

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ ВЕБ-СЕРВИСОВ И
АНАЛИЗ ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 271 группы
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Назаренко Регины Сергеевны

Научный руководитель
доцент, к. ф.-м. н.

Е. С. Рогачко

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью предварительной оценки и исследования производительности и качества обслуживания композиций веб-сервисов, используемых при реализации сложных бизнес-процессов. Моделирование позволяет прогнозировать динамику показателей производительности при изменении параметров как композиции в целом, так и отдельных веб-сервисов.

Для оценки производительности композиций веб-сервисов до их внедрения широко применяются методы математического моделирования. Одним из наиболее распространенных подходов являются модели систем массового обслуживания и сетей массового обслуживания, позволяющие исследовать процессы обработки запросов и оценивать характеристики производительности распределенных систем. Однако многие существующие модели основаны на предположении экспоненциального распределения времени обслуживания требований, что не всегда соответствует особенностям реальных систем. На практике длительность обработки запросов может быть близкой к постоянной величине и зависеть от внутренних механизмов функционирования программных компонентов [1]. Например, в банковской сфере время обработки запросов определяется производительностью автоматизированных банковских систем и характеристиками взаимодействующих сервисов [2].

Цель магистерской работы — моделирование композиции веб-сервисов, а также анализ ее характеристик производительности.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. изучить существующие математические модели, используемые для моделирования и исследования композиций веб-сервисов;
2. описать модель композиции веб-сервисов в виде сети массового обслуживания и предложить метод вычисления ее характеристик;
3. разработать программу для вычисления показателей производительности композиции веб-сервисов;
4. провести исследования с использованием разработанной программы и выполнить анализ характеристик композиции веб-сервисов при изменении входных параметров системы.

Методологические основы магистерской работы составляют результаты, представленные в исследованиях [3-9]. В работе [3] предложен метод

для представления и анализа параллельных и распределенных систем с помощью раскрашенных сетей Петри. В работе [4] используются обобщенные стохастические сети Петри для исследования показателей качества обслуживания композиции веб-сервисов в соответствии со стандартом WS-CDL. Методы анализа качества обслуживания композиции веб-сервисов в виде семантических моделей рассматриваются в работе [5]. В работах [6,7] авторы определяют надежность композиции веб-сервисов в зависимости от надежности отдельных веб-сервисов. Методы анализа производительности композиций веб-сервисов на основе стохастических математических моделей представлены в работах [8,9].

Теоретическая значимость магистерской работы. Была описана математическая модель композиции веб-сервисов в виде открытой сети массового обслуживания с произвольным распределением длительностей обслуживания требований, также были описаны алгоритмы вычисления основных характеристик композиции веб-сервисов.

Практическая значимость магистерской работы. Разработанная программа может использоваться для определения основных характеристик функционирования композиции веб-сервисов при заданных параметрах. Данные, полученные в результате работы программы, могут применяться для выявления узких мест распределенной системы, оценки качества обслуживания требований, сравнения различных конфигураций веб-сервисов, а также разработки стратегий оптимизации процесса выполнения банковского перевода.

Структура и объем работы. Магистерская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Общий объем работы — 85 страниц, из них 64 страницы — основное содержание, включая 24 рисунка и 21 таблицу, список использованных источников информации — 44 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Определение композиции веб-сервисов» посвящен определению композиции веб-сервисов, а также описанию основных характеристик производительности распределенных систем и анализу существующих математических моделей, применяемых для исследования композиций веб-сервисов.

В подразделе 1.1 приведено общее описание композиции веб-сервисов как способа организации взаимодействия распределенных программных компонентов и стандартов проектирования отдельных веб-сервисов.

Подраздел 1.2 посвящен определению подходов к проектированию и инструментов координации взаимодействия отдельных веб-сервисов в композиции. Выделяют два стандарта проектирования композиции веб-сервисов - оркестровка и хореография. Оркестровка является исполняемым бизнес-процессом и определяет автоматизированную настройку и управление сложными системами, промежуточным программным обеспечением и сервисами. Хореография представляет собой децентрализованный подход, при котором каждый веб-сервис работает независимо. Для решения задач оркестровки и хореографии применяется язык BPEL при описании процесса, что позволяет явно задать его структуру, последовательность вызовов веб-сервисов, условия ветвления и циклы, что делает данный язык удобным средством для дальнейшего анализа композиции [1]. В магистерской работе решается задача оркестровки, исходя из этого будет описана модель композиции веб-сервисов.

В подразделе 1.3 приводятся описания основных характеристик качества обслуживания композиции веб-сервисов: время отклика, пропускная способность, надежность и стоимость.

Подраздел 1.4 посвящен обзору существующих математических моделей и методов моделирования композиции веб-сервисов, среди которых рассматриваются обобщенные и раскрашенные сети Петри, марковские процессы, а также стохастические алгебры процессов. Анализ существующих исследований показывает, что модели систем массового обслуживания преимущественно используются для оценки показателей производительности отдельных сервисов, а моделирование композиции веб-сервисов рассмотрено в научной литературе менее подробно, особенно для систем с неэкспоненциальными распределениями времени обслуживания.

Второй раздел «Математическая модель композиции веб-сервисов в виде открытой сети массового обслуживания и методы ее анализа» посвящен описанию математической модели композиции веб-сервисов, представляемой в виде открытой сети массового обслуживания, а также методов анализа рассматриваемой модели. Также рассматривается пример композиции веб-сервисов при проведении банковского перевода,

на основе которого демонстрируется практическое применение построенной модели. После этого описываются методы анализа сети массового обслуживания, используемые для вычисления основных функциональных характеристик композиции веб-сервисов: метод анализа сети Джексона, метод диффузионной аппроксимации и метод декомпозиции.

В подразделе 2.1 для анализа времени отклика композиции веб-сервисов BPEL-процесс представляется в виде сети массового обслуживания общего вида. На рисунке 1 приведен пример BPEL-процесса, который подробно будет рассмотрен в подразделе 2.2. На рисунке 2 приведен пример отображения BPEL-кода в виде сети массового обслуживания.

```
1 <process...>
2 <sequence>
3   <receive .../>
4   <invoke name="WS1".../>
5   <invoke name="WS2".../>
6   <if ...>
7     <condition>"condition1"</condition>
8     <invoke name="WS3"... />
9   <elseif>
10    <condition>"condition2"</condition>
11    <invoke name="WS4"... />
12  </elseif>
13  <else>
14    <invoke name="WS5"... />
15  </else>
16 </if>
17 <while> <condition>"condition3"</condition>
18   <invoke name="WS6"... />
19 </while>
20 <invoke name="WS7" ... />
21 <reply .../>
22 </sequence>
23 </process...>
```

Рисунок 1 – Пример генерации BPEL-кода

С помощью математической модели системы в виде сети массового обслуживания можно описать композицию веб-сервисов. Запросы, получаемые веб-сервисом, эквивалентны требованиям, поступившим в систему массового обслуживания. Отдельные веб-сервисы композиции представляются системами массового обслуживания типа GI/G/k: в зависимости от настройки отдельных веб-сервисов и сервера, на котором запускается сервис, веб-сервисы могут обрабатывать несколько запросов одновременно.

На рисунке 2 вероятности p_{23}, p_{24} — это вероятности того, что условия "condition1" и "condition2" истинны, тогда как вероятность поступления

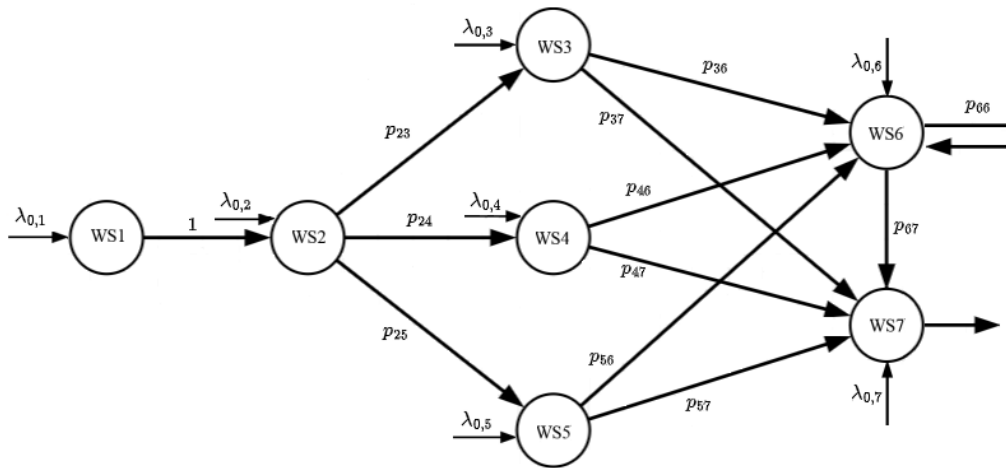


Рисунок 2 – Пример отображения кода BPEL в виде SeMO

требований в систему WS_5 определяется как $p_{25} = 1 - p_{23} - p_{24}$; p_{66} — это вероятность того, что условие "condition3" истинно, тогда как вероятность поступления требований в систему WS_7 определяется как $p_{i7} = 1 - p_{i6}$, где $i = 3, \dots, 6$. Интенсивность поступления требований в систему WS_i обозначена как $\lambda_{0,i}$, где $i = 1, \dots, 7$.

При построении модели предполагалась абсолютная надежность веб-сервисов, однако в реальных системах возможны программные и аппаратные сбои, приводящие к временному отказу сервисов; при этом анализ ненадежной композиции сводится к анализу соответствующей модели с надежными системами.

Таким образом, композиция веб-сервисов может быть представлена математической моделью в виде сети массового обслуживания без потерь, состоящей из входного и выходного потоков требований, очередей и обслуживающих приборов.

В подразделе 2.2 рассматривается BPEL-код на рисунке 1 как последовательность операций при проведении банковского перевода:

1. В блоке `<receive>` клиент инициирует перевод через мобильное приложение. Система получает следующие данные: сумма перевода, получатель, назначение платежа.
2. В блоке `<invoke name="WS1".../>` происходит верификация данных: осуществляется валидация номера телефона или счета получателя, проводится проверка лимита и так далее.
3. В блоке `<invoke name="WS2".../>` происходит проверка баланса и блокировка суммы на счете отправителя.

4. В блоке `<if>...</if>` определяется тип перевода: внутрибанковский перевод по любым реквизитам (осуществляется сервисом WS3), перевод через систему быстрых платежей — СБП (осуществляется сервисом WS4), перевод по номеру счета в сторонний банк (осуществляется сервисом WS5).
5. В блоке `<while>...</while>` происходит циклическая проверка статуса перевода: осуществляется проверка подозрительных операций финмониторингом.
6. В блоках `<invoke name="WS7".../>` и `<reply>` происходит отправка чека о переводе клиенту и обновление истории операций.

Таким образом, рассмотренный пример композиции веб-сервисов показывает, каким образом реальный процесс может быть представлен в виде сети массового обслуживания, изображенной на рисунке 2.

Подраздел 2.3 посвящен описанию метода анализа сети Джексона. Рассматривается сеть из N одноприборных систем массового обслуживания (WS_i , $1 \leq i \leq N$). Вероятность поступления требования в систему j из системы i , составляет p_{ij} . После обслуживания требования возвращаются в источник. Переходы требований между всеми системами обслуживания в сети определяются маршрутной матрицей $P = (p_{ij})$, $i, j = 0, \dots, N$. Вероятности p_{0j} и p_{N0} определяются как $p_{0j} = \frac{\lambda_{0,j}}{\lambda_0}$, $j = 1, \dots, N$, и $p_{00} = 0$, $p_{N0} = 1$. Пропускная способность сети определяется $\lambda_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_{0,i}$. В стационарном режиме интенсивность поступления требований в систему i :

$$\lambda_i = \frac{w_i}{w_0} \lambda_0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Вектор $w = (w_i)$, $i = 0, \dots, N$, — вектор относительных интенсивностей потоков требований в системах сети — находится как решение системы линейных уравнений: $w = wP$, при условии $\sum_{i=0}^N w_i = 1$.

После получения λ_i вычисляются следующие характеристики:

1. \bar{n}_i , \bar{n} — математические ожидания числа требований в системе i и в сети:

$$\bar{n}_i = \frac{\rho_i}{1 - \rho_i}, \quad \bar{n} = \sum_{i=1}^N \bar{n}_i; \quad (2)$$

2. \bar{u}_i , \bar{u} — математические ожидания длительности пребывания требований в

системе i и в сети:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\mu_i(1 - \rho_i)}, \quad \bar{u} = \frac{1}{w_0} \sum_{i=1}^N w_i \bar{u}_i; \quad (3)$$

где $\rho_i = \lambda_i/\mu_i$ — коэффициент использования системы i ; μ_i — интенсивность обслуживания требований в системе i .

Подраздел 2.4 посвящен описанию метода диффузионной аппроксимации для анализа сетей массового обслуживания с системами типа $GI/G/1$ [10].

Подраздел 2.5 посвящен описанию метода декомпозиции для анализа сетей массового обслуживания с системами типа $GI/G/\kappa$. Для вычисления интенсивностей входящих потоков используется формула(1). Далее определяются квадрат коэффициента вариации поступления C_{Ai} и квадрат коэффициента вариации длительности обслуживания C_{Bi} с помощью первого x_1 и второго x_2 начальных моментов времени:

$$C_{Ai}^2 = x_{2Ai}/x_{1Ai}^2, \quad C_{Bi}^2 = x_{2Bi}/x_{1Bi}^2, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Далее вычисляются следующие основные характеристики [10]:

$$\bar{u}_i = \frac{\bar{u}'_i C_{Ai}^2 + C_{Bi}^2}{2} \left(\frac{1 - C_{Ai}^2}{1 - 4c(\kappa_i, \rho_i)} e^{\left(-\frac{2}{3} \frac{(1-\rho_i)}{\rho_i}\right)} + \frac{1 - C_{Bi}^2}{1 + c(\kappa_i, \rho_i)} + C_{Ai}^2 + C_{Bi}^2 - 1 \right)^{-1},$$

$$\bar{n}_i = \lambda_i \bar{u}_i,$$

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^N \bar{n}_i, \quad \bar{u} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^N \bar{n}_i,$$

где \bar{u}'_i — математическое ожидание длительности пребывания требований в системе типа $M/M/\kappa$ и $\rho_i = \lambda_i/(\kappa_i \mu_i)$; величина $c(\kappa_i, \rho_i)$ вычисляется как:

$$c(\kappa_i, \rho_i) = (1 - \rho_i)(\kappa_i - 1) \frac{\sqrt{4 + 5\kappa_i} - 2}{16\rho_i \kappa_i}.$$

Третий раздел «Исследование производительности и качества обслуживания композиции веб-сервисов» посвящен исследованию производительности и качества обслуживания композиции на основе разрабо-

танной модели в виде сети массового обслуживания. Рассматриваются алгоритмы вычисления характеристик сети массового обслуживания. Далее представлена программная реализация модели, демонстрирующая применение выбранных методов вычисления. Также приводятся результаты численных экспериментов и формулируются выводы о характеристиках композиции веб-сервисов на примере композиции при проведении банковского перевода.

Подраздел 3.1 содержит описание алгоритма метода вычисления основных характеристик производительности композиции веб-сервисов. Алгоритм состоит из трех блоков, которые выполняются последовательно. В первом блоке алгоритма происходит ввод, проверка параметров системы и вычисление интенсивностей потоков. Во втором блоке осуществляется выбор метода анализа и вычисление основных стационарных характеристик композиции веб-сервисов в зависимости от выбранного пользователем метода. Третий блок отвечает за сохранение полученных результатов в текстовый файл.

В подразделе 3.2 приводится описание программы моделирования композиции веб-сервисов. Программная реализация изложенного в предыдущем подразделе алгоритма написана на языке Python. Программа имеет графический интерфейс пользователя, который разработан с использованием библиотек `tkinter`, `tkinterdnd2`, `ttk.Style` и стандартных модулей `os`, `subprocess` и `sys`. Программа разделена на несколько модулей, вычислительная часть программы отделена от интерфейсной, что обеспечивает возможность добавления алгоритмов вычисления или оптимизации основных функциональных характеристик композиции веб-сервисов без изменения существующих модулей.

В подразделе 3.3 приведены результаты статистической обработки тестовых данных, характеризующих процесс выполнения банковского перевода с использованием композиции веб-сервисов. Для каждого веб-сервиса были сформированы выборки интервалов времени между поступлениями требований и длительностей обслуживания, после чего выполнена проверка гипотез о пуассоновском характере входящих потоков и экспоненциальном распределении времени обслуживания с использованием критерия согласия Пирсона. Полученные результаты показали, что марковские предположения подтверждаются лишь для части веб-сервисов, тогда как в большинстве случаев наблюдаются отклонения от экспоненциальных распределений. Это свидетель-

ствуется о нецелесообразности применения моделей типа $M/M/\kappa$ и обосновывает использование сетей массового обслуживания общего вида с системами типа $GI/G/\kappa$ для моделирования композиции веб-сервисов.

В подразделе 3.4 проведено исследование производительности и качества обслуживания композиции веб-сервисов на основе модели сети массового обслуживания общего вида на примере композиции веб-сервисов при проведении банковского перевода. Выполнено сравнение методов Джексона, декомпозиции и диффузионной аппроксимации, показавшее, что для случая экспоненциальной длительности обработки запросов веб-сервисами реализованные методы дают одинаковые результаты основных характеристик производительности композиции веб-сервисов. Для дальнейших исследований использован метод декомпозиции, наиболее удобный для анализа многоприборных систем с неэкспоненциальными длительностями обработки требований.

Было исследовано влияние изменения вероятности маршрутизации требований и интенсивности входящего потока на характеристики производительности сети. Анализ надежной и ненадежной композиции веб-сервисов показал отсутствие существенных различий в показателях функционирования композиции. Наибольшая чувствительность к изменению нагрузки наблюдается у веб-сервиса фрод-мониторинга, для которого при увеличении вероятности перехода в него требований и интенсивности входящего потока существенно возрастает коэффициент использования и математическое ожидание длительности пребывания требований в системе. Проведен анализ изменения коэффициентов использования, математического ожидания длительности пребывания требований и математического ожидания количества требований в сети в течение недели, позволивший выявить узкие места композиции веб-сервисов и оценить влияние распределения нагрузки между веб-сервисами на показатели производительности системы. По результатам эксперимента можно сделать следующий вывод: большинство веб-сервисов функционирует при умеренной загрузке, тогда как для веб-сервисов фрод-мониторинга и уведомления клиентов коэффициент использования в отдельные дни приближается к единице, что свидетельствует о наличии узких мест в композиции веб-сервисов. Также установлено, что в среднем наибольшее количество требований наблюдается в будние дни, тогда как минимальные значения фиксируются в выходные дни.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской работе была описана математическая модель композиции веб-сервисов в виде открытой сети массового обслуживания с произвольным распределением длительностей обслуживания требований, также была описана математическая модель композиции веб-сервисов с ненадежными сервисами в виде сети Джексона.

Были описаны алгоритмы вычисления основных характеристик композиции веб-сервисов, таких как средняя длительность пребывания требований в системе и сети, среднее количество требований в системе и сети, а также загрузка обслуживающих узлов. Кроме того, были рассмотрены подходы к оценке влияния параметров входного потока, маршрутизации требований, времени обслуживания и числа обслуживающих приборов на качество функционирования системы. На основе описанных алгоритмов было разработано приложение, реализующее моделирование композиции веб-сервисов в виде сети массового обслуживания и вычисление основных характеристик ее производительности.

Отдельные части магистерской работы были представлены на конференциях и опубликованы:

1. Назаренко, Р. С. Модель композиции веб-сервисов в виде сети массового обслуживания / Р. С. Назаренко // Школа теории массового обслуживания (ШТМО-2025): тезисы I Международной конференции (21–26 апреля 2025 г.). — Томск: Издательство Томского государственного университета, 2025. — С. 41.
2. Назаренко, Р. С. Построение модели композиции веб-сервисов с ненадежными сервисами в виде сети массового обслуживания / Р. С. Назаренко, И. Е. Тананко, Е. С. Рогачко // ИТММ-2025: материалы XXIV Международной конференции имени А. Ф. Терпугова, 20–25 октября 2025 г. — Томск: Издательство Томского государственного университета, 2025. — С. 165–170.

Основные источники информации:

- 1 Moradi, H. SA-BPEL: A New Approach to Facilitate the Development and Execution of Context-Aware Service Orchestrations / H. Moradi, B. Zamani, K. Zamanifar // Acta Informatica Pragensia. — 2022. — Vol. 11, no. 1. — P. 84–110.

- 2 Open Banking Operational Guidelines v1.1.0 [Электронный ресурс]. — <https://www.openbanking.org.uk/wp-content/uploads/2021/04/Operational-Guidelines-v1.1.0-master-01.05.2019.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).
- 3 Jensen, K. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L. M. Kristensen. — Heidelberg : Springer Berlin, 2009. — 384 p.
- 4 A model-driven approach to predicting dependability of WS-CDL based service composition / Y. Xia, G. Dai, J. Li, T. Sun, Q. Zhu // Concurrency and Computation: Practice and Experience. — 2011. — Vol. 23, no. 10. — P. 1127–1145.
- 5 Применение ориентированных графов при организации работы распределенных систем сетевых сервисов / А. Е. Усов, А. А. Варламов, О. В. Бабкин, Е. В. Дос, Д. Н. Мостовщиков // Проблемы современной науки и образования. — 2019. — Т. 7, № 140. — С. 34–45.
- 6 IgS-wBSRM: A time-aware Web Service QoS monitoring approach in dynamic environments / P. Zhang, H. Jin, Z. He, H. Leung, W. Song, Y. Jiang // Information and Software Technology. — 2018. — Vol. 96. — P. 14–26.
- 7 Dahan, F. Neighborhood search based improved bat algorithm for Web service composition/ F. Dahan // Computer systems science and engineering.— 2023. — V. 45, № 2. — P. 1343–1356.
- 8 Capacity Planning for Composite Web Services Using Queueing Network-Based Models / D. Peng, Y. Yuan, K. Yue, X. Wang, A. Zhou // Advances in Web-Age Information Management. — Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2004. — P. 439–448.
- 9 Mining Models of Composite Web Services for Performance Analysis / A. Gao, D. Yang, S. Tang, M. Zhang // Database Systems for Advanced Applications / ed. by M. Lee, K.-L. Tan, V. Wuwongse. — Heidelberg : Springer Berlin, 2006. — P. 828–837.
- 10 Bolch, G. Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation With Computer Science Applications / G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, K. S. Trivedi. — New York : John Wiley & Sons, 2006. — 896 p.