

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**Модель массового обслуживания для сети передачи данных  
с многопутевой маршрутизацией**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы

направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»

факультета компьютерных наук и информационных технологий

Шубина Альберта Дмитриевича

Научный руководитель

зав. кафедрой, к.ф.-м.н., доцент

И.Е. Тананко

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н., доцент

И.Е. Тананко

Саратов 2019

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие современного общества влечет за собой все более широкое использование и распространение сложных систем с распределенным и параллельным принципом функционирования. Примером таких систем могут быть многопроцессорные системы, кластеры, распределенные базы данных, сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией. Анализ и изучение производительности, протекающих в системах подобного рода процессов, проводится с помощью математических моделей в виде сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований.

В сетях массового обслуживания с делением и слиянием требований поступающее требование делится в точке деления (fork-point) на некоторое число родственных фрагментов, которые затем распределяются по системам сети обслуживания. После завершения обслуживания всех фрагментов требования происходит их слияние в точке объединения (join-point) в исходное требование, которое считается обслуженным и покидает сеть обслуживания.

Предметом исследования в таких сетях обслуживания чаще всего становится время отклика – длительность интервала времени, прошедшего между делением требования на фрагменты и объединением его фрагментов. Также важной характеристикой является длительность интервала времени, в течение которого фрагменты некоторого требования ожидают объединения – задержка синхронизации.

Следует отметить, что кроме аналитических методов для анализа сложных систем используется также имитационное и компьютерное моделирование. При помощи имитационного моделирования систем и сетей массового обслуживания можно быстро и эффективно создать модель, провести анализ и проиграть множество вариантов событий, не затрачивая много времени и других средств.

Таким образом, задачи связанные с исследованием математических моделей систем с распределенным и параллельным принципом функционирования являются актуальными научными проблемами.

**Цель:**

Для сети передачи данных с технологией многопутевой маршрутизации необходимо построить математическую модель в виде сети массового обслуживания с делением и слиянием требований. В рассматриваемой модели будет учтена возможность перераспределения нагрузки, что будет выражено в изменении топологии сети массового обслуживания. Для сети обслуживания определяются ее параметры, указываются подходы для исследования модели.

В ходе выполнения данной работы необходимо выполнить следующие **задачи:**

- ознакомление с протоколом МРТСП;
- изучение основных результатов для сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований;
- разработка математической модели для сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией;
- программная реализация имитационной модели функционирования сети массового обслуживания с переменной структурой с делением и слиянием требований;
- проведение экспериментов, анализ результатов.

**Методологические основы** исследования сетей массового обслуживания для сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией представлены в работах И. Ю. Митрофанова [4], И.Е. Тананко [7], А. Thomasian [17], М. Fidler, В. Walker, Y. Jiang [29].

**Научная новизна магистерской работы** заключается в том, что впервые определены параметры цепи Маркова, используемой для анализа сети с многопутевой маршрутизацией.

**Теоретическая и/или практическая значимость магистерской работы.** В магистерской работе разработана математическая модель сети с многопутевой маршрутизацией и имитационная модель сети массового обслуживания с делением и слиянием требований.

Практическая значимость заключается в возможности дальнейшего использования программного продукта (программы для анализа сетей массового обслуживания для сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией) для исследования свойств реальных дискретных стохастических систем с сетевой структурой при их проектировании или оптимизации.

**Структура и объём работы.** Магистерская работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Общий объём работы – 79 страниц, из них 58 страниц – основное содержание, включая 16 рисунков и 1 таблицу, список использованных источников информации – 44 наименования.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первый раздел «Основные теоретические сведения»** посвящен описанию понятия и видов систем массового обслуживания с делением и слиянием требований. Раздел содержит два подраздела.

Подраздел *«Понятие систем массового обслуживания»* включает в себя описание объектов и правил работы систем массового обслуживания.

Система массового обслуживания (СМО) определяется потоком требований и алгоритмом их обслуживания.

Подраздел *«Виды систем массового обслуживания»* включает в себя описание видов систем массового обслуживания, основных характеристик для исследования систем массового обслуживания.

**Второй раздел «Сети массового обслуживания с делением и слиянием требований»** посвящен описанию типов сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований. Раздел содержит два подраздела.

Подраздел *«Типы сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований»* описывает следующие типы СеМО с делением и слиянием требований: модель центрального деления, модель распределенного деления с синхронизирующей очередью, модель центрального деления без синхронизирующей очереди.

Подраздел *«Анализ сетей с распределенным делением и синхронизирующей очередью»* описывает основные методы анализа сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований.

**Третий раздел «Обзор протокола МРТСП»** посвящен описанию работы протокола ТСП, управлением трафиком в нем, управлением очередями, распределением нагрузки. Раздел содержит шесть подразделов.

Подраздел *«Управление трафиком и борьба с перегрузками в протоколе ТСП»* посвящен описанию одной из ключевых функций транспортного протокола – борьбе с перегрузками.

Подраздел *«Протоколы управления очередью в маршрутизаторах»* посвящен описанию предотвращения перегрузок в маршрутизаторах.

Подраздел *«Качество обслуживания»* посвящен описанию гарантий производительности, способов решений для предоставления высокого качества обслуживания.

Подраздел *«Сброс нагрузки»* посвящен описанию процесса игнорирования маршрутизаторами пакетов, которые они не могут обработать.

Подраздел *«Случайное раннее обнаружение»* посвящен описанию работы алгоритмов борьбы с перегрузками.

Подраздел *«Протокол МРТСП»* посвящен описанию работы, способов реализации многопутевого протокола для транспортного уровня Multipath ТСП.

**Четвертый раздел «Математическая модель сети с многопутевой маршрутизацией»** посвящен описанию математической модели сети

передачи данных с многопутевой маршрутизацией. Раздел содержит один подраздел.

В качестве математической модели сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией предлагается использовать сети массового обслуживания [1] с делением и слиянием требований, которые являются математическими моделями дискретных стохастических систем с сетевой структурой и стохастическим характером функционирования [2, 5].

Сеть обслуживания состоит из  $M$  параллельных одноприборных систем массового обслуживания  $S_1, \dots, S_M$ . Предполагается, что в сеть поступает пуассоновский поток требований с интенсивностью  $\lambda$ , каждое требование состоит (делится) из случайного числа фрагментов, которое задано распределением вероятностей  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_R)$ , где  $d_i$  задает вероятность деления на  $i$  фрагментов.

Подраздел «Уравнения состояний сети массового обслуживания» посвящен описанию основных состояний сети массового обслуживания.

Состояние сети обслуживания определим как вектор  $\mathbf{x} = (n_0, k, n_1, r_1, \dots, n_M, r_M)$ , где  $n_0$  – определяет число фрагментов в глобальной очереди сети массового обслуживания;  $k \in \{0, 1, \dots, M\}$  есть номер системы массового обслуживания, в которую должна быть осуществлена попытка следующего поступления; в том случае, когда все системы находятся в состоянии блокировки –  $k = 0$ ;  $n_i$  – задает число фрагментов в локальных очередях;  $r_i \in \{a, u\}$  – есть состояние доступности локальных очередей, где  $a$  отражает состояние «заблокирована для поступления»,  $u$  – «не заблокирована для поступления»,  $i = 1, \dots, M$ .

Процесс  $\{\mathbf{x}(t), t \geq 0\}$  есть цепь Маркова с непрерывным временем и пространством состояний  $\mathbf{X}$ ,

$$\mathbf{X} = \{(n_0, k, n_1, r_1, \dots, n_M, r_M) : n_0 > 0, 0 \leq n_i \leq B + 1, r_i \in \{a, u\}, i = 1, \dots, M\}.$$

Обозначим через  $q(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  интенсивность перехода цепи из состояния  $\mathbf{x}$  в состояние  $\mathbf{x}'$ . Для интенсивностей перехода будут верны следующие

выражения, соответствующие событиям поступления, завершения обслуживания, снятия блокировки:

#### ПОСТУПЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ

1) если для всех  $i = 1, \dots, M$ , справедливо  $(n_i = B + 1) \text{ or } (r_i = u)$ ,

$$q((n_0, k, n_1, r_1, \dots, n_M, r_M), (n_0 + d, 0, n_1, u, \dots, n_M, u)) = \lambda \sigma_d;$$

2) если  $k \neq 0, n_k < B + 1$ ,

$$q((0, k, n_1, r_1, \dots, n_k, a, \dots, n_M, r_M), (0, k', n_1, r_1, \dots, n_k + 1, a, \dots, n_M, r_M)) = \lambda \sigma_1;$$

где  $k'$  определяет номер системы, в которую будет произведена попытка следующего поступления фрагмента в соответствии с дисциплиной RoundRobin.

3) если  $k_1 \neq 0$ ,

$$q\left((0, k_1, n_1, r_1, \dots, n_k, a, \dots, n_M, r_M), (n_0, k_{d+1}, n'_1, r'_1, \dots, n'_{k_1}, r'_{k_1}, \dots, n'_M, r'_M)\right) = \lambda \sigma_d;$$

где  $(n_0, n'_1, \dots, n'_k) = (n_1, \dots, n_M) + e(k_1, k_2, \dots, k_d)$ , здесь  $(k_1, k_2, \dots, k_d)$  задает номера тех систем, в которые перейдет следующий фрагмент требования, или 0 при переходе в глобальную очередь, при поступлении требования, состоящего из  $d$  фрагментов,  $e(k_1, k_2, \dots, k_d)$  – вектор длины  $(M + 1)$ , в котором  $e_j$  задаёт число вхождений  $j$  в вектор  $(k_1, k_2, \dots, k_d)$ ,  $(r'_1, \dots, r'_M)$  – задаёт состояние доступности систем сети обслуживания после поступления последнего фрагмента требования.

#### ЗАВЕРШЕНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ФРАГМЕНТА В СИСТЕМЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ

4) если  $n_0 > 0, n_i > 0$ ,

$$q((n_0, 0, n_1, u, \dots, n_i, u, \dots, n_M, u), (n_0, 0, n_1, u, \dots, n_i - 1, u, \dots, n_M, u)) = \mu_i;$$

5) если  $n_0 = 0, n_i > 0$ ,

$$q((0, k, n_1, r_1, \dots, n_i, r_i, \dots, n_M, r_M), (0, k, n_1, r_1, \dots, n_i - 1, r_i, \dots, n_M, r_M)) = \mu_i;$$

#### СНЯТИЕ БЛОКИРОВКИ С СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

б) если  $n_0 = 0, r_i = u$ ,

$$q((0, k, n_1, r_1, \dots, n_i, u, \dots, n_M, r_M), (n_0, k, n_1, r_1, \dots, n_i, a, \dots, n_M, r_M)) = \varphi_i;$$

7) если  $n_0 > 0$ ,  $r_i = u$ ,

$$q((n_0, 0, n_1, u, \dots, n_i, u, \dots, n_M, u), (n_0 - s, k', n_1, u, \dots, n_i + s, r'_i, \dots, n_M, u)) = \varphi_i,$$

здесь  $s = \min\{B + 1 - n_i, n_0\}$ ,  $r'_i$  определяет то состояние доступности, которое будет достигнуто после поступления  $s$  фрагментов из глобальной очереди:

$$r'_i = \begin{cases} u, & \text{если } s < n_0 \\ a, & \text{если } s = n_0 \end{cases} \quad k' = \begin{cases} 0, & \text{если } s < n_0 \\ i, & \text{если } s = n_0 \end{cases}$$

Определим макросостояние цепи Маркова с номером  $i$  как множество

$$X_i = \{(n_0, k, n_1, r_1, \dots, n_M, r_M) \in X: n_0 = i\}.$$

Стационарное распределение вероятностей  $\pi$  состояний цепи Маркова может быть найдено как решение уравнений равновесия [5],

$$\pi Q = 0,$$

где  $Q$  – инфинитезимальный оператор цепи Маркова, который определяется исходя из выражений для интенсивностей перехода, представленных выше.

Из анализа уравнений равновесия следует, что для рассматриваемой цепи Маркова переход из состояния  $x \in X_i$  возможен только в состояния из множеств  $X_{i-(B+1)}, \dots, X_{i+R}$ . Таким образом, стационарное распределение может быть получено также с использованием матрично-аналитических методов.

**Пятый раздел «Описание комплекса программ имитационного моделирования и численного анализа сетей массового обслуживания с делением и слиянием требований»** содержит описание разработанного комплекса, аспекты практического использования. Раздел содержит три подраздела.

Подраздел *«Структура имитационной модели сетей массового обслуживания»* посвящен описанию методик имитационного моделирования, основных классов элементов сетей массового обслуживания, с помощью



которых можно конструировать модели различного вида, общий алгоритм имитационного моделирования.

Дискретно-событийное имитационное моделирование выполняется путем генерации событий на временной оси и последовательным сдвигом таймера модельного времени по событиям на этой оси. В зависимости от того, к какому событию произошел переход, выполняются соответствующие действия:

1. Поступление требования в систему – маршрутизатор определяет систему, на которую должно поступить требование. Если обслуживающий прибор может ее обработать, то на временной оси в будущем генерируется событие завершения обслуживания, иначе – требование помещается в буфер.

2. Завершение обслуживания – маршрутизатор определяет, должна ли заявка покинуть сеть. Далее обслуживающий прибор извлекает очередное требование и ставит его на обслуживание.

3. Снятие блокировки – так как буферы на приборах СМО имеют ограниченную вместимость, то при их заполнении прибор на некоторое время переходит в состояние блокировки и маршрутизатор в течение этого времени не предпринимает попыток отправить поступающие в СМО требования на обслуживание в эту СМО. После того как в буфере освобождается место, блокировка снимается и СМО снова принимает требования.

Завершение моделирования – имитационная модель прекращает все вычисления.

В подразделе «*Описание разработанного комплекса*» рассматривается программный продукт моделирования процессов массового обслуживания.

Разработанный комплекс проблемно-ориентированных программ и алгоритмов моделирования процессов массового обслуживания состоит из программы имитационного моделирования сетей обслуживания, а также алгоритмов для численных расчетов вероятностных характеристик

функционирования систем и сетей обслуживания на основе полученных в работе результатов.

Имитационная модель содержит так же основную программу, основное назначение которой – синхронизация и управление программными процессами.

В подразделе «Аспекты практического использования комплекса» приводятся основные результаты моделирования.

Рассматривается сеть массового обслуживания с параметрами:

- интенсивность обслуживания  $\mu = 3$ ;
- интенсивность повторного обращения  $\varphi = 1$ ;
- число систем обслуживания  $M = 5$ ;
- вектор распределения числа фрагментов

$$d = \{0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6\};$$

- вместимость локальных очередей  $B = 5$ .

Для данной сети были вычислены оценки для:

м.о. длительности пребывания требований  $T$  в сети обслуживания, м.о. числа фрагментов  $N_0$  в глобальной очереди, м.о. числа фрагментов  $N_i$  в локальных очередях. Интенсивность входящего потока изменялась в диапазоне от 0,1 до 1,5.

График зависимости оценки м.о. длительности пребывания требований в сети обслуживания от интенсивности входящего потока приведен на рисунке № 15.

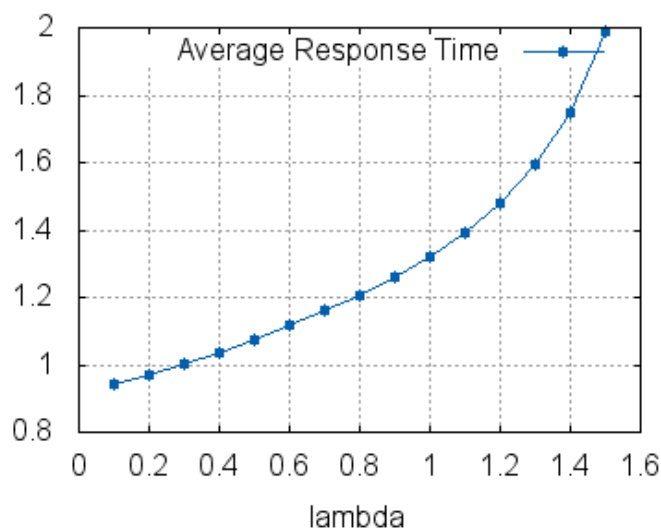


Рисунок 1 - График зависимости оценки м.о. длительности пребывания требований в сети обслуживания от интенсивности входящего потока

На рисунке № 16 представлена зависимость оценки математического ожидания длительности пребывания требований в сети обслуживания от интенсивности повторных обращений.

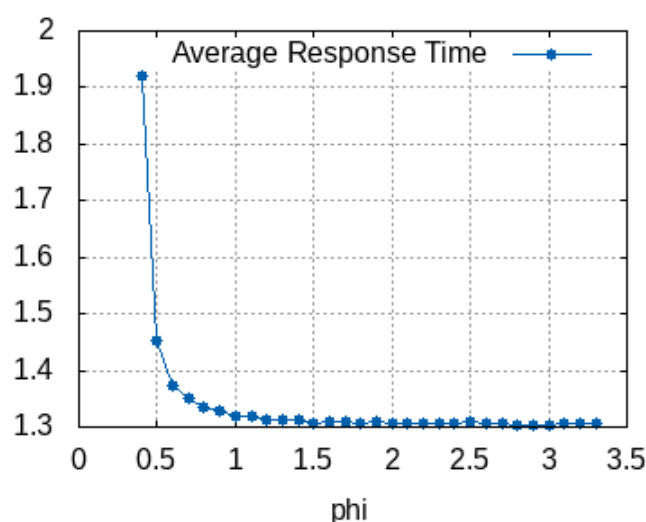


Рисунок 2 - График зависимости оценки математического ожидания длительности пребывания требований в сети обслуживания от интенсивности повторных обращений.

Из графика видно что существенные изменения для м.о. длительности пребывания требования в сети обслуживания имеют место только когда интенсивность повторных обращений  $\varphi < 1.5$ . Данное наблюдение может быть полезным в том случае, когда каждое повторное обращение имеет некоторую стоимость (требование к вычислительным ресурсам, возникающие задержки и т. д.). Таким образом, оптимальным значением для  $\varphi$  может стать  $\varphi \approx 1.5$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены основные подходы к организации сетей на базе протоколов многопутевой маршрутизации, а именно МРТСР. Был описан сам протокол, его основные особенности. Для сети передачи данных с многопутевой маршрутизацией была разработана математическая модель в виде сети массового обслуживания с делением и слиянием требований. Предложенная модель позволяет также учитывать возникающие в сети перегрузки и отказы в обслуживании.

Была построена имитационная модель сети массового обслуживания с переменной структурой, состоящая из  $M$  одноприборных систем обслуживания  $S_1, \dots, S_M$ , типа  $\cdot/M/1/V$ , с использованием которой можно получать оценки для стационарных характеристик. Результаты работы имитационной модели можно использовать для задач исследования оптимизации и синтеза реальных информационных систем.

**Отдельные части магистерской работы были опубликованы/представлены на конференции:**

Шубин, А. Д. Имитационное моделирование как эффективное средство решения задач, возникающих в нефтегазовой промышленности / А. Д. Шубин, О. А. Осипов // Информационные технологии в образовании: Материалы X Всероссийск. научно-практ. конф. – Саратов: ООО «Издательский центр «Наука»», 2018. – С. 427–429.

### **Основные источники информации:**

1 Митрофанов, Ю. И. Анализ сетей массового обслуживания: Учеб. пособие / Ю. И. Митрофанов. – Саратов: Изд-во «Научная книга», 2005. – 175 с.

2 Тананко, И. Е. Моделирование систем: Учебное пособие / И. Е. Тананко. – Саратов: Изд-во «Научная книга», 2007. – 116 с.

3 Кофман, А. Массовое обслуживание. Теория и приложения / А. Кофман; пер. с фран. – М.: Мир, 1965. – 303 с.

4 Вишнеvский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишнеvский. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

5 Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок; пер. И. И. Грушко. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

6 RFC 793 TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL [Электронный ресурс] // <https://tools.ietf.org/html/rfc793> (Дата обращения: 04.11.2018)

7 RFC 6824 TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses [Электронный ресурс] // <https://tools.ietf.org/html/rfc6824> (Дата обращения: 04.11.2018)

8 Thomasian, A. Analysis of Fork/Join and Related Queueing Systems / A. Thomasian // ACM Computing Surveys. – New York, 2014. – Vol. 47, № 2. – P. 17:1–17:71.

9 Fidler, M. Non-Asymptotic Delay Bounds for MultiServer Systems with Synchronization Constraints / M. Fidler, B. Walker, Y. Jiang // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2018. – Vol. 29, № 7. – P. 1545–1559.