

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Горбуновой Анастасии Владимировны
на тему «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических
систем с разделением и параллельным обслуживанием»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 2.3.1– Системный анализ,
управление и обработка информации, статистика

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертации обусловлена широким распространением систем с разделением и параллельным обслуживанием и, в частности, самого механизма их действия, связанного с распараллеливанием решаемых задач, в самых разных областях – от производственных процессов и систем здравоохранения до распределенных вычислений и обработки больших данных. Несмотря на многолетнюю историю исследований, начиная примерно с работ 1980-х годов, строгие аналитические решения для таких систем получены лишь в частных случаях. Для простейшего пуассоновского входящего потока и экспоненциального обслуживания при числе подсистем более двух точные формулы для среднего времени отклика отсутствуют. Существующие приближенные методы имеют существенные ограничения по области применимости и точности. В условиях непрерывного роста объемов обрабатываемой информации и повышения требований к качеству обслуживания пользователей систем, особенно в облачных и распределенных вычислительных средах, разработка новых, более точных и универсальных методов анализа и управления такими системами становится востребованной и практически значимой задачей системного анализа.

В диссертационном исследовании Горбуновой А.В. разработаны новые методы и алгоритмы анализа, обработки данных, а также управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием. Таким образом, учитывая все вышеизложенное, можно заключить, что тематика диссертации является актуальной и соответствует специальности 2.3.1 – системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Характеристика содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В *первой главе* систематизированы известные работы по применению методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей к анализу моделей систем массового обслуживания различной природы. Обоснована возможность использования указанных методов для исследования сложных стохастических систем, сформулированы основные положения и алгоритм разработанного подхода, приведены численные примеры.

Вторая глава посвящена системе с разделением и параллельным обслуживанием заявок с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением времени обслуживания в подсистемах. С помощью нейросетей и комплекса методов интеллектуального анализа данных оценены основные вероятностно-временные показатели производительности: математическое ожидание и дисперсия времени отклика, получены их аналитические приближения. Также в рамках этой главы выведены точные выражения для коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена, а для коэффициента Кендалла получена приближенная формула. На основе результатов для коэффициентов корреляции построена мета-гауссовская модель, которая позволяет оценить основные характеристики времени отклика системы. С применением теории копул разработана методика оценки квантилей распределения времени отклика системы, а также предложен алгоритм расчета доверительных интервалов для математического ожидания времени отклика, рассчитанного по данным имитационного моделирования.

В *третьей главе* проведен анализ аналогичной системы, но с распределением Парето времени обслуживания. Получены аналитические оценки верхней границы среднего времени отклика на основе порядковых статистик. Выполнена оценка моментов времени отклика с помощью нейросетей, а также выведены аналитические выражения для среднего, дисперсии и коэффициентов корреляции между временами пребывания подзаявок с помощью представленного в диссертации комплексного подхода. Предложены два способа оценки квантилей: аппроксимация распределения

времени отклика распределением Фреше и подход, основанный на теории копул.

В четвертой главе построена общая модель управления интенсивностью обслуживания в системах с разделением и параллельным обслуживанием, ориентированная на оптимизацию экономических показателей и достижение баланса между временем отклика и ресурсами, необходимыми для поддержания оптимальной загрузки при изменении интенсивности входного потока. Для случая двух подсистем с экспоненциальным обслуживанием получено аналитическое выражение для оптимальной интенсивности. При числе подсистем более двух как для экспоненциального распределения, так и для случая Парето-распределения времени обслуживания, представлены уравнения, численное решение которых определяет оптимальную интенсивность. Проведен асимптотический анализ решений, результаты которого применимы для управления системой на границах допустимых значений параметров.

Пятая глава посвящена исследованию остаточного времени обслуживания, т. е. времени, необходимого для корректного завершения работы системы после прекращения поступления заявок. Этот показатель важен, например, для разработки механизмов отказоустойчивости распределенных систем. Для системы с двумя бесконечнолинейными подсистемами и различными законами распределения времени обслуживания получены аналитические выражения для совместной функции распределения максимальных остаточных времен, а также для отдельных случаев найдены копулы и коэффициент корреляции Бломквиста.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Автореферат в полной мере дает представление о диссертационной работе, его содержание соответствует ее основным положениям.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов, сформулированных в диссертации

Научные положения диссертации обоснованы в полной мере. Достоверность полученных в диссертации результатов следует из

использования строгих математических методов теории массового обслуживания, теории вероятностей и случайных процессов, статистики, методов оптимизации, машинного обучения, а также подтверждается вычислительным экспериментом и сопоставлением с известными результатами для частных случаев.

Достоверность результатов обеспечивается также апробацией на профильных международных научных конференциях и семинарах. Результаты, представленные в диссертации, изложены в 20 работах, из которых 6 статей в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК категории К1 и 9 публикаций в журналах, индексируемых в БД Scopus и/или Web of Science.

Новизна результатов диссертации

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- разработан метод анализа систем с разделением и параллельным обслуживанием, базирующийся на машинном обучении, позволяющий оценивать различные характеристики для произвольных значений входных параметров в заданном диапазоне;
- предложен комплексный подход, объединяющий множественную регрессию, визуальный анализ, имитационное моделирование и оптимизационные процедуры, итогом которого являются явные аналитические выражения для основных показателей производительности системы;
- впервые установлены точные аналитические соотношения для коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена, а также получено аппроксимационное выражение для коэффициента Кендалла между временами пребывания подзаявок в подсистемах (пуассоновский входной поток, экспоненциальное обслуживание) и построена мета-гауссовская модель, позволяющая оценивать распределение времени отклика для рассматриваемого класса систем;
- разработан оригинальный метод построения квантилей времени отклика с использованием аппарата копул и их диагональных сечений, а также предложен метод оценивания квантилей времени отклика для систем с

распределением Парето времени обслуживания, основанный на аппроксимации распределения времени отклика распределением Фреше и применении метода моментов;

- сформулирована оптимизационная модель и на ее основе алгоритм расчета оптимальной интенсивности обслуживания для систем с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным или паретовским обслуживанием;
- разработан метод анализа остаточного времени обслуживания, необходимого для корректного завершения работы, для системы с двумя бесконечнолинейными подсистемами при произвольных законах распределения длительностей обслуживания.

Замечания по работе

1. В начале каждой главы диссертации раскрываются основные результаты, изложенные далее, однако в начале главы 3 анонс результатов практически не сделан, указан только тип системы, которому посвящена глава. Логично было более подробно описать основные результаты, по примеру других глав.
2. В главе 2 строится мета-гауссовская модель, использование которой предполагает получение оценок производительности системы с разделением и параллельным обслуживанием более простым методом по сравнению, например, с организацией имитационного моделирования. Стоило поподробнее изложить концепцию данной модели и основные этапы применения данного математического инструмента моделирования.
3. В тексте диссертации многократно используется английское словосочетание «fork-join» в качестве эквивалента для системы с разделением и параллельным обслуживанием, хотя с этой целью можно было бы просто ввести аббревиатуру русскоязычного термина.
4. На стр. 246 в четвертой главе при формулировке теоремы появляется ссылка на формулу для математического ожидания времени отклика, а сама формула представлена далее по тексту при доказательстве самой

теоремы. Следовало привести данную формулу раньше либо не приводить ее здесь, а сослаться на ее аналог из предыдущих глав.

5. Автор широко применяет методы и результаты из разных областей математики, неплохо было бы пояснять их поподробнее.

Однако сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку диссертации.

Заключение по работе

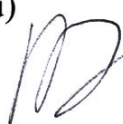
Диссертация Горбуновой Анастасии Владимировны является законченной научно-квалификационной работой, содержащей важные результаты, имеющие теоретическую и практическую ценность. Совокупность полученных результатов представляет собой решение фундаментальной научной проблемы, заключающейся в разработке вероятностных моделей, методов и алгоритмов анализа, обработки данных и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием.

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 4 и 11 паспорта специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне, написана технически грамотно.

Таким образом, считаю, что диссертация Горбуновой А.В. «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием» отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.01.11 – системный анализ
и автоматическое управление),

профессор, заведующий кафедрой
прикладной математики Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Вологодский
государственный университет»
(тел. 8 (8172) 76-91-94;
e-mail: a_zeifman@mail.ru)

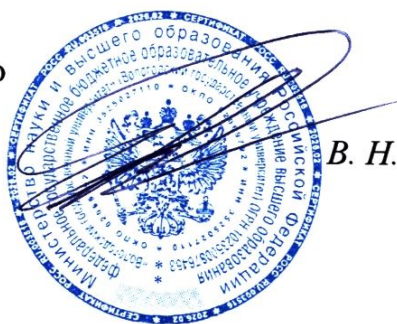


Зейфман Александр Израилевич

03.09.2026

Подпись А. И. Зейфмана удостоверяю

Ученый секретарь Ученого Совета



В. Н. Маковеев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Вологодский государственный университет»,
Адрес: Россия, 160000, Вологодская область, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15,
Телефон: +7 (8172) 72-46-45,
E-mail: kanz@vogu35.ru