

«УТВЕРЖДАЮ»



Заместитель директора по научной работе  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института проблем  
управления им. В.А. Трапезникова  
Российской академии наук, к.ф.-м.н.

И.Н. Барабанов

«3» ноября 2025 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) по диссертационной работе Горбуновой Анастасии Владимировны «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Диссертация «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием» выполнена на базе лабораторий № 69 ИПУ РАН (2019 – 2023 гг.) и № 27 ИПУ РАН (2023 – 2025 гг.), в которой Горбунова А.В. работает с сентября 2023 г. и по настоящее время в должности старшего научного сотрудника.

В 2010 г. Горбунова А.В. с отличием окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» по направлению «Прикладная математика и информатика».

В 2017 г. в диссертационном совете на базе Российского университета дружбы народов защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» на тему «Анализ моделей массового обслуживания для оценки времени отклика в системе облачных вычислений».

Научный консультант – доктор физико-математических наук, доцент Лебедев Алексей Викторович. Основное место работы – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», механико-математический факультет, кафедра теории вероятностей, доцент.

По итогам обсуждения диссертации «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием» **принято следующее заключение.**

**Актуальность темы** обусловлена тем, что концепция разделения сложной задачи на более мелкие составляющие и их дальнейшая обработка в параллельном режиме заложена в основу множества современных рабочих или производственных процессов, а также различных вычислительных систем. Таким образом, возникает необходимость в построении точных прогнозов показателей качества обслуживания при различных уровнях загрузки стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием и, соответственно, в разработке новых методов и алгоритмов их получения в том числе с целью управления такими системами.

**Объектом исследования** диссертационной работы являются стохастические системы с разделением и параллельным обслуживанием.

**Предметом исследования** являются вероятностные модели, методы и алгоритмы анализа и управления для систем с разделением и параллельным обслуживанием.

**Целью** является решение фундаментальной научной проблемы – разработка вероятностных моделей, методов и алгоритмов анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием.

Для достижения цели требуется решить следующие **задачи**:

1) разработать комплекс методов и алгоритмов оценки основных характеристик времени отклика систем с разделением и параллельным обслуживанием: моментов и квантилей его распределения, а также коэффициентов корреляции между временами пребывания в подсистемах;

2) разработать метод определения оптимальной интенсивности обслуживания в системах с разделением и параллельным обслуживанием в зависимости от интенсивности входящего потока;

3) разработать метод определения характеристик остаточного времени обслуживания, т. е. времени, необходимого для корректного завершения работы системы после отключения входящего потока, в системах с разделением и параллельным обслуживанием;

4) продемонстрировать применимость предложенных методов на примерах конкретных типов распределений для входящего и обслуживающего потоков.

**Основные результаты и положения, выносимые на защиту:**

1) метод анализа основных характеристик систем с разделением и параллельным обслуживанием на основе машинного обучения, результатом применения которого является

обученная интеллектуальная модель, позволяющая оценить интересующие характеристики для любых промежуточных значений входных параметров из заданного интервала;

2) комплексный метод получения аналитических оценок характеристик систем с разделением и параллельным обслуживанием, включающий в себя множественную регрессию, визуальный анализ данных, имитационное моделирование и метод оптимизации;

3) мета-гауссовская модель для оценки характеристик времени отклика системы с разделением и параллельным обслуживанием с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением времен обслуживания;

4) метод оценки квантилей распределения времени отклика систем с разделением и параллельным обслуживанием на основе элементов теории копул и их диагональных сечений, а также на основе аппроксимации распределения времени отклика системы распределением Фреше и метода моментов для случая распределения со степенным хвостом времен обслуживания на примере распределения Парето;

5) метод определения оптимальной интенсивности обслуживания для систем с разделением и параллельным обслуживанием на примере систем с пуассоновским входящим потоком, экспоненциальным распределением или распределением Парето времен обслуживания;

6) метод определения характеристик остаточного времени обслуживания для систем с разделением и параллельным обслуживанием с двумя бесконечнолинейными подсистемами с различными вариантами распределений для времени обслуживания.

#### **Научная новизна:**

1) разработан новый метод анализа систем с разделением и параллельным обслуживанием на основе машинного обучения, результатом применения которого является обученная интеллектуальная модель, позволяющая оценить интересующие характеристики для любых промежуточных значений входных параметров из заданного интервала;

2) разработан новый комплексный метод анализа систем с разделением и параллельным обслуживанием, включающий в себя множественную регрессию, визуальный анализ данных, имитационное моделирование и метод оптимизации, результатом применения которого являются аналитические выражения для оценки различных характеристик системы с разделением и параллельным обслуживанием;

3) впервые получены точные формулы для коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена, а также аналитическое приближение коэффициента корреляции Кендалла между временами пребывания в подсистемах системы с разделением и параллельным

обслуживанием с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением времен обслуживания;

4) впервые разработана мета-гауссовская модель для оценки характеристик времени отклика системы с разделением и параллельным обслуживанием с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением времен обслуживания;

5) разработан новый метод оценки квантилей распределения времени отклика систем с разделением и параллельным обслуживанием с пуассоновским входящим потоком на основе элементов теории копул и их диагональных сечений;

6) разработан новый метод оценки квантилей распределения времени отклика систем с разделением и параллельным обслуживанием с различными вариантами распределений для входящего потока и распределением со степенным хвостом времен обслуживания на примере распределения Парето на основе аппроксимации распределения времени отклика распределением Фреше и метода моментов;

7) разработаны новая модель и на ее основе метод определения оптимальной интенсивности обслуживания для систем с разделением и параллельным обслуживанием на примере систем с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным распределением или распределением Парето времен обслуживания;

8) разработан новый метод определения характеристик остаточного времени обслуживания систем с разделением и параллельным обслуживанием с двумя бесконечнолинейными подсистемами с различными вариантами распределений для времени обслуживания.

**Достоверность полученных научных результатов** обосновывается строгими математическими доказательствами теорем, лемм и утверждений, корректностью разработанных методов исследования с использованием классических методов исследования, а также подтверждается согласованностью теоретических результатов с результатами вычислительных экспериментов, проведенных с помощью компьютерного моделирования.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы.**

Разработан комплекс алгоритмов и методов системного анализа, а также управления системой с разделением и параллельным обслуживанием. Для анализа впервые предложены метод на основе машинного обучения, комплексный метод с использованием множественной регрессии, метода оптимизации и визуального анализа данных. Впервые получены точные выражения для коэффициентов корреляции между временами пребывания подзаявок в подсистемах системы с пуассоновским входящим потоком и экспоненциальным

распределением времен обслуживания на приборах, а также приближенные формулы для оценки коэффициентов корреляции между временами пребывания подзаявок в подсистемах системы с пуассоновским входящим потоком и распределением Парето времен обслуживания на приборах. Оценивание коэффициентов корреляции важно потому, что расширяет довольно ограниченную линейку известных методов для анализа времени отклика системы. Получены оценки для копул времен пребывания подзаявок в подсистемах системы с разделением и параллельным обслуживанием. Копула исчерпывающе описывает зависимость случайных величин в чистом виде. Современный математический аппарат теории копул активно развивается и применяется в последние десятилетия, однако в теории массового обслуживания он пока представлен мало. Таким образом, указанные характеристики позволяют провести полноценный системный анализ, поскольку ранее имеющаяся зависимость между временами пребывания подзаявок не исследовалась. Предложена модель управления для систем с разделением и параллельным обслуживанием, которая позволяет определить оптимальное значение интенсивности обслуживания в зависимости от интенсивности входящего потока. Также получены формулы для функции распределения остаточного времени обслуживания системы с разделением и параллельным обслуживанием с двумя бесконечнолинейными подсистемами с различными вариантами распределений для времени обслуживания на приборах.

Системы массового обслуживания с разделением и параллельным обслуживанием широко используются для моделирования различного рода процессов, в рамках которых происходит разделение или распараллеливание задачи, в частности, в области информационных технологий при моделировании процесса функционирования высокопроизводительных вычислительных сред, использующих для повышения производительности различные методы распараллеливания. Определение различных характеристик физических систем с разделением и параллельным обслуживанием, например таких как математическое ожидание, дисперсия или квантили распределения времени отклика системы, а также оптимальное значение интенсивности обслуживания с точки зрения оптимизации финансовых показателей системы, очевидно, позволяет провести полноценный системный анализ и, как следствие, корректное проектирование системы, а также адекватное прогнозирование ее поведения в различных условиях.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.** Материалы диссертации опубликованы достаточно полно в 20 научных работах, из которых 15 – в изданиях из списка ВАК категории К1 и приравненных к ним, а именно: 6 статей в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК (категория К1), 9

публикаций в журналах, индексируемых в Scopus (1 – Q1, 1 – Q2, 7 – Q3), и 5 статей в других сборниках, индексируемых в Scopus.

**Личный вклад.** Все результаты диссертации получены лично Горбуновой А.В. при научном консультировании доктора физико-математических наук Лебедева А.В.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (физико-математические науки) по следующим пунктам паспорта специальности:

п. 1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

п. 11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

Диссертация «Методы и алгоритмы анализа и управления для стохастических систем с разделением и параллельным обслуживанием» Горбуновой Анастасии Владимировны рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Заключение принято на заседании расширенного семинара лабораторий № 27, 16, 25, 37, 57, 90 ИПУ РАН. Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 3 от 10 ноября 2025 г.

Председатель расширенного семинара,  
д.т.н., г.н.с. лаб. № 27



В.С. Подлазов