

АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Краснобаев Д.А., аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: mitek.kras@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы анализа стационарных режимов систем массового обслуживания в транспортной инфраструктуре, что обусловлено необходимостью повышения эффективности функционирования пассажирских и грузовых потоков в условиях роста интенсивности перевозок. Актуальность исследования определяется потребностью в снижении временных задержек, оптимизации использования ресурсов и повышении качества обслуживания при ограниченных пропускных возможностях транспортных объектов.

В качестве методологической основы использованы положения теории массового обслуживания, нотация Кендалла и марковские модели, позволяющие формализовать процессы поступления и обслуживания заявок.

Особое внимание уделено возможностям среды имитационного моделирования AnyLogic, реализующей дискретно-событийный подход к исследованию процессов обслуживания. На примере моделей типа M/M/1 и M/M/1/R продемонстрированы особенности функционирования одноканальных систем с неограниченной и ограниченной очередью. Проведён анализ влияния ограничения ёмкости очереди на стационарный режим, среднюю длину очереди и вероятность потерь заявок. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения имитационного моделирования для исследования сложных транспортных систем, где аналитические методы затруднены или ограничены.

Ключевые слова: имитационное моделирование, теория массового обслуживания, AnyLogic, дискретно-событийное моделирование

ANALYSIS OF STEADY-STATE OPERATING MODES OF QUEUEING SYSTEMS IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE USING SIMULATION MODELING TOOLS

Krasnobaev D., postgraduate student, FSAEI HE «Russian University of Transport», e-mail: mitek.kras@gmail.com

This article examines the analysis of steady-state modes in queueing systems in transport infrastructure, driven by the need to improve the efficiency of passenger and freight flows in the face of increasing traffic volumes. The relevance of the study is determined by the need to reduce time delays, optimize resource utilization, and improve service quality under limited transport capacity. The methodological framework utilizes the principles of queueing theory, Kendall notation, and Markov models, which allow for the formalization of the processes of request receipt and servicing. Particular attention is paid to the capabilities of the AnyLogic simulation environment, which implements a discrete-event approach to the study of service processes. Using M/M/1 and M/M/1/R models as examples, the operating characteristics of single-channel systems with unlimited and limited queues are demonstrated. The impact of limiting queue capacity on steady-state mode, average queue length, and the probability of request loss is analyzed. The obtained results confirm the feasibility of using simulation modeling for studying complex transport systems where analytical methods are difficult or limited.

Keywords: simulation modeling, queueing theory, AnyLogic, discrete-event modeling

Введение

Во многих экономических сферах широко распространены системы, предназначенные для обработки большого потока однотипных запросов. Эти системы, обеспечивающие постоянный приём и выполнение требований потребителей, называются системами массового обслуживания (СМО).

Закономерности процессов, происходящих в таких системах, изучаются в рамках особого раздела прикладной математики – теории массового обслуживания.

Теория массового обслуживания (ТМО) исследует режим функционирования обслуживающей системы, а также анализирует явления, возникающие в процессе обработки запросов потребителей [10].

Целью исследований ТМО является рациональный выбор структуры системы обслуживания и повышение эффективности ее функционирования. Разработка путей оптимизации параметров СМО осуществляется с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

Обсуждение

Историю развития теории массового обслуживания можно проследить по целому ряду ключевых научных разработок.

Основоположником ТМО считается датский математик и инженер А.К. Эрланг, который в начале XX века начал работать над проблемами, связанными с проектированием и эксплуатацией Копенгагенской телефонной станции. Эрланг ввел такие понятия, как интенсивность потока звонков и время их обработки, а также разработал формулы для определения вероятности немедленного обслуживания звонков и вероятности образования очереди. Впоследствии работа Эрланга заложила основу для анализа очередей ожидания, оценки требований к пропускной способности телефон-

ных сетей, что сделало его одним из основателей теории массового обслуживания.

Следует отметить, что теоретической базой ТМО послужила теория случайных процессов, основоположником которой явился российский математик А. А. Марков. Работы Маркова, опубликованные в начале XX века, сформировали математическую основу для изучения процессов массового обслуживания, а также создали базу для математического моделирования и анализа систем, где имеют место случайные процессы, что сыграло ключевую роль в развитии теоретических основ ТМО [1].

В 1930-е годы фундаментальные работы советского математика А.Н. Колмогорова в области теории вероятностей заложили основы для дальнейшего развития теории массового обслуживания. Колмогоров разработал математический аппарат, позволяющий анализировать и осуществлять оптимизацию систем массового обслуживания, включая оценку их производительности и надежности [2].

В 1950-е и 1960-е годы были разработаны гораздо более сложные и структурированные математические модели, аналитические методы изучения систем массового обслуживания. В том числе, британским математиком Д. Кендаллом была введена система обозначений и символов, которые обеспечили стандартизированный способ описания, оценивания различных типов систем, облегчая общение и сравнение между исследователями и практиками [7].

Во второй половине прошлого века заметный вклад в развитие ТМО представлен работой американского ученого Л. Кляйнрока, который разработал и усовершенствовал теорию очередей как часть ТМО [3].

В течение последних лет развитие высокоскоростного Интернета, облачных технологий и систем Big Data привели к увеличению интереса к теории массового обслуживания, поскольку ТМО предоставляет важные инструменты и методологии для анализа,

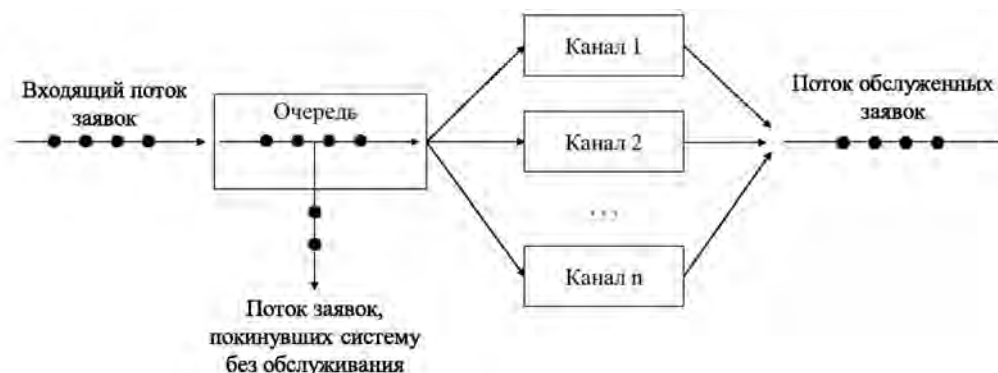


Рис. 1. Структурная схема СМО

проектирования и оптимизации различных аспектов Интернета. Это включает в себя управление трафиком, производительность сетевых устройств, обработку и передачу данных, а также обеспечение надежности сетевых соединений.

Таким образом, от своего зарождения в телекоммуникационных системах до современных компьютерных технологий, концептуальные наработки продолжают играть определяющую роль в проектировании, анализе, оптимизации систем массового обслуживания.

Структура системы массового обслуживания, как правило, включает в себя такие понятия, как входящий поток заявок, очередь, каналы обслуживания и выходящий поток заявок.

Тот факт, что заявки поступают в СМО в случайные моменты времени, а скорость их обработки зависит от множества разнообразных факторов, приводит к неравномерности загрузки СМО и образованию очереди.

Следует отметить, что время пребывания заявки в очереди является важнейшей характеристикой обслуживающей системы, а сама теория массового обслуживания в некоторых источниках носит название «теории очередей». Минимизация данного показателя является ключевым целевым ориентиром в системах массового обслуживания, так как способствует повышению удовлетворенности клиентов и достижению высокого уровня обслуживания.

Структурная схема СМО представлена на рисунке 1.

Таким образом, в основе анализа и моделирования СМО содержится совокупность следующих элементов:

- входящий поток требований (заявок), определяющий характер поступления на обслуживание;
- дисциплина формирования очереди, задающая порядок обработки требований;
- механизм обслуживания, включающий параметры времени

обслуживания, число одновременно обслуживаемых заявок и другие характеристики процесса;

- выходящий поток заявок, отражающий результаты функционирования системы.

Эффективность функционирования любой системы массового обслуживания определяется способностью обрабатывать поступающие требования с минимальными затратами ресурсов и времени, обеспечивая при этом высокий уровень удовлетворенности клиентов.

С использованием инструментария математического моделирования предполагается разработка схем, алгоритмов для описания поведения очередей. Наиболее распространенной моделью, применяемой в рассматриваемой концепции, является нотация Кендалла, система условных обозначений, согласно которой СМО записывается в виде:

$$A / B / n / R / x,$$

где A – распределение интервалов между поступлениями заявок,

B – распределение времени обслуживания,

n – число обслуживающих каналов,

R – максимальное количество заявок в очереди;

x – принятая дисциплина обслуживания очереди.

Данная система обозначений позволяет быстро описать и классифицировать систему массового обслуживания, облегчая анализ и сравнение различных моделей и их поведения [6].

Помимо этого, системы массового обслуживания часто представляются как цепи Маркова, где последующее состояние системы определяется исключительно её текущим состоянием и не зависит от предшествующей истории переходов (свойство отсутствия памяти). Марковские модели хорошо подходят для систем, где из-

Таблица 1. Ключевые тенденции применения теоретических разработок массового обслуживания в сфере транспорта

Тенденция	Примеры и описание
Прогнозирование и оптимизация трафика	Моделирование транспортных потоков, прогнозирование загруженности дорог, выявление рисков возникновения заторов.
Планирование систем общественного транспорта	Разработка оптимального расписания движения, размеров парка ТС, пропускной способности станций. Сводя к минимуму время ожидания, а также перегруженность транспортных средств, ТМО содействует повышению надежности, привлекательности общественного транспорта для пассажиров. Пример: использование модели СМО для определения оптимального количества автобусов на маршруте.
Планирование и управление парковками	Определение оптимального количества парковочных мест, планирование парковки для минимизации затрат и максимального удобства пользователей.
Управление потоками транспортных средств	Оптимизация времени сигнала светофоров на перекрестках, с целью сокращения задержек, заторов. Модели СМО предлагают наилучшую фазировку сигнала и длину цикла с учетом интенсивности движения, типов транспортных средств, особенностей пешеходных потоков.
Планирование пропускной способности транспортных терминалов	Расчеты, основанные на принципах ТМО, помогают определить количество необходимых ресурсов (персонал, оборудование, инфраструктура) для повышения уровня обслуживания. Пример: Планирование количества касс, стоек регистрации в аэропортах, на железнодорожных станциях.
Управление погрузо-разгрузочными операциями	Погрузо-разгрузочные операции могут быть представлены как потоки задач, где каждая задача требует определённого времени и ресурсов для выполнения. Модели очередей в ТМО позволяют определить оптимальное количество погрузочной техники или работников для минимизации времени ожидания и избежания простоев.



Рис. 2. Структура модели в среде AnyLogic

менения состояний могут быть четко определены и не зависят от предыдущих событий.

В целом, аналитический подход позволяет получить глубокое понимание механизмов работы СМО и разработать решения с высокой степенью точности. Однако он может быть слишком сложным в применении к очень большим системам, где точные аналитические решения недоступны, и в этих случаях могут потребоваться имитационное моделирование или численные методы [11].

Имитационное моделирование подразумевает создание с помощью компьютерного программного обеспечения моделей, которые имитируют реальную работу системы массового обслуживания, где требования поступают в систему в соответствии с заданными процессами прибытия и обслуживаются на базе заранее определенных схем. Этот метод позволяет изучать поведение системы в условиях, трудных для аналитического решения, а также тестировать воздействие различных параметров на производительность системы и оценивать эффективность предлагаемых изменений в управлении потоками и ресурсами [8].

Теория массового обслуживания широко применяется во всех сферах, где важна эффективность обслуживания клиентов, оптимизация процессов и ресурсов.

В качестве областей применения концепций ТМО могут быть рассмотрены различные системы связи, погрузочно-разгрузочные комплексы (например, порты, железнодорожные станции), транспортные системы, магазины и т.д. К системам массового обслуживания также можно отнести банковские системы и даже компьютерные сети, как системы сбора, хранения и обработки информации [9].

В сфере транспорта и логистики рассматриваемые концептуальные положения играют весьма значимую роль и активно применяются в анализе и повышении эффективности деятельности транспортных систем, таких как дорожные сети, аэропорты, железные дороги, морские порты.

В рамках теории массового обслуживания, устанавливая и анализируя взаимосвязь между скоростью прибытия транспортных средств, временем обслуживания потоков пассажиров и грузов, количеством серверов (например, полос движения, билетных касс), специалисты по планированию в сфере транспорта получают возможность оптимизировать систему и повысить общую эффективность движения транспортных средств.

В таблице 1 отражены основные виды использования теории массового обслуживания в транспортной сфере.

Благодаря применению ТМО, в транспортной отрасли появляется возможность минимизировать временные задержки, сократить потребление ресурсов, снизить уровень загруженности. Анализ потоков транспортных средств и пассажиров, прогноз объемов и временных характеристик движения способствует улучшению качества обслуживания пассажиров и грузов и повышению общей эффективности работы транспортной системы.

Методы и материалы

Среда имитационного моделирования AnyLogic предоставляет развитый инструментальный для построения и исследования систем массового обслуживания на основе дискретно-событийного подхода. Реализация моделей СМО в AnyLogic осуществляется с использованием библиотеки процессного моделирования (Process Modeling Library) [4].

Базовая структура модели СМО в AnyLogic включает источник заявок, очередь, обслуживающее устройство и выходной поток. Входящий поток заявок формируется с помощью блока Source, параметры которого задают интенсивность и характер поступления требований в систему. Очередь реализуется блоком Queue, позволяющим задавать дисциплину обслуживания, предельную ёмкость и правила отбора заявок. Обслуживание требований моделируется блоком Service, в котором задаются распределения времени обслуживания и количество обслуживающих каналов. Завершение обслуживания и выход заявок из системы осуществляется через блок Sink.

Построение моделей СМО в AnyLogic позволяет реализовывать как классические аналитически описываемые системы, так и более сложные структуры, для которых аналитическое решение затруднено. В частности, в среде AnyLogic могут быть смоделированы системы с произвольными распределениями времени обслуживания и межприходных интервалов, ограниченной ёмкостью очередей, отказами в обслуживании, приоритетными дисциплинами и многофазной структурой обслуживания [5].

Важной особенностью AnyLogic является возможность параметризации моделей СМО. Интенсивность входного потока, количество каналов обслуживания, характеристики очередей и распределения случайных величин могут быть заданы в виде переменных, что позволяет проводить вычислительные эксперименты и анализ чувствительности показателей эффективности системы к изменению параметров. В результате моделирования автоматически формируются статистические показатели, такие как среднее время ожидания, средняя длина очереди, коэффициент загрузки обслуживающих каналов, пропускная способность системы и вероятность отказов.

При исследовании систем массового обслуживания в среде AnyLogic целесообразно использовать набор типовых моделей, отражающих основные классы СМО и характерные режимы их функционирования. Такой подход позволяет последовательно продемонстрировать возможности имитационного моделирования при анализе как простых, так и усложнённых систем обслуживания.

В качестве базовой модели рассматривается одноканальная система массового обслуживания типа М/М/1, позволяющая формализовать процессы поступления заявок, формирования очереди и обслуживания требований. Данная модель используется для иллюстрации фундаментальных характеристик СМО и получения основных показателей эффективности, таких как среднее время ожидания и коэффициент загрузки обслуживающего канала.

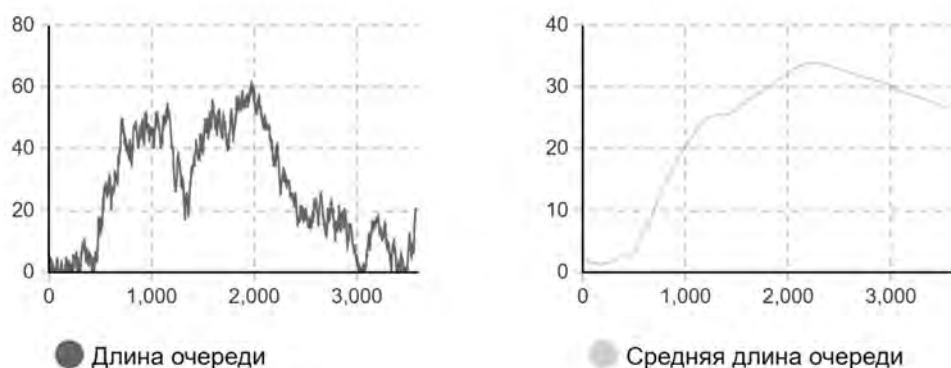


Рис. 3. Графики длины и средней длины очереди для системы М/М/1

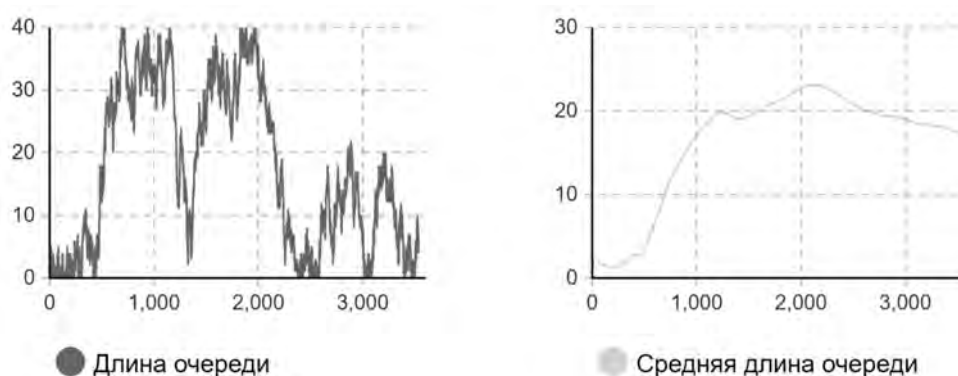


Рис. 4. Графики длины и средней длины очереди для системы с ограничением очереди М/М/1/г

Системы М/М/1 часто встречаются в транспортных процессах, где поток требований поступает с постоянной средней интенсивностью, а обслуживание осуществляется одним каналом. Типичными примерами таких процессов являются пассажирские билетные кассы на железнодорожных и автовокзалах, турникеты метро, а также проезд автомобилей через шлагбаумы на пунктах взимания платы.

Результаты

Для построения системы М/М/1 в программе AnyLogic целесообразно использовать функциональные блоки «Source», «Queue», «Delay» и «Sink». На рисунке 2 представлена структура модели в среде AnyLogic.

Используя функционал программы, из данных блоков можно извлечь следующие основные параметры СМО: коэффициент загрузки системы, среднее время ожидания в очереди, среднюю длину очереди, среднюю продолжительность обслуживания и среднее время нахождения заявки в системе.

Загрузка системы определяется, используя код обслуживания. `statsUtilization.mean()`, который возвращает собранную статистику по использованию данного блока.

Блоки `timeMeasureStart` и `timeMeasureEnd` фиксируют время, которое проводит агент на заданном участке диаграммы процесса. Эти блоки предназначены для получения данных о среднем времени ожидания в очереди и средней продолжительности обслуживания. Общее среднее время нахождения заявки в системе определяется как сумма указанных величин.

Для определения средней длины очереди используются встроенные возможности блока «Queue» - через функцию `statsSize.mean()`.

Функционал программы позволяет отслеживать значения параметров модели, сохранять их и отображать в виде графиков. На рисунке 3 представлен график длины и средней длины очереди системы за 3600 единиц модельного времени.

На графике средней длины очереди видно, что средняя длина очереди варьируется в пределах от 20 до 40. Однако, из графика длины очереди видно, что данный показатель пересекает значение 40 в двух временных интервалах.

В системе М/М/1 (с бесконечной очередью) стационарный режим требует загрузки системы меньше единицы, иначе очередь растет бесконечно.

Расширение базовой структуры осуществляется за счёт введения ограничений на ёмкость очереди, что приводит к рассмотрению системы массового обслуживания типа М/М/1/г.

Для преобразования рассматриваемой модели AnyLogic в систему массового обслуживания типа М/М/1/г требуется в блоке «очередь» указать значение параметра «ёмкость», а также подсоединить порт «outPreempted» к блоку sink. При установке ограничения на длину очереди 40, в системе возникнут потери заявок.

На рисунке 4 представлены графики длины и средней длины очереди системы с ограничением длины очереди.

На графике длины очереди видно, что длина очереди не превышает значение 40, следовательно, установленное ограничение сработало корректно. С установленным ограничением средняя длина очереди существенно сократилась и не превышает значения 30 на протяжении всего модельного времени.

В системе М/М/1/г (с конечной ёмкостью) система всегда ограничена (г – ограничение заявок), поэтому даже при загрузке больше единицы (интенсивность прихода больше интенсивности

обслуживания) система приходит в стационарное состояние, но с потерями заявок.

Выводы

Применение методов теории массового обслуживания в сочетании с инструментами имитационного моделирования позволяет эффективно анализировать стационарные режимы транспортных систем. Использование нотации Кендалла и марковских моделей обеспечивает формализованное описание структуры СМО и их основных параметров, что создаёт основу для последующего вычислительного анализа.

Моделирование в среде AnyLogic позволяет реализовать базовые и расширенные структуры СМО, получать статистические характеристики функционирования системы и исследовать влияние параметров входного потока, интенсивности обслуживания и ёмкости очереди на показатели эффективности.

Имитационное моделирование является универсальным инструментом анализа транспортных процессов, позволяющим проводить вычислительные эксперименты, оценивать чувствительность системы к изменению параметров и обосновывать управленческие решения, направленные на снижение задержек, оптимизацию ресурсов и повышение качества обслуживания пассажиров и грузов.

Литература:

1. Дворяткина С. Н., Прокуратова О. Н. Марковские процессы и простейшие модели теории массового обслуживания. – 2019. – 79 с.
2. Демидов С. С. Андрей Николаевич Колмогоров на переломе отечественной истории 50-х–60-х годов // Чебышевский сборник. – 2023. – Т. 24. – №. 4 (90). – С. 5-11.
3. Житарь Н. А., Манжос А. И., Сибко А. Р. История глобальной сети Интернет // Scientific Revolutions: essence and role. – 2023. – с. 141.
4. Кузьмин Д.В., Багинова В.В., Краснобаев Д.А., Мусатов Д.В. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №2. С. 42-48.
5. Кузьмин Д.В., Багинова В.В., Краснобаев Д.А., Совершенствование работы транспортно-логистической инфраструктуры с использованием средств дискретно-событийного имитационного моделирования // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 67-71.
6. Лихтциндер Б. Я. О классификации Кендалла // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18. – №. 3. – С. 328-332.
7. Лихтциндер Б. Я. О недостатках классификации систем массового обслуживания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Т. 28. – №. 3 – С. 155-157.
8. Петров Ю.В. Моделирование случайных величин: учебное пособие / Ю.В. Петров, С.Н. Аникин, С.А. Юхно; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 90 с.
9. Пителинский, К. В. Имитационное моделирование социотехнических систем: основы теории массового обслуживания: учебное пособие / К.В. Пителинский, А.В. Бородин. — Москва: ИНФРА-М, 2024. — 175 с.
10. Часова Н.А., Обыденная А.А. Применение теории массового обслуживания // Современные тенденции развития фундаментальных и прикладных наук. – 2021. – С. 175-177.
11. Шапкин, А.С. Математические методы и модели исследования операций: учебник / А.С. Шапкин, В.А. Шапкин. - Москва: Дашков и К, 2019. - 398 с.