

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Румянцева Александра Сергеевича  
«Методы моделирования, анализа стационарности и оценивания  
производительности систем параллельной обработки», представленную к защите на  
соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности  
05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы  
программ»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время круг задач, требующих для своего решения применения мощных вычислительных ресурсов, все время расширяется. Это связано с тем, что произошли фундаментальные изменения в самой организации научных исследований. Сюда можно отнести эксперименты на коллайдерах со встречными пучками, расшифровка генома человека. Полностью не решена задача безопасного хранения ядерного оружия, а из-за запрета на ядерные испытания состояние накопленных зарядов можно определить только путем компьютерного моделирования. Очевидно, что решение таких масштабных задач требует значительных вычислительных ресурсов.

Высокопроизводительные вычисления в настоящее время не мыслятся без распараллеливания, ибо наиболее мощные вычислительные системы имеют сотни и тысячи процессоров, работающих одновременно и в тесном взаимодействии.

Особенности моделей систем параллельной обработки приводят к необходимости создания новых и развития существующих методов анализа их стационарности, оценивания характеристик производительности и эффективности в стационарном, переходном режиме, а также разработки соответствующих алгоритмов и реализующих их комплексов программ.

В диссертационной работе А. В. Румянцева предлагается комплекс новых методов анализа и расчета показателей эффективности систем параллельной обработки на основе развития приложений структурированных марковских, обобщенных полумарковских и регенерирующих процессов, что и обуславливает ее **актуальность**.

### **Характеристика содержания диссертационной работы**

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, заключение, список литературы из 294 наименований и приложения. Общий объем диссертации 275 страниц, включая 16 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность избранной темы, сформулирована цель исследований, перечислены задачи, которые необходимо решить для ее достижения, обоснована научная новизна полученных результатов.

Значимым результатом **первой главы** диссертационной является явный вид критерия стационарности для класса структурированных цепей Маркова с непрерывным временем, в которых переходы являются локально однородными. Это позволяет провести анализ стационарности многосерверных многоклассовых систем обслуживания, в том числе на примере модели суперкомпьютера (с одновременным занятием и одновременным освобождением случайного числа серверов на одно и то же случайное время).

Во **второй главе** рассматриваются модели систем параллельной обработки более сложной структуры (с несколькими очередями и неэкспоненциальном временем обслуживания). Для таких систем предлагается использовать регенеративный метод, который позволяет получить как (достаточные) условия стационарности, так и базовые стационарные характеристики модели. Также представляет интерес проведенный анализ стационарности и базовых стационарных характеристик неоднородной многоклассовой односерверной системы обслуживания с повторными вызовами постоянной интенсивности.

**Третья глава** посвящена применению методов регенеративного анализа к моделям систем параллельной обработки, основанным на стохастических рекуррентных соотношениях. Модель системы обслуживания строится с помощью одношаговых рекурсий. Получаемые при этом траектории случайных процессов являются положительно возвратными регенерирующими, что позволяет осуществить вероятностный анализ стационарных характеристик модели. Методы, представленные в данной главе, могут применяться к немарковским системам обслуживания с неэкспоненциальным обслуживанием клиентов.

В **четвертой главе** предложена модификация матрично-аналитического метода для малого фазового пространства, позволяющая получить вероятностные характеристики систем в явном виде. Данный метод применен к анализу модели системы передачи данных типа когнитивного радио.

В **пятой главе** представлены математические модели систем обслуживания, когда клиенты приходят или обслуживаются группами случайного или детерминированного размера, что затрудняет анализ. Общей чертой указанных систем является сложный характер взаимодействия клиентов и обслуживающих устройств, в том числе допускающий блокировку части устройств в ожидании окончания обслуживания группы (так называемые модели типа разделения–слияния), исчерпывающее обслуживание, а также обслуживание–запасание с различным приоритетом доступа к запасу.

Предлагается оригинальный метод нахождения явного вида матрицы интенсивностей структурированной цепи Маркова с непрерывным временем, обладающей блочной почти нижнетреугольной матрицей в условиях малого размера блоков, обобщающий ранее известные методы получения явного решения для случая малого фазового пространства.

Кроме того, предложена модификация метода расщепления состояний (состоящая в особой упорядоченности состояний цепи после расщепления) для анализа матрично-аналитических моделей систем в стационарном и переходном режиме.

В **шестой главе** представлен комплекс программ, основу которого составляют программные модули и пакеты для среды вычислений R, реализующие предложенные методы для расчета характеристик моделей систем параллельной обработки, позволяющие получать характеристики в стационарном и переходном режимах, выполнять оценивание с использованием параллельных и распределенных вычислений.

### **Достоверность и новизна результатов диссертации**

В диссертации получены следующие **основные** новые научные результаты, определяющие теоретическую ценность проведенного исследования:

– разработан и исследован комплекс моделей систем параллельной обработки на основе структурированных цепей Маркова с непрерывным временем, стохастических рекуррентных соотношений, положительно возвратных регенерирующих процессов, обобщенных полумарковских процессов, учитывающий ключевые характеристики современных высокопроизводительных и распределенных вычислительных систем и систем хранения;

– предложены методы анализа и оценивания эффективности систем массового обслуживания (метод для нахождения критерия стационарности матрично-аналитических моделей, модифицированный метод расщепления состояний, комбинированный метод на основе матрично-аналитического и регенеративного методов для анализа стационарных характеристик, новый способ регенеративного оценивания характеристик обобщенных полумарковских процессов с использованием расщепления плотности, параллельных и распределенных вычислений);

– разработаны алгоритмы и программы, реализующие предложенные методы для расчета характеристик комплекса моделей систем параллельной обработки, учитывающие сложный характер зависимости характеристик исследуемых процессов, в том числе коррелированный групповой марковский входной поток,

распределения времени обслуживания с тяжелым хвостом, либо фазового типа, позволяющие получать характеристики в стационарном и переходном режимах, выполнять оценивание с использованием параллельных и распределенных вычислений, предназначенные для поддержки исследований систем параллельной обработки.

### **Степень обоснованности научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность основных положений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью выбранных математических моделей, корректным использованием математического аппарата, включающего методы теории вероятностей, марковских случайных процессов, теории массового обслуживания. Достоверность также подтверждается фактом реализации объёмных численных экспериментов, показавшими согласованность аналитических расчётов с результатами проведённого автором имитационного моделирования ряда важных случаев.

Представленные в диссертационной работе результаты широко и полно апробированы на многочисленных отечественных и международных конференциях, симпозиумах, семинарах и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных (значительной частью) изданиях, что также свидетельствует о достоверности и обоснованности изложенных в диссертации результатов.

### **Ценность результатов работы для науки и практики**

Результаты работы могут быть практически использованы во всех приложениях для построения, анализа и оптимизации показателей эффективности функционирования систем параллельных и распределённых вычислений, в том числе, для высокопроизводительных вычислительных кластеров (суперкомпьютеров).

Ряд полученных результатов может быть использован в учебном процессе на уровне магистратуры и аспирантуры при чтении курсов теоретического и прикладного характера, в том числе по теории массового обслуживания в классических университетах и по теории телетрафика мультисервисных сетей в профильных университетах.

### **Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

Отражение в работе обширного списка публикаций и апробации результатов диссертационного исследования свидетельствует о весомом личном практическом вкладе диссертанта в российскую науку.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в известных печатных изданиях, в том числе, в 41 статье, опубликованных в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus и 3 статьи в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Также результаты в полном объеме апробированы на крупных международных и всероссийских конференциях, что подтверждается статьями, опубликованными в трудах конференций и журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Все эти показатели свидетельствуют о том, что работа хорошо воспринята научной общественностью.

### **Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат логически выстроен, хорошо структурирован, правильно и в достаточной мере отражает содержание диссертационной работы. Как часть выполненной научной работы автореферат отражает компетентность автора в области проводимых исследований и хорошее владение используемыми математическими методами.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В формуле 1.91 не определено значение  $M$  под знаком суммы, возможно имеется ввиду  $v$ .
2. При исследовании сходимости зависимости относительной ошибки от параметра глубины аппроксимации, интересно было бы посмотреть расчеты для распределений с одинаковым математическим ожиданием и различной дисперсией. По одному примеру, на мой взгляд трудно сделать точные выводы.
3. Стр. 73. На мой взгляд, не совсем корректное выражение «возможно несколько неограниченных мест для ожидания», видимо имеется ввиду несколько бункеров для ожидания(очередь, орбита) неограниченной емкости.
4. Стр. 87-88. Почему приводится демонстрация только в зависимости от параметра  $b_2$ ? Влияют ли параметры обслуживания и скорости обращения с орбиты на значение коэффициента корреляции? Как можно пояснить рост значения корреляции в зависимости от увеличения значения  $b_2$  (Рисунок 2.1)?
5. На рисунке 3.2 график зависимости решения задачи оптимизации от параметра допустимого отклонения имеет практически линейный вид, возможно следовало бы подобрать более демонстративный пример.
6. В главе 5, стр187-188 не определены параметры MAP потока.

7. Несомненным достоинством работы являются теоретические результаты для моделей с коррелированными входными потоками типа MAP, но нет иллюстративных примеров, демонстрирующих влияние значений коэффициента корреляции на характеристики системы.
8. При несомненной практической значимости представленных моделей в работе мало представлены расчеты на основе реальных данных.
9. Возможно ли обобщение результатов второй главы на модели со скоростью обращения с орбиты, зависящей от числа находящихся заявок? А также для систем с конфликтами «коллизиями» заявок.

Указанные замечания не уменьшают общее благоприятное впечатление от работы и ее значимость. Следует отметить, что автор виртуозно владеет регенеративным методом для анализа стационарности и получения базовых стационарных характеристик моделей систем обслуживания сложной структуры.

### **Заключение**

Диссертационная работа Румянцева Александра Сергеевича на тему «Методы моделирования, анализа стационарности и оценивания производительности систем параллельной обработки» является законченной научно-квалификационной работой, посвященной решению фундаментальной научной проблемы исследования математических моделей систем параллельной обработки и расчета показателей их эффективности на основе развития приложений структурированных марковских, обобщенных полумарковских и регенерирующих процессов.

Содержание диссертации обладает внутренним единством, отличается научной новизной, а совокупность представленных в диссертации результатов можно квалифицировать научное достижение, вносящее существенный исследовательский вклад в теорию телетрафика.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Румянцева Александра Сергеевича на тему «Методы моделирования, анализа стационарности и оценивания производительности систем параллельной обработки» соответствует критериям, которые установлены пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Румянцев Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Официальный оппонент**, доктор физико-математических наук (05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор, профессор кафедры теории вероятностей и математической статистики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

«1» сентября 2022 г.

Моисеева Светлана Петровна

Подпись профессора Моисеевой С.П. заверяю

«1» сентября 2022 г.



ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ  
ПРЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕД  
ПРАВЛЕНИЯ ДЕЛАМИ

 И. В. АНДРИЕНКО

Моисеева Светлана Петровна, доктор физико-математических наук (05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор, профессор кафедры теории вероятностей и математической статистики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Адрес: 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Тел.: (3822) 529-585

Факс: +7 (3822) 529-585

E-mail: [smoiseeva@mail.ru](mailto:smoiseeva@mail.ru)