

Научная статья

УДК 519.213.2

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90



Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов

Наталья Михайловна Редругина, redrugina.nm@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В данной работе рассматривается проблема объединения слабосвязанных сервисов в единый рабочий процесс и исследуются методы расчета его временных характеристик с целью обеспечения контроля качества обслуживания и выявления «узких мест» в информационной системе. В дополнение к анализу процессов обслуживания запросов в цепочках локальных транзакций, рассматривается возможность внедрения инструментов массового обслуживания, таких как параллельное обслуживание системой Fork-Join, которые могут повысить эффективность обслуживания и улучшить производительность системы. В работе рассмотрен математический аппарат сетей Джексона, который используется для определения временных характеристик рабочего процесса транзакционной системы как сети систем массового обслуживания. Основным результатом исследования является разработка и представление математического инструмента для определения временных характеристик рабочего процесса транзакционной системы. Разработанный математический аппарат может быть использован для расчета временных характеристик рабочих процессов в разрабатываемых и эксплуатируемых информационных системах, для обеспечения высокого уровня качества обслуживания.

Ключевые слова: рабочий процесс, сети систем массового обслуживания, слабосвязанные услуги, транзакционные системы, Fork-Join, сети Джексона, QoS

Ссылка для цитирования: Редругина Н.М. Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 82–90. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90

A Method for Time Characteristics Calculating in the Service Platforms of Infocommunication Transactional Services with Parallel Requests Processing

Наталья Редругина, redrugina.nm@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: This paper addresses the problem of combining loosely coupled services into a single workflow and investigates methods for calculating its time characteristics. The goal of the study is to provide quality control over service quality and to identify bottlenecks in the information system. In addition to the analysis of request service processes in chains of local transactions, the possibility of introducing mass service tools, such as paralleling service

by Fork-Join system, which can increase the efficiency of service and improve the performance of the system is considered. The paper considers the mathematical apparatus of Jackson networks, which is used to determine the time characteristics of the workflow of the transaction system as a network of mass service systems. The main result of the research is the development and presentation of a mathematical tool for determining the time characteristics of the workflow of a transactional system. The developed mathematical apparatus can be used to calculate the time characteristics of work processes in the developed and operated information systems, to ensure a high level of service quality.

Keywords: workflow, queuing networks, loosely coupled services, transactional systems, Fork-Join, Jackson networks, QoS

For citation: Redrugina N. A Method for Time Characteristics Calculating in the Service Platforms of Information Transactional Services with Parallel Requests Processing. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3): 82–90. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90

1. Введение

С учетом развития сетей нового поколения наблюдается значительный рост исследований [1–4], направленных на повышение качества предоставляемых конечным пользователям услуг. Однако становится все более очевидной необходимость обеспечения высокого качества не только самих сетей связи, но и приложений, использующих эти сети, чтобы пользователи могли полностью раскрыть возможности новых технологий.

Инфокоммуникационные системы, поддерживающие рабочие процессы и приложения электронной коммерции, требуют работы с транзакциями. Транзакции обеспечивают взаимодействие между веб-сервисами, серверами, участвующими в бизнес-транзакциях, локальными базами данных и т. д. Эти слабосвязанные услуги рассматриваются как последовательно выполняемые единицы работы с высоким уровнем надежности. В работе [5] дано определение рабочих процессов как программного обеспечения на основе правил, позволяющего координировать и контролировать выполнение действий (транзакций), представляющих бизнес-процесс. Рабочий процесс состоит из набора вызовов веб-служб, встроенных в ориентированный граф [6].

Шаблоны рабочих процессов были предложены в работах, таких как [7], а также для систем электронного здравоохранения [8]. Они могут быть использованы для определения функциональных возможностей приложения и последовательности выполнения действий его компонентов. В работе [9] представлен алгоритм планирования рабочего процесса на основе срочности, где расчет характеристик основан на симуляции. Это позволяет сформулировать направление, связанное с данной работой, основанное на разработке математических моделей и методов расчета вероятностно-временных характеристик для реализации алгоритма построения рабочих процессов в слабосвязанных транзакционных услугах.

В работе [10] предложена методология и архитектура фреймворка для оценки качества предоставления слабосвязанных услуг (QoS, аббр. от англ. Quality of Service). Авторы работы указали, что для общей применимости подхода было бы точнее разработать модель работы сети очередей для вычисления QoS, что будет реализовано в данном исследовании для сценариев рабочих процессов обслуживания запросов в транзакционных системах.

При разработке инфокоммуникационных систем необходимо производить моделирование в целях прогнозирования для получения качественных характеристик системы, определения узких мест, зависимости изменения параметров QoS от внешних воздействий. Для получения качественных характеристик сервисов необходима оценка параметров атомарных подсистем обслуживания транзакций и их комбинация. Поэтому целью данной работы будет создание математического аппарата оценки временных характеристик системы, основанной на выполнении транзакций внутри рабочего процесса.

2. Моделирование отдельных компонент рабочих процессов слабосвязанных услуг

Цель данного исследования заключается в разработке функциональной модели рабочего процесса выполнения последовательной цепочки локальных транзакций, которая также может включать в себя ветвление сценариев прохождения системы [11]. Данная модель будет подвергаться математическому анализу, а также проверке результатов моделирования с использованием семейства имитационных моделей в программной среде AnyLogic. В [12] авторы проводят моделирование веб-сервисов и выдвигают предположение, что процесс перехода между состояниями системы описывается цепью Маркова, а время пребывания в состоянии обслуживания имеет экспоненциальное распределение с функцией распределения вероятности (ФРВ) времени, равной:

$$F_s(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (1)$$

где μ – интенсивность обслуживания запросов.

К такому выводу пришли и авторы работ [13–15], используя в своем исследовании экспоненциально распределенное время t , дополнительно в [16] применяя к модели М/М/1 параметр $\mu(1 - \rho)$. Поступление на обслуживающие приборы распределяется по закону Пуассона, служебная дисциплина обслуживания FIFO (аббр. от англ. First In, First Out). В иных случаях возможно применение к времени обслуживания транзакций функций распределения, заданных по равномерному закону Вейбулла или Парето [17].

Все рассмотренные исследования включают получение вероятностно временных характеристик систем массового обслуживания (СМО) типа М/М/1 при моделировании реальных систем. Задача, поставленная в данном исследовании, предусматривает построение математического аппарата расчета как одноканальных, так и многоканальных систем М/М/ν (рисунок 1), включенных в цепочку, реализующую рабочий процесс обслуживания транзакций. Для реализации подобного моделирования будет использован математический аппарат сетей Джексона и его дополнение системой параллельного обслуживания.

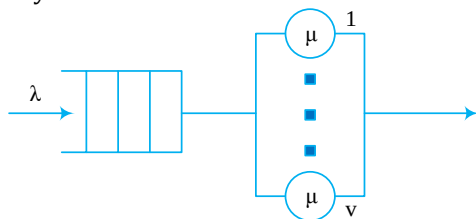


Рис. 1. Многоканальная система массового обслуживания

Fig. 1. Multi-channel Queueing System

2.1. Моделирование рабочего процесса обслуживания локальных транзакций математическим аппаратом сетей Джексона

На рисунке 2 представлена функциональная модель рабочего процесса обслуживания последовательных локальных транзакций. Данная сеть СМО

(СеМО) представляет совокупность эквивалентных обслуживающих узлов, для которых можно провести последовательный анализ перехода требований от узла к узлу для получения качественных временных характеристик.

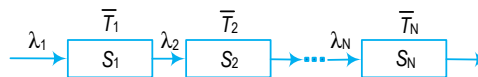


Рис. 2. Модель рабочего процесса обслуживания в цепочке последовательных локальных транзакций

Fig. 2. Model of the workflow for serving sequential local transactions

Общая средняя задержка T_s от начала до конца обслуживания в выделенной цепочке СМО получается суммированием отдельных задержек на каждом из них:

$$\bar{T}_s = \sum_{i=1}^N \bar{T}_i. \quad (2)$$

Для упрощения последовательного анализа цепочки узлов можно использовать свойство сцепления, как показано на рисунке 3. То есть преобразовать последовательное обслуживание запросов цепочкой СМО в один эквивалентный узел.

Для нахождения математического ожидания и дисперсии временных характеристик для всей сети необходимо провести расчет плотности распределения вероятности (ПРВ) времени нахождения требования в рассматриваемой СеМО. Согласно [18] ФРВ времени прохождения всей цепочки микросервисов определяется сверткой ФРВ времени прохождения в каждой СМО:

$$F_x(t) = F_{e1}(t) * F_{e2}(t) * F_{e3}(t) * \dots * F_{eN}(t), \quad (3)$$

где $F_{ei}(t)$ – ФРВ времени окончания обслуживания в i -й СМО, $i = 1, \dots, N$.

Данная функция находится с использованием аппарата свертки определенных в первой главе ФРВ времени обслуживания $F_s(t)$ и времени ожидания в очереди $F_w(t)$.

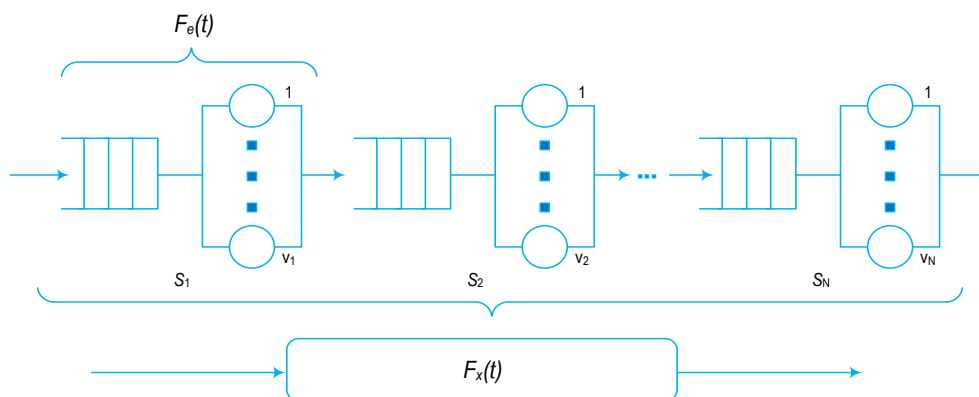


Рис. 3. Модель цепочки локальных транзакций в рабочем процессе системы

Fig. 3. Model of the local transaction chain in the system's workflow

Для системы типа М/М/ν в [19] функция определена выражением (4), где $P(0)$ – вероятность про-

стоя системы; A – загрузка системы, соответствующая неравенству $\lambda/\mu < \nu$; ν – количество обслуживающих приборов.

$$F_e(t) = \begin{cases} 1 - \frac{P(0)}{\nu - A - 1} [e^{-\mu(v-\lambda)t} - e^{-\mu t}] - e^{-\mu t}, & 0 < A \neq \nu - 1 \\ 1 - \mu t P(0) e^{-\mu t} - e^{-\mu t}, & 0 < A = \nu - 1 \end{cases} \quad (4)$$

Стоит отметить, что функцию распределения вероятностей (5) можно определить как:

$$F_e(t) = \begin{cases} 1 - e^{-xt}, & t > 0; \\ 0, & t = 0; \end{cases} \quad (5)$$

где x – величина, обратная среднему времени ожидания заявки.

Для расчета сети СМО с ветвлением сценариев прохождения системы (см. модель на рисунке 4) необходимо использовать принцип свертки ФРВ времени прохождения всех СМО в сценарии. Однако в данном случае ФРВ прохождения системы $F_x(t)$ зависит от разбиения потока заявок в сети при поступлении на параллельные узлы, что изменяет интенсивность входного потока в каждый узел. Согласно источнику [20], интенсивность входного потока λ_j в узел j из предшествующего узла i определяется матрицей переходов $R = \|p_{ij}\|$ и равняется $\lambda_i \times R$.

В результате проведенного анализа и полученных выражений расчета ФРВ прохождения всей цепочки СМО, возможен расчет математического ожидания и дисперсии времени прохождения требованиями системы или выделенного маршрута следующими выражениями:

– первый начальный момент или математическое ожидание времени пребывания в выделенной сети:

$$M[T_{\text{СемО}}] = \int_0^{+\infty} t dF_x(t); \quad (6)$$

– дисперсия времени пребывания в выделенной сети:

$$D[T_{\text{СемО}}] = M[(T_{\text{СемО}})^2] - (M[T_{\text{СемО}}])^2. \quad (7)$$

2.2. Параллельная обработка запросов

Сложные информационные структуры часто связаны на сценариях параллельной обработки запросов. Авторы работы [21] проводят анализ системы параллельной обработки и проводят имитационное моделирование системы вида М/Г/п. В работе [22] исследуется применение параллелизма для построения рабочих процессов с использованием эквивалентных микросервисов. Для реализации данного блока параллельной обработки в рамках рабочего процесса необходимо определить математический аппарат, который позволит получить временные характеристики системы. На рисунке 5 представлена обобщенная схема реализации параллелизма, которая является шаблоном для разработки многих моделей репликации. К примеру, она может быть использована при реализации расчета качественных характеристик распределенной системы хранения данных с синхронной записью блоков данных на дисковое пространство [23].

Параллельность включает в себя репликацию запроса на m узлов, что может быть использовано для двух целей. Во-первых, для моделирования процесса одновременного опроса двух слабосвязанных услуг с целью получения ответа от всех узлов. Если обслуживание хотя бы одной из реплик завершается неудачей, то обслуживание оставшихся также прекращается и запрос, поступивший на начальный узел, считается необслуженным. Во-вторых, при необходимости разбиения поступающего запроса на более мелкие компоненты с их одновременным обслуживанием на параллельных узлах [24]. Обе влекут изменение времени выполнения транзакции:

$$t_{\text{обсл.}}^* = \frac{t_{\text{обсл.}}}{m}. \quad (8)$$

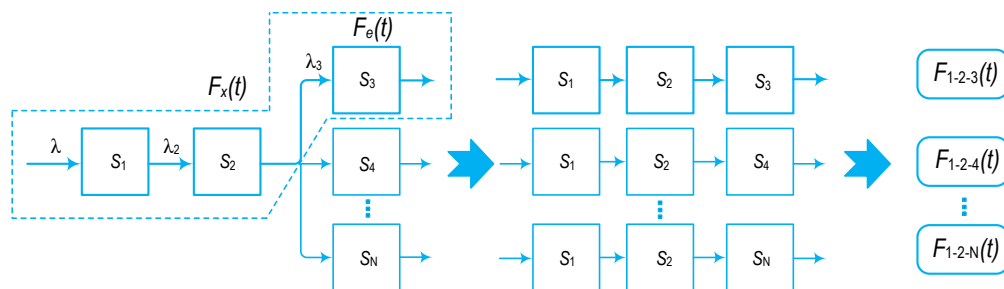


Рис. 4. Модель ветвления сценариев рабочих процессов системы

Fig. 4. Model of branching workflow scenarios in the system

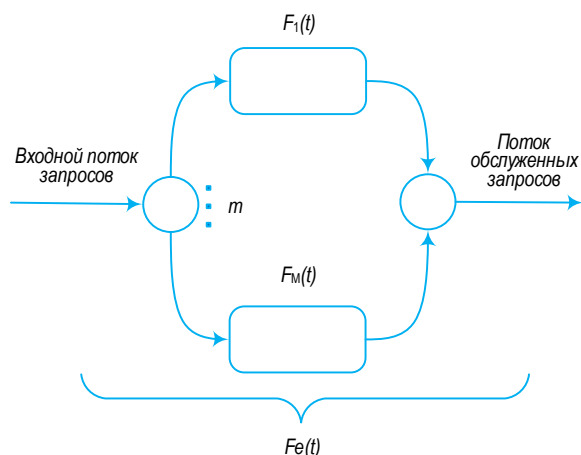


Рис. 5. Схема параллельной обработки запросов

Fig. 5. Diagram of Parallel Query Processing

Результатом реализации данного подхода будет зависимость (9), где временем удачного обслуживания является максимальное время обработки, а время, заложенное на ответ о неудачном обслуживании, является временем первого компонента, обслуживание которого завершилось неудачей:

$$T = \begin{cases} \max\{T_{\text{обс.}}\}: |T_{\text{обс.}}| > 0 \\ \min\{T_{\text{неуд.}}\}: |T_{\text{обс.}}| = 0 \end{cases}; T = \{t_1, \dots, t_m\}, \quad (9)$$

где $T_{\text{обс.}}$ – время успешного обслуживания в каждой запущенной ветви; $T_{\text{неуд.}}$ – время неудачного обслуживания

Математический аппарат Fork-Join сохраняет выделенное свойство атомарности при выполнении транзакций, что позволяет использовать его для расчета качественных характеристик элемента рабочего процесса в выделенной задаче расчета. Для получения точных результатов математического моделирования используется выражение (10) приближенной ФРВ времени для всей сети с коэффициентом репликации равным m , предложенное в работе [25], где c_i – коэффициент репликации (11), равный $c_{m+1} = 0$, $c_1 = 1$, $c_2 = 1 - p_1/4$, и p_i – вероятность того, что запрос будет ожидать обслуживания. Для учета блока параллельной обработки в расчете функции прохождения всей цепочки локальных транзакций, рассчитанной в уравнении (3), были определены выражения для изображения ФРВ и плотности распределения вероятности (ПРВ) времени параллельной обработки двумя слабосвязанными услугами (12, 13).

Расчет моделей с коэффициентом репликации $m > 2$ или с введением сложных распределений, рационально производить с использованием аппарата имитационного моделирования.

$$F_{FJ}(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^m c_i [1 - F_{Si}(t)] \prod_{j=1}^{i-1} F_{Sj}(t) \approx \sum_{i=1}^m (c_i - c_{i+1}) \prod_{j=1}^i F_{Sj}(t), \quad (10)$$

$$c_i \approx \left(1 - \frac{p_{i-1}}{4}\right) \left(1 - \frac{p_{i-2}}{8}\right), \quad 3 \leq i \leq m, \quad (11)$$

$$F_{FJ2}(s) = \frac{(\lambda - s - \mu) \left(-\lambda + 4\mu + \frac{4\mu(-2\lambda + s + 2\mu)}{s}\right)}{4\mu * (\lambda - s - \mu)(2\mu + s - 2\lambda)} + \frac{(-2\lambda + s + 2\mu)(8\mu - \lambda)}{4\mu * (\lambda - s - \mu)(2\mu + s - 2\lambda)}, \quad (12)$$

$$f_{FJ2}(s) = \frac{8\mu^3 - 16\lambda\mu^2 + (\lambda s + 8\lambda^2)\mu - \lambda^2 s}{4\mu * (\mu + s - \lambda)(2\mu + s - 2\lambda)}. \quad (13)$$

3. Аналитическое и имитационное моделирование частного случая рабочего процесса для слабосвязанных услуг

В качестве примера проведем расчет цепочки локальных транзакций с внедрением параллельной обработки запроса (рисунок 6). Для расчета ФРВ времени прохождения такой сети, включая систему параллельной обработки запросов, также, как и в (3) используется уравнение свертки:

$$F_x(t) = F_{e1}(t) * F_{e2}(t) * F_{FJ}(t), \quad (14)$$

Среднее время пребывания запроса в системе M/M/1 определяется выражением:

$$\bar{T}_e = \bar{t}_{\text{обсл.}} + \bar{W} = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{x}. \quad (15)$$

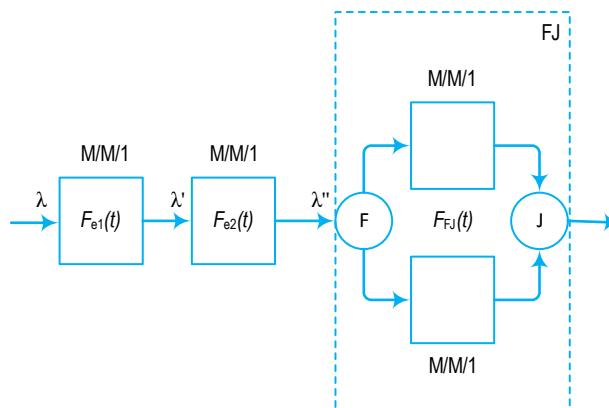


Рис. 6. Модель рабочего процесса с параллельной обработкой запроса

Fig. 6. Model of the workflow with parallel query processing

Используя выражение (5), определяем ФРВ времени нахождения заявки в системе $F_{ei}(t)$:

$$F_{ei}(t) = \begin{cases} 1 - e^{-(\mu-\lambda)t}, & t > 0; \\ 0, & t = 0. \end{cases} \quad (16)$$

На рисунке 7 изображен график ПРВ и ФРВ времени прохождения трех сценариев выполнения транзакции: S (система FJ), $S1$ (СМО_2 и система FJ) и $S2$ (СМО_1, СМО_2 и система FJ) со следующими входными данными $\lambda = \lambda' = \lambda'' = 0,5$ по теореме Бёрке [19] и $\mu = 1$.

Также на рисунке показан результат расчета математического ожидания выделенных СеМО: $M(t)$, $M1(t)$ и $M2(t)$, соответственно. Получение результатов моделирования необходимо для анализа влияния последовательных систем на выходные временные характеристики цепочки локальных транзакций. Плотность и функция распределения для $S2$ задаются выражениями (17, 18). Также были получены результаты имитационного моделирования с аналогичными входными данными, с помощью программного обеспечения Anylogic (рисунок 8).

$$f_x(t) = \frac{1}{8\mu} (\mu - \lambda) e^{t(\lambda-\mu)} (4\lambda^2 t + \lambda^3 t^3 - 6\lambda^2 t^2 \mu - 15\lambda t^2 \mu^2 - 4\lambda e^{t(\lambda-\mu)} + 12\lambda t \mu - 16\mu e^{t(\lambda-\mu)} + 4\lambda^2 + 8t^2 \mu^3 - 16t \mu^2 + 16\mu, \quad (17)$$

$$F_x(t) = 1 + \frac{1}{32\mu^2} * (8\lambda\mu + 32\mu^2) e^{2t(\lambda-\mu)} + (-4\lambda^3 t^2 \mu - 23\lambda^2 t^2 \mu^2 - 8\lambda^2 t \mu + 60\lambda t^2 \mu - 8\lambda\mu - 32t^2 \mu^4 - 64\mu^2) * e^{t(\lambda-\mu)}. \quad (18)$$

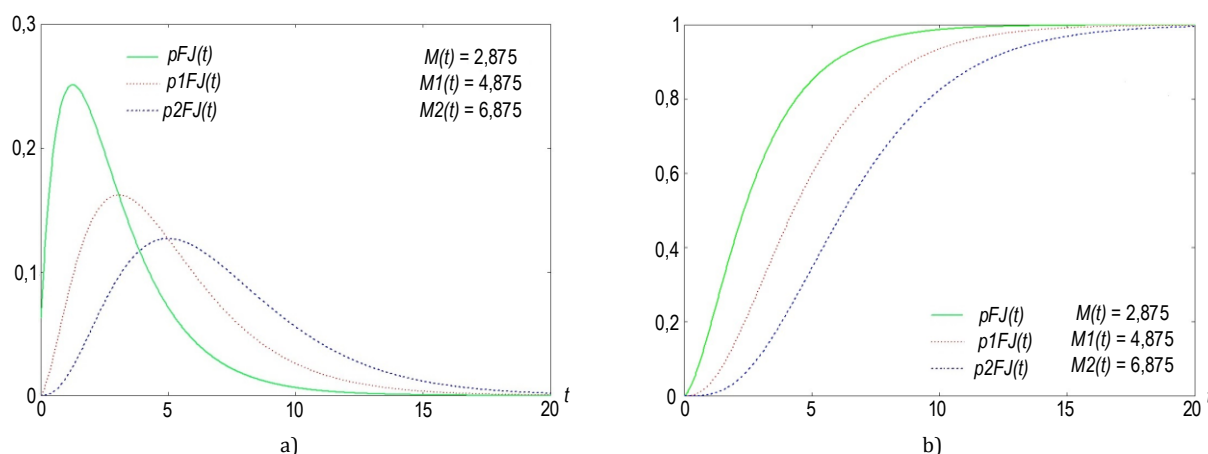


Рис. 7. Графики ПРВ (а) и ФРВ (б) времени обслуживания в трех выделенных сценариях

Fig. 7. Density (a) and probability (b) distribution function graphs of service time in three selected scenarios

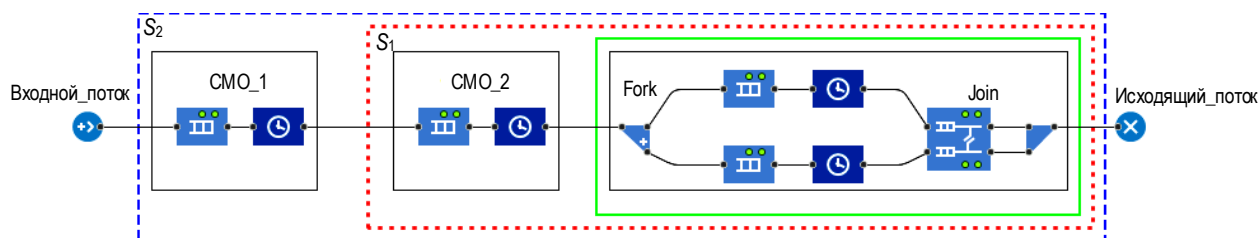


Рис. 8. Имитационная модель цепочки локальных транзакций с параллелизмом

Fig. 8. Simulation model of the local transaction chain with parallelism

При сравнении результатов имитационного моделирования (рисунок 9) с результатами математического анализа, можно сделать вывод о незначительном значении ошибки аппроксимации при моделировании систем $M/M/1$. Учитывая свойства систем $M/M/1$, их применение для расчета временных характеристик цепочки транзакций обеспечивает достаточно точные результаты без суще-

ственной погрешности. В отличие от сложных систем типа $G/G/1$, которые требуют более сложных математических расчетов, что указывает на актуальность проведения дальнейших исследований. Однако данное исследование позволяет рассматривать алгоритм расчета СеМО с внедрением таких инструментов массового обслуживания как параллельная обработка.

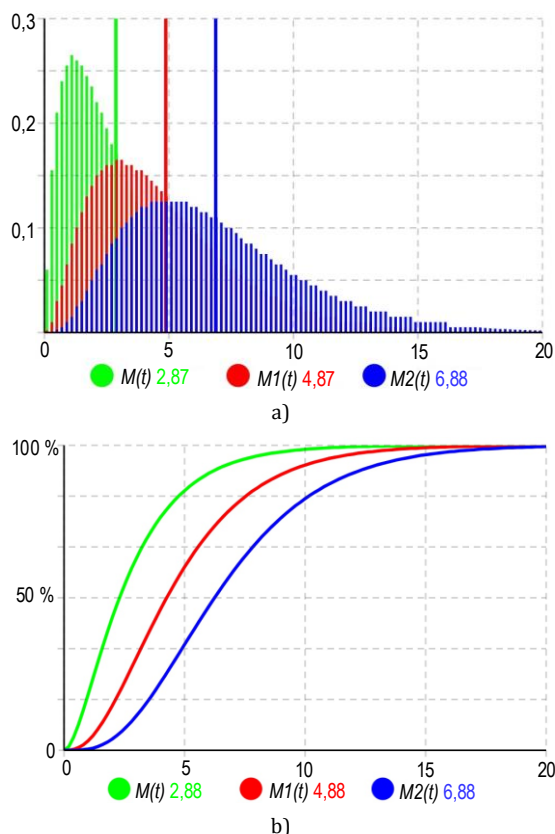


Рис. 9. Результаты имитационного моделирования: ПРВ (а) и ФРВ (б) времени обслуживания

Fig. 9. Results of simulation modeling: density (a) and probability (b) distribution function of service time

4. Выводы

Математический инструмент, полученный как результат данного исследования, основанный не только на средних значениях, может применяться для получения точных результатов расчета вероятностно-временных характеристик, включающих моменты и дисперсию, для рабочих процессов обслуживания задач в транзакционных слабосвязанных услугах. Полученные результаты аналитического

моделирования частного сценария рабочего процесса были проверены путем создания имитационной модели, что позволило подтвердить корректность разработанного математического инструмента. Стоит отметить, что данный математический инструмент позволяет производить расчет характеристик систем с распределениями, к которым применимо преобразование Лапласа, в иных случаях необходимо применять либо имитационное моделирование, либо методы аппроксимации функций.

В дальнейших исследованиях будут рассмотрены более сложные системы для построения семейства моделей расчета качественных и количественных характеристик рабочих процессов обслуживания транзакций в слабосвязанных услугах. Что приведет к необходимости решения следующих задач:

- разработка семейства имитационных моделей сценариев рабочих процессов для транзакционных услуг;
- разработка подхода к моделированию систем сложных распределений (например, длиннохвостые Вейбулла или Парето), которые не поддаются преобразованию Лапласа для дальнейшей свертки; данный подход может включать в себя внедрение таких методов аппроксимации, как ступенчатые функции или аппроксимация гиперэкспоненциальным распределением;
- разработка алгоритма выборки эквивалентных слабосвязанных услуг для формирования рабочего процесса с заданным качеством обслуживания.

Последующее развитие инструментария позволит проводить математическое моделирование с целью оценки и прогнозирования качества во многих сферах инфокоммуникационных услуг, включая электронную коммерцию, работу с большими данными, внедрение в концепцию «Cloud-Fog-Edge», распределенные системы и т. д.

Список источников

1. Алзагир А.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 6. С. 2–7. DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
2. Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. №. 2. С. 32–43. DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43
3. Казьмин О.Ю., Симонина О.А. Использование нейронных сетей для решения задачи оптимизации электромагнитной обстановки в сетях радиодоступа // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 25–37. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37
4. Новиков Е.А., Севостьянов А.С., Шадрин А.Г. Исследование качества обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 50–56. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56
5. O’Riordan D. Business Process Standards for Web Services // In: Web Services Business Strategies and Architectures. Berkeley: Apress, 2002. PP. 156–173. DOI:10.1007/978-1-4302-5356-3_11
6. Назаревич С.А., Меркулова А.Ю. Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 1(35). С. 67–73. DOI:10.31799/2077-5687-2023-1-67-73
7. Nagano H., Shimosawa T., Shimamura A., Komoda N. Blockchain based cross organizational workflow management system // Proceedings of the 17th International Conference on Applied Computing (AC, Lisbon, Portugal, 18–20 November 2020). 2020. PP. 97–104.

8. Weber J.H., Kuziemy C. Pragmatic interoperability for eHealth Systems: The Fallback Workflow Patterns // Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for Healthcare (SEH, Montreal, Canada, 27 May 2019). IEEE, 2019. PP. 29–36. DOI:10.1109/SEH.2019.00013
9. Wang S., Ding Z., Jiang C. Elastic Scheduling for Microservice Applications in Clouds // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2020. Vol. 32. Iss. 1. DOI:10.1109/TPDS.2020.3011979
10. Avritzer A., Ferme V., Janes A., Russo B., van Hoorn A., Schulz H., et al. Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-Based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests // Journal of Systems and Software. 2020. Vol. 165. P. 110564. DOI:10.1016/j.jss.2020.110564
11. Zheng Z., Lyu M.R. A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services // Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services (ICWS, Beijing, China, 23–26 September 2008). IEEE, 2008. PP. 145–152. DOI:10.1109/ICWS.2008.42
12. Zheng Z., Trivedi K.S., Qiu K., Xia R. Semi-Markov Models of Composite Web Services for their Performance, Reliability and Bottlenecks // IEEE Transactions on Services Computing. 2016. Vol. 6(1). PP. 1939–1374. DOI:10.1109/TSC.2015.2475957
13. Yu T., Lin K.J. The Design of QoS Broker Algorithms for QoS-Capable Web Services // International Journal of Web Services Research. 2004. Vol. 1. Iss. 4. PP. 17–24. DOI:10.1109/EWS.2004.1287283
14. Johnsson M., Jennings B. Meeting latency targets for complex SOA-based transactions in data centers // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2016, Istanbul, Turkey, 25–29 April 2016). IEEE, 2016. PP. 695–698. DOI:10.1109/NOMS.2016.7502879
15. Cheung L., Golubchik L., Sha F. A Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective // Proceedings of the 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (Singapore, Singapore, 25–27 July 2011). IEEE, 2011. PP. 75–84. DOI:10.1109/MASCOTS.2011.66
16. Xiong K. Web services performance modeling and analysis // Proceedings of the International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (Charlotte, USA, 06–08 September 2006). IEEE, 2006. DOI:10.1109/HONET.2006.5338403
17. Lozhkovskiy A., Klymash M., Pyrih Y., Shpur O. Method for Evaluating the Quality of Service Characteristic of a Packet Access Network for IoT Devices // Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT, Lviv, Ukraine, 21–25 September 2021). IEEE, 2021. PP. 79–83. DOI:10.1109/AICT52120.2021.9628912
18. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука. 1968, 496 с.
19. Кожанов Ю.Ф. Теория телетрафика: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2020. 203 с.
20. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
21. Горбунова А.В., Вишнеvский В.М. Оценка времени отклика среды для вычислений с интенсивным использованием данных // Информационно-управляющие системы. 2022. №4(119). С. 12–19. DOI:10.31799/1684-8853-2022-4-12-19
22. Song Z., Tilevich E. Equivalence-Enhanced Microservice Workflow Orchestration to Efficiently Increase Reliability // Proceedings of the International Conference on Web Services (ICWS, Milan, Italy, 08–13 July 2019). IEEE, 2019. PP. 426–433. DOI:10.1109/ICWS.2019.00076
23. Редругина Н.М., Алексеева Н.Н., Савельева А.А., Тарабанов И.Ф. Математическая модель записи информации на узлы распределенной системы хранения данных // XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2022, Санкт-Петербург, Россия, 15–16 февраля 2022 года). СПб: СПбГУТ, 2022. С. 65–70.
24. Gorbunova A.V., Lebedev A.V. Response Time Estimate for a Fork-Join System with Pareto Distributed Service Time as a Model of a Cloud Computing System Using Neural Networks // Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks (DCCN, Moscow, Russia, 20–24 September 2021). Communications in Computer and Information Science. Vol. 1552. Cham: Springer, 2022. PP. 318–332. DOI:10.1007/978-3-030-97110-6_25
25. Горбунова А.В., Зарядов И.С., Самуйлов К.Е., Сопин Э.С. Обзор систем параллельной обработки заявок. Часть 1 // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2017. Т. 25. № 4 С. 350–362. DOI:10.22363/2312-9735-2017-25-4-350-362

References

1. Alzagir A.A., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Study of quality of service in 5g and next-generation networks. *Elktrosvyaz*. 2022;6:2–7. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
2. Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A. Fifth Generation Communication Networks: on the Way to Networks 2030. *Telecom IT*. 2020;8(2)32–43. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43
3. Kazmin O., Simonina O. Solving the Problem of Optimizing the Electromagnetic Environment in Radio Access Networks Using Neural Network. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(3):25–37. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37
4. Novikov E., Sevostyanov A., Shadrin A. Study of the Service Quality of Real Time Traffic in a Complex Interference Environment. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):50–56. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56
5. O'Riordan D. Business Process Standards for Web Services. In: *Web Services Business Strategies and Architectures*. Berkeley: Apress; 2002. p.156–173. DOI:10.1007/978-1-4302-5356-3_11
6. Nazarevich S.A., Merkulova A.Y. Markov chains for solving problems of art-technological process control in a production system. *Sistemnyi analiz i logistika*. 2023;1(35):67–73. (in Russ.) DOI:10.31799/2077-5687-2023-1-67-73
7. Nagano H., Shimomura T., Shimamura A., Komoda N. Blockchain based cross organizational workflow management system. *Proceedings of the 17th International Conference on Applied Computing 2020 (AC, 18–20 November 2020, Lisbon, Portugal)*. 2020. p.97–104.

8. Weber J.H., Kuziemy C. Pragmatic interoperability for eHealth Systems: The Fallback Workflow Patterns. *Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for Healthcare, SEH, 27 May 2019, Montreal, Canada*. IEEE; 2019. p.29–36. DOI:10.1109/SEH.2019.00013
9. Wang S., Ding Z., Jiang C. Elastic Scheduling for Microservice Applications in Clouds. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2020;32(1). DOI:10.1109/TPDS.2020.3011979
10. Avritzer A., Ferme V., Janes A., Russo B., van Hoorn A., Schulz H., et al. Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-Based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests. *Journal of Systems and Software*. 2020;165:110564. DOI:10.1016/j.jss.2020.110564
11. Zheng Z., Lyu M.R. A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services. *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, ICWS, 23–26 September 2008, Beijing, China*. IEEE; 2008. p.145–152. DOI:10.1109/ICWS.2008.42
12. Zheng Z., Trivedi K.S., Qiu K., Xia R. Semi-Markov Models of Composite Web Services for their Performance, Reliability and Bottlenecks. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2016;6(1):1939–1374. DOI:10.1109/TSC.2015.2475957
13. Yu T., Lin K.J. The Design of QoS Broker Algorithms for QoS-Capable Web Services. *International Journal of Web Services Research*. 2004;1(4):17–24. DOI:10.1109/IEEE.2004.1287283
14. Johnsson M., Jennings B. Meeting latency targets for complex SOA-based transactions in data centers. *Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, NOMS 2016, 25–29 April 2016, Istanbul, Turkey*. IEEE; 2016. p.695–698. DOI:10.1109/NOMS.2016.7502879
15. Cheung L., Golubchik L., Sha F. (2011). A Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective. *Proceedings of the 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 25–27 July 2011, Singapore, Singapore*. IEEE; 2011. p.75–84. DOI:10.1109/MASCOTS.2011.66
16. Xiong K. Web services performance modeling and analysis. *Proceedings of the International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies, 06–08 September 2006, Charlotte, USA*. IEEE; 2006. DOI:10.1109/HONET.2006.5338403
17. Lozhkovskiy A., Klymash M., Pyrih Y., Shpur O. Method for Evaluating the Quality of Service Characteristic of a Packet Access Network for IoT Devices. *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT, 21–25 September 2021, Lviv, Ukraine*. IEEE; 2021. p.79–83. DOI:10.1109/AICT52120.2021.9628912
18. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. 496 p. (in Russ.)
19. Kozhanov Y.F. *Teletraffic Theory*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2020. 203 p. (in Russ.)
20. Kleinrock L. *Queueing systems. Vol. 1. Theory*. New York: Wiley-Interscience; 1975. 417 p.
21. Gorbunova A.V., Vishnevsky V.M. Estimating the Response Time of a Data-Intensive Computing Environment. *Information and Control Systems*. 2022;4(119):12–19. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2022-4-12-19
22. Song Z., Tilevich E. Equivalence-Enhanced Microservice Workflow Orchestration to Efficiently Increase Reliability. *Proceedings of the International Conference on Web Services, ICWS, 08–13 July 2019, Milan, Italy*. IEEE; 2019. p.426–433. DOI:10.1109/ICWS.2019.00076
23. Alekseeva N., Redrugina N., Saveleva A., Tarabanov I. Mathematical Modeling of Data Transfer between Nodes in Software Defined Storage. *Proceedings of the International Scientific and Technical and Scientific-Methodical Conference on Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education, 15–16 February 2022, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2022. p.65–70. (in Russ.)
24. Gorbunova A.V., Lebedev A.V. Response Time Estimate for a Fork-Join System with Pareto Distributed Service Time as a Model of a Cloud Computing System Using Neural Networks. *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN, 20–24 September 2021, Moscow, Russia. Communications in Computer and Information Science, vol.1552*. Cham: Springer; 2022. p.318–332. DOI:10.1007/978-3-030-97110-6_25
25. Gorbunova A.V., Zaryadov I.S., Samouylov K.E., Sopin E.S. A Survey on Queueing Systems with Parallel Serving of Customers Part 1. *RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics*. 2017;25(4):350–362. (in Russ.) DOI:10.22363/2312-9735-2017-25-4-350-362

Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 28.06.2023.

The article was submitted 21.02.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 28.06.2023.

Информация об авторе:

**РЕДРУГИНА
Наталья Михайловна**

аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-9385-3293>