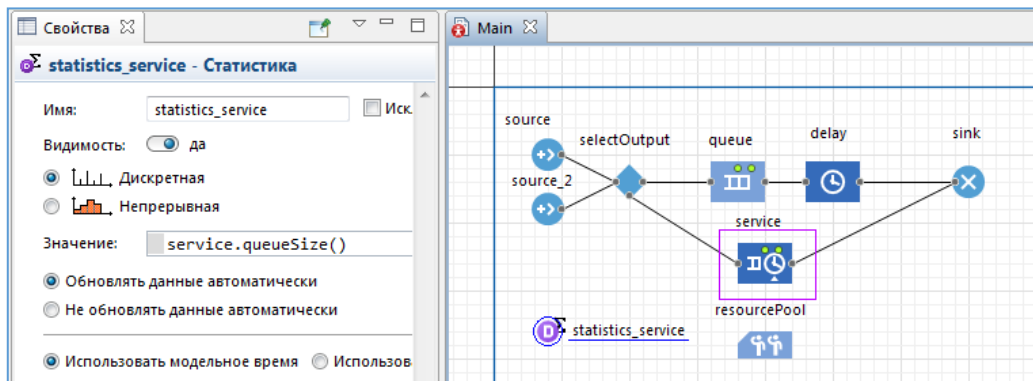


Рисунок 11. Свойства `statistics_service` (разработано автором)

У компонента диаграммы `queue` есть встроенная статистика длины очереди `statsSize`. Используя функцию `mean()` можно получить средние значения с данных собранных с блока `queue` – очередь к дежурному врачу и с элемента `queue` блока `service` – очередь к врачам-терапевтам, и отобразить их на столбиковой диаграмме (рис. 12).

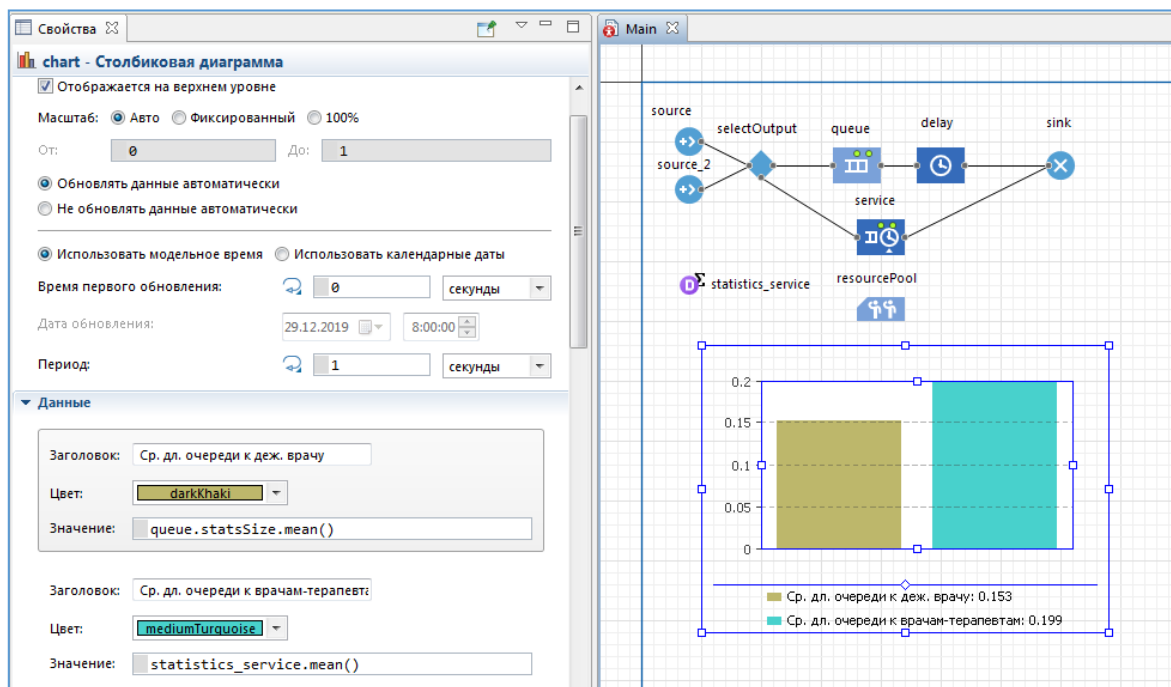


Рисунок 12. Столбиковая диаграмма (разработано автором)

Сбор статистики организуется и программным способом. В блоках `source_1` и `source_2` фиксируется время входа пациента в поликлинику (рис. 13). Функция `time()` возвращает значение текущего модельного времени. Переменная `TimeSystem` была добавлена к агенту `Patient`.



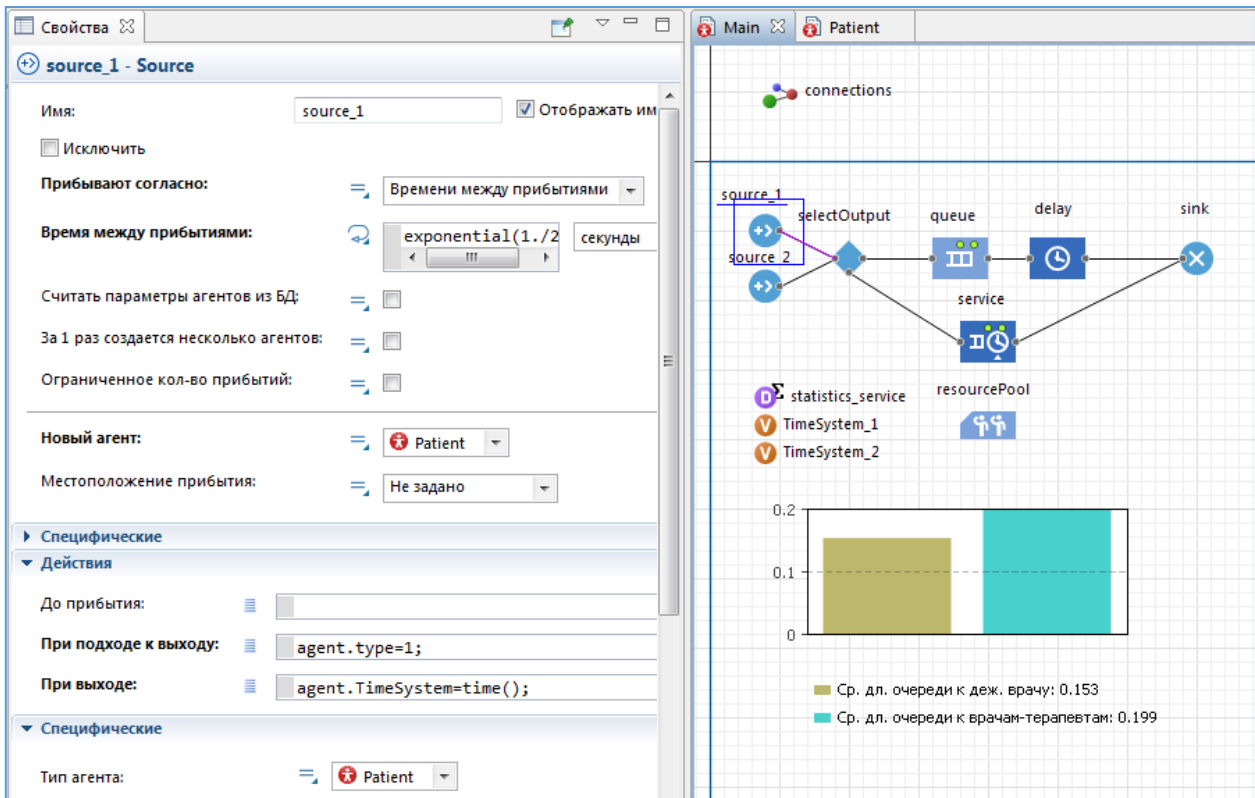


Рисунок 13. Свойства source\_1 (разработано автором)

В блоке sink в зависимости от того, пришел пациент на первичный или вторичный прием, сохраняется значение времени, проведенного агентом в системе, соответственно в переменной TimeSystem\_1 или TimeSystem\_2 (рис. 14). Динамику изменения значений данных переменных для наглядности можно отобразить на временной диаграмме с накоплением.

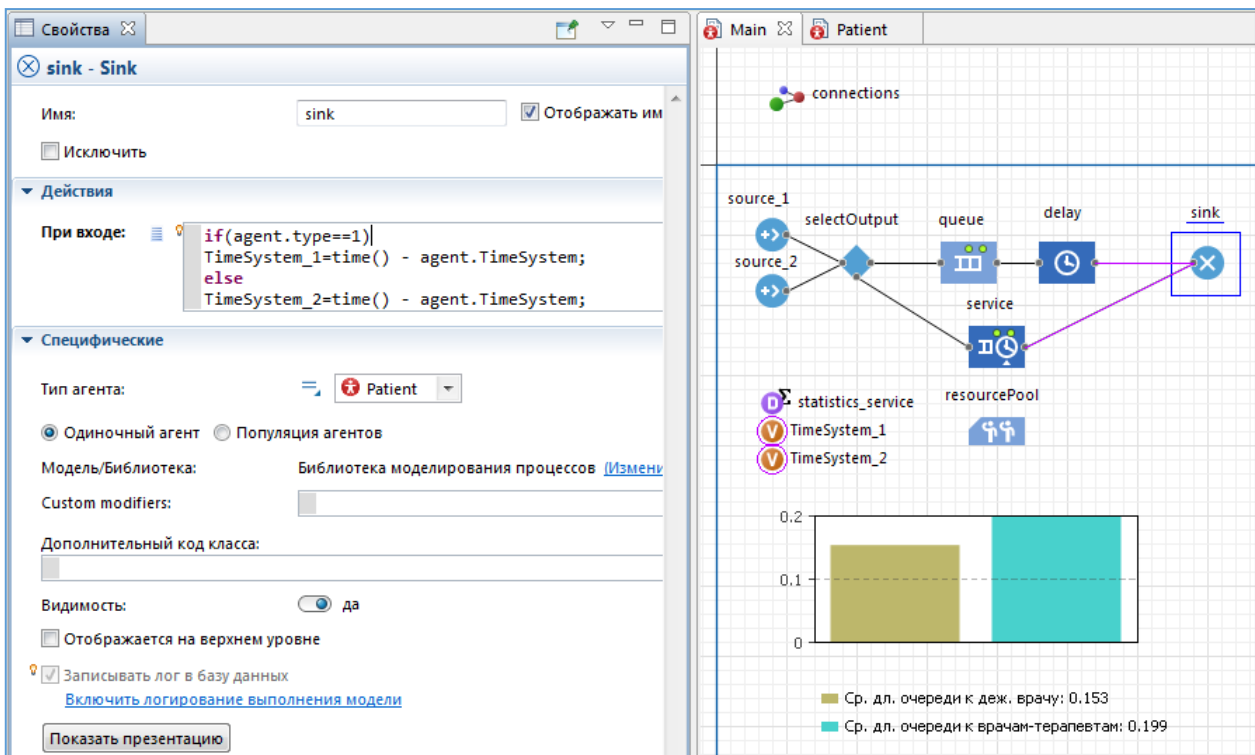


Рисунок 14. Свойства sink (разработано автором)

### Простой эксперимент на модели

Презентация полученной модели системы массового обслуживания в течение 360 ед. модельного времени позволяет получить следующие результаты (рис. 15). В течение 6-часового рабочего дня 64 % пациентов обратились к врачам-терапевтам и 36 % к дежурному врачу. Средняя длина очереди к врачам-терапевтам составила 2 человека, к дежурному врачу – 1 человек. Соответственно и пациенты, пришедшие на вторичный прием, показали большее значение времени, проведенного в поликлинике.

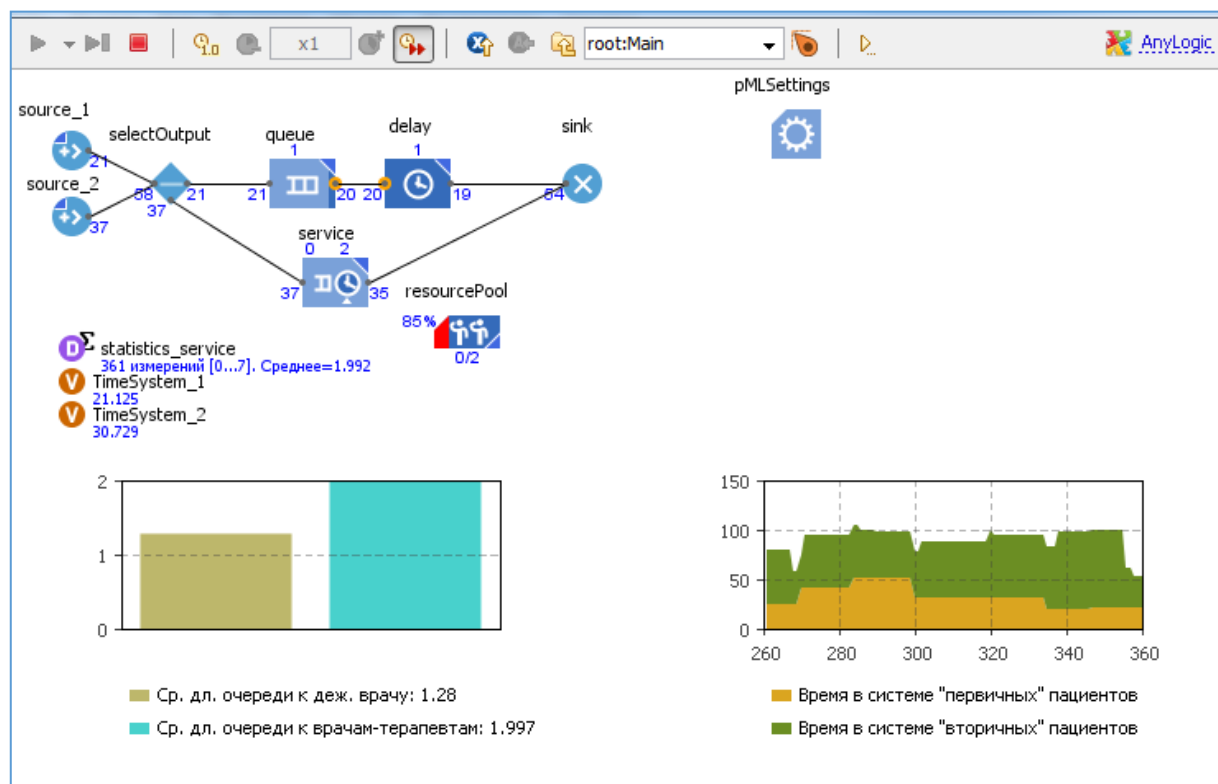


Рисунок 15. Презентация модели (разработано автором)

Таким образом, исследование поведения систем массового обслуживания методами имитационного моделирования требует адекватного выбора способа представления реального объекта, с учетом дискретных и стохастических характеристик таких систем. Необходимая гибкость достигается при интерпретации основных понятий СМО терминами дискретно-событийной концепции построения модели. С другой стороны, применение средств программных систем имитационного моделирования, на примере программы AnyLogic, привносит в понятийный аппарат теории новые представления в виде диаграмм, агентов, классов, объектов и пр.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Имитационное моделирование: учебное пособие / Ю.А. Кораблев. – Москва: КНОРУС, 2017. – 146 с. – (Бакалавриат).
2. Г.А. Соколов Основы теории массового обслуживания для экономистов: Уч. / Г.А. Соколов – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 128 с. / Г.А. Соколов. – Москва: Наука, 2016. – 480 с.
3. Теория массового обслуживания: учебное пособие / В.А. Павский; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2008. – 116 с.
4. Юданова В.В. Оптимизация бизнес-процессов в сфере обслуживания методами имитационного моделирования // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – № 11 (ноябрь). – С. 141–150. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/174018.htm>.
5. Паринов С.И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем // Искусственные общества. – 2007. – Т. 2, № 3–4. – С. 4.
6. Сидоренко В.М., Красносельский А.В. Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение // Бизнес-информатика. – 2009. – No2(08). – С. 52–57.
7. Замятина О.М. Компьютерное моделирование: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007 – 121 с.
8. Кобелев Н.Б., Основы имитационного моделирования сложных экономических систем: Учеб. пособие. – М.: Дело, 2003. – 336 с.
9. Климов Г.П. Теория массового обслуживания – М.: Издательство Московского университета. – 2011. – 312 с. – 2-е издание, переработанное.
10. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с Anylogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

**Yudanova Vera Valer'evna**

North-Eastern federal university named after M.K. Ammosov  
Technical institute (branch), Neryungri, Russia  
E-mail: [udanov\\_sb@mail.ru](mailto:udanov_sb@mail.ru)

## **Imitating modeling of mass service systems**

**Abstract.** The theory of mass service systems is applied in many areas of human activity – economy, strategic tasks, computer science and technology, problems of natural science, etc. Analytical methods for the study of mass service systems allow you to get only a set of certain characteristics of the parameters of the object under study. Imitating modeling methods make it possible not only to build visual models of the functioning of complex systems with any degree of detail, but also to implement various types of computational algorithms for data processing and analysis. The theoretical aspects of the use of imitating models in the theory of mass service are described in the literature extensively, but not systematically, the issues of using modern software and computing tools in modeling problems of such systems are presented only by a few sources. In this article the author reveals introductory questions in the use of the concept of discrete-event type of imitating modeling as the main tool of research of discrete objects with stochastic character of functioning. A comparison is made of elements of queuing systems and components of a discrete event model. The examples of solving practical tasks on modeling single-channel and multi-channel queuing systems examine the capabilities of the Anylogic imitating modeling environment: a process modeling library with the ability to collect and present statistical data, programming elements to expand the model's functionality, implement an object-oriented approach in the structure of the model itself and in the tools of the developer. The imitating modeling results are analyzed using a simple experiment in Anylogic as an example.

**Keywords:** mass service systems; request; imitating modeling; discrete-event approach; software modeling systems; object-oriented approach; agent

## REFERENCES

1. Korablev Yu.A. (2017). Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnoe posobie. [*Simulation Modeling: A Tutorial.*] Moscow: Knorus, p. 146.
2. Sokolov G.A. (2015). Osnovy teorii massovogo obsluzhivaniya dlya ehkonomistov. [*The basics of queuing theory for economists.*] Moscow: SIC INFRA-M / The science, p. 128 / 480.
3. Pavskiy V.A. (2008). Teoriya massovogo obsluzhivaniya: uchebnoe posobie. [*Queuing Theory: Study Guide.*] Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry, p. 116.
4. Yudanova V.V. (2017). Optimization of business processes in the service sector using simulation methods. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*, [online] 11, pp. 141–150. Available at: <http://e-koncept.ru/2017/174018.htm> (in Russian).
5. Parinov S.I. (2017). New features of simulation modeling of socio-economic systems. *Artificial Societies*, 3–4(2), p. 4. (in Russian).
6. Sidorenko V.M., Krasnosel'skiy A.V. (2009). Simulation modeling in science and business: approaches, tools, application. *Business Informatics*, 2(08), pp. 52–57. (in Russian).
7. Zamyatina O.M. (2007). Komp'yuternoe modelirovanie: uchebnoe posobie. [*Computer modelling: Study Guide.*] Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, p. 121.
8. Kobelev N.B. (2003). Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh ehkonomicheskikh sistem. [*The basics of simulation of complex economic systems.*] Moscow: Case, p. 336.
9. Klimov G.P. (2011). Teoriya massovogo obsluzhivaniya. [*Queuing theory.*] Moscow: Moscow University Press, p. 312.
10. Karpov Yu. (2005). Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s Anylogic 5. [*Simulation systems. Introduction to Modeling with Anylogic 5.*] Saint Petersburg: BHV-Petersburg, p. 400.