

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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

Диссертация посвящена исследованию стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием, ключевой особенностью которых является декомпозиция сложного процесса или задачи на параллельно обрабатываемые части. При этом итоговое время обработки задачи определяется наиболее длительным из всех времен обработки составляющих задачу подзадач. Такой механизм характерен для центров обработки данных, где одновременно обрабатываются миллионы запросов, систем управления базами данных, обеспечивающих конкурентный доступ к информации, для широкого класса промышленных объектов, где критически важна скорость и надежность обработки параллельных потоков задач, а также для многих других современных технологических объектов.

В последние годы объем данных и сложность вычислительных задач стремительно растут, что повышает требования к точности прогнозов производительности и надежности систем, особенно в условиях конкурентного рынка услуг. Возникает объективная потребность в новых методах анализа, которые позволили бы преодолеть ограничения известных методик. Поэтому разработка более точных и универсальных подходов к анализу и управлению такими системами, включая оценку ранее не изученных характеристик, например, остаточного времени обслуживания, делает тему диссертации актуальной как с теоретической, так и с прикладной точки зрения в рамках системного анализа.

Общая характеристика содержания

Основные материалы диссертации изложены в пяти главах.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, приведена теоретическая и практическая значимость работы, указаны методы исследования, структура диссертации.

Первая глава носит обзорно-методологический характер и закладывает основу для использования методов машинного обучения в анализе сложных систем массового обслуживания. Здесь представлен обзор существующих работ,

а также описаны этапы нового метода анализа. Метод проиллюстрирован на двух примерах, полученные результаты подтверждают перспективность применения предложенного подхода к оценке основных вероятностно-временных характеристик сложных систем, включая системы с разделением и параллельным обслуживанием.

Вторая глава посвящена анализу систем с разделением и параллельным обслуживанием с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным обслуживанием. Для оценки среднего времени отклика и дисперсии предложены улучшенные аналитические формулы, которые точнее известных приближений, погрешность уменьшена в десятки раз. Впервые получены точные аналитические выражения для коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена между временами пребывания подзаявок, для коэффициента Кендалла получено приближение. Найдены предельные значения при высокой загрузке системы, которые важны для понимания имеющейся зависимости между временами пребывания подзаявок в подсистемах. Построена мета-гауссовская модель, которая сводит совместное распределение времен пребывания к многомерному нормальному распределению с использованием аналитических результатов, полученных для коэффициента корреляции Спирмена. Эта модель позволяет приближенно вычислять различные характеристики времени отклика системы. Также разработан метод оценки квантилей времени отклика на основе теории копул и их диагональных сечений, получены приближенные формулы для квантилей. Предложен алгоритм построения доверительных интервалов для среднего времени отклика по данным имитационного моделирования с учетом корреляции данных симуляции.

В **третьей главе** проведен анализ аналогичной системы, но с распределением Парето времени обслуживания. Получена верхняя граница для среднего времени отклика, основанная на порядковых статистиках. Для оценки среднего и дисперсии времени отклика применены два подхода: подход с использованием нейросетей и комплексный метод, включающий регрессию, визуальный анализ, имитационное моделирование и оптимизацию. Второй подход позволил получить явные аналитические приближения для моментов времени отклика и для коэффициентов корреляции Пирсона, Кендалла и Спирмена. Предложены два способа оценки квантилей: аппроксимация распределения времени отклика распределением Фреше, а также подход на основе копул, аналогичный использованному во второй главе.

В **четвертой главе** решается задача выбора оптимальной интенсивности обслуживания или скорости работы приборов, чтобы найти баланс между временем отклика и затратами на обслуживание исходя из того, что чем выше интенсивность обслуживания, тем дороже обходится оборудование (покупка, содержание). Для экспоненциального времени обслуживания в случае двух подсистем, где известно точное выражение для среднего времени отклика,

получено аналитическое решение для оптимальной загрузки (достаточно громоздкое, но в явном виде). Для большего числа подсистем используются приближенные формулы, что приводит к уравнениям, которые решаются численно. Для распределения Парето построена аналогичная стоимостная модель с использованием приближенной формулы для среднего времени из главы 3. Получено уравнение для оптимальной загрузки, которое решается численно. Таким образом, предложен универсальный подход к управлению для различных законов распределения.

Пятая глава посвящена анализу времени, которое требуется системе для завершения обслуживания всех заявок после того, как перестали поступать новые. Этого времени должно быть достаточным, чтобы система могла корректно завершить свою работу в случае необходимости. Рассмотрена система с двумя бесконечнолинейными подсистемами. Исследуются максимальное остаточное время обслуживания для двух подсистем в некоторый момент времени. Для различных вариантов распределения времени обслуживания получены выражения для совместной функции распределения максимума из остаточных времен обслуживания, найдены соответствующие копулы, коэффициент корреляции Бломквиста. Рассмотрен случай нестационарного пуассоновского потока, когда интенсивность поступления заявок меняется со временем, а также когда интенсивность входящего потока задана случайным процессом. Для этих случаев сформулированы обобщающие теоремы.

В заключении суммированы все основные результаты работы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и адекватно ее характеризует.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов диссертации

Достоверность результатов диссертации обеспечивается за счет корректного применения математического аппарата, лежащего в основе разработанных методов анализа характеристик систем с разделением и параллельным обслуживанием, который опирается на методы теории вероятностей и случайных процессов, математической статистики, методы оптимизации, статистического имитационного моделирования. Имеет место согласованность результатов диссертации с известными из научной литературы.

Научные положения диссертационной работы достаточно обоснованы. Обоснованность и достоверность также подтверждается апробацией на научных семинарах и конференциях по профилю диссертации. Результаты, представленные в диссертации, изложены в 20 публикациях, из которых 15 изданы в журналах, включенных в Перечень ВАК категории K1 или приравненных к ним.

Научная новизна результатов диссертации

В диссертации получены следующие основные новые результаты:

- разработаны новые методы анализа характеристик систем с разделением и параллельным обслуживанием: метод, основанный на применении методов машинного обучения и комплексный метод, позволяющий получать аналитические выражения для оценок;
- проанализированы коэффициенты корреляции между временами пребывания в подсистемах системы с разделением и параллельным обслуживанием, в частности, получены точные формулы для коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена, а также построена мета-гауссовская модель для времени отклика системы с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным обслуживанием;
- предложены два новых подхода к построению квантилей распределения времени отклика: на основе копул и на основе аппроксимации распределением Фреше для систем с распределением Парето времени обслуживания;
- разработан метод определения оптимальной интенсивности обслуживания, а также метод определения характеристик остаточного времени обслуживания при различных законах распределения времени обслуживания систем с разделением и параллельным обслуживанием.

Замечания

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В главе 2, посвященной анализу характеристик системы с пуассоновским входным потоком и экспоненциальным распределением времени обслуживания на приборах, справедливость полученных аналитических выражений для математического ожидания и среднеквадратического отклонения времени пребывания заявки в системе проверялась и для довольно большого числа приборов или подсистем, равного 100 и 1000. Качество аппроксимации оказалось довольно хорошим, т. е. погрешность приближения была незначительной. Целесообразно было бы провести дополнительный анализ и проверить полученное приближение в случае распределения Парето времени обслуживания для аналогичных больших значений числа подсистем.
2. Во второй главе при описании схемы функционирования систем с разделением и параллельным обслуживанием упоминается буфер синхронизации, стоило бы более подробно остановиться на том, что подразумевается под термином «синхронизация».
3. Пятая глава диссертации посвящена анализу максимального остаточного времени обслуживания в системах с разделением и параллельным

обслуживанием в случае отключения входящего потока по разным причинам. При этом остаточные времена обслуживания по всем приборам являются зависимыми. Для различных законов распределения времени обслуживания наряду с функцией распределения исследуемой характеристики, в отдельных случаях получены выражения для коэффициента корреляции Бломквиста. При этом было бы полезно проанализировать и другие коэффициенты корреляции – Пирсона, Спирмена или Кендалла.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Горбуновой А.В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена фундаментальная научная проблема разработки вероятностных моделей, методов и алгоритмов анализа, обработки данных и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием. Работа выполнена на высоком уровне и соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что автор диссертации, Горбунова Анастасия Владимировна, 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,
главный научный сотрудник
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»

«01» сентября 2026 г.



Юрий Николаевич Орлов

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., 4

Тел.: +7 499 978-13-14

E-mail: office@keldysh.ru

Подпись Орлова Ю.Н. заверяю
Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
А.А. Давыдов

