

## 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

«18» ноября 2014 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Моисеевой Светланы Петровны  
«Разработка методов исследования немарковских математических  
моделей систем массового обслуживания с неограниченным числом  
приборов и непуассоновскими входящими потоками», представленную  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

### **Актуальность темы диссертации.**

Диссертационная работа Моисеевой С.П. посвящена исследованию и применению моделей систем массового обслуживания (СМО) с неограниченным числом обслуживающих приборов, в том числе систем параллельного обслуживания потоков неординарных заявок и систем с повторным обслуживанием. Такие СМО являются универсальными математическими моделями и могут служить как для описания социально-экономических процессов, так и для описания процессов обслуживания в мультисервисных сетях связи и в информационно-коммуникационных системах. Современным примером таких систем являются системы облачных вычислений.

Вместе с тем следует отметить, что исследование многих систем (с параллельным или разнотипным обслуживанием, с повторным обслуживанием и т.п.) производится, как правило, в предположении либо пуассоновского входящего потока, либо экспоненциального распределения времени обслуживания. Такие модели не всегда адекватно описывают особенности обслуживания трафика в современных сетях связи. В работах многих авторов показано, что функция распределения длин интервалов между моментами наступления событий в таких системах лучше всего аппроксимируется распределениями, обладающими «длинным хвостом», а для трафика характерна неравномерность интенсивности поступления заявок. Например, пульсирующий трафик, характерный для передачи данных пользователей Интернет, хорошо описывается МАР-поток.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о том, что в связи с существенным расширением математических моделей случайных потоков событий возникает необходимость в исследовании моделей массового обслуживания с непугассоновскими входящими потоками и произвольным временем обслуживания. Решению именно этих задач и посвящена диссертационная работа Моисеевой С.П.. Результаты диссертационной работы имеют большой теоретический интерес, а их применение повышает эффективность прикладных систем, что делает эту работу актуальной и своевременной.

### **Характеристика диссертационной работы по главам**

Диссертация Моисеевой С.П. состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Основной текст работы изложен на 280 страницах, список литературы включает в себя 204 наименования.

Во **введении** представлены предмет и цель исследований, обосновывается актуальность темы диссертации, приводится обзор работ по данной теме и кратко излагается содержание работы по главам.

В **первой главе** диссертации рассматриваются новые модели марковских СМО с неограниченным числом обслуживающих приборов: системы параллельного обслуживания кратных заявок с  $k$  блоками обслуживания и системы с повторным обслуживанием заявок. Получены

аналитические выражения нестационарных производящих функций для процессов, описывающих число заявок в системе в момент времени  $t$  и для потоков поступивших и обслуженных заявок. Определены основные числовые вероятностные характеристики. Показано применение указанных моделей к описанию процессов в страховых и торговых компаниях и в распределенных вычислительных системах.

**Вторая глава** посвящена исследованию вероятностных характеристик систем с непуассоновскими входящими потоками (*BMAP*, *MAP*, полумарковский, поток марковского восстановления) и экспоненциальной функцией распределения времени обслуживания заявок.

В **третьей главе** предлагается оригинальный метод предельной декомпозиции, позволяющий проводить исследование потоков в системах с повторным обслуживанием, пуассоновским входящим потоком и произвольной функцией распределения времени обслуживания заявок. Разработанный метод основан на использовании свойства разделения пуассоновского потока по полиномиальной схеме и позволяет свести задачу исследования бесконечнолинейных систем к задаче анализа совокупности независимых однолинейных СМО. Методом предельной декомпозиции исследованы потоки первичных и повторных заявок, а также суммарный поток обращений в системе массового обслуживания  $M|GI|\infty$  с повторным обслуживанием. Доказаны теоремы о виде производящих функций исследуемых потоков.

**Четвертая глава** посвящена развитию метода асимптотического анализа СМО с неограниченным числом обслуживающих приборов при условии растущего времени обслуживания, что позволяет проводить исследование систем с непуассоновскими входящими потоками. Проведен асимптотический анализ систем обслуживания вида  $BMAP|M|\infty$ ,  $MR|M|\infty$  и показано, что стационарное распределение вероятностей числа приборов можно аппроксимировать гауссовским распределением. Сравнение с точными характеристиками, полученными во второй главе, позволяет определить область применимости асимптотического метода.



В **пятой главе** предложен оригинальный метод – метод просеянного потока, основанный на идее равенства числа приборов, занятых в системе в произвольный момент времени, и числа событий просеянного потока, наступивших до того же момента времени. Предложенный метод решает научную проблему анализа немарковских систем обслуживания с непуассоновскими входящими потоками и открывает перспективы исследования широкого класса математических моделей реальных социально-экономических и технических систем. Данный метод позволяет проводить исследование немарковских СМО с произвольной функцией распределения времени обслуживания и марковизируемым входящим потоком. Известные результаты по исследованию систем вида  $G|GI|∞$ ,  $M|GI|∞$  получаются как частные случаи.

**Шестая глава** посвящена описанию комплекса программ, включающего имитационное моделирование немарковских систем с неограниченным числом приборов и непуассоновскими входящими потоками, а также программного обеспечения для численного анализа вероятностных характеристик рассматриваемых систем (математического ожидания, дисперсии и коэффициента корреляции) и для расчета параметров гауссовской аппроксимации и аппроксимации третьего порядка распределений вероятностей исследуемых процессов.

#### **Научная новизна результатов работы.**

Диссертация содержит новые научные результаты в области разработки методов исследования СМО с неограниченным числом приборов, обоснованные строгими математическими выкладками, достоверность которых подтверждается численными экспериментами и имитационным моделированием. Отличие от ранее известных результатов заключается в следующем:

– для системы параллельного обслуживания разнотипных заявок получено аналитическое выражение многомерной производящей функции числа занятых приборов;

– получены формулы, определяющие начальные моменты числа занятых приборов в моделях параллельного обслуживания непуассоновских потоков кратных заявок;

– проведено исследование потоков в системах с повторным обслуживанием заявок, в том числе для моделей параллельного обслуживания и с повторным обращением заявок. Найдены основные вероятностные характеристики исследуемых потоков;

– разработан оригинальный метод просеянного потока, позволяющий проводить исследование немарковских систем различной конфигурации с неограниченным числом обслуживающих приборов и неэкспоненциальным временем обслуживания;

– предложено развитие метода асимптотического анализа на предельное условие растущего времени обслуживания, применяемое для исследования широкого класса систем, в том числе для всех предложенных в работе моделей. Показано, что для СМО с непуассоновскими (*ВМАР*, *МАР*, полумарковскими) входящими потоками асимптотическое распределение является гауссовским, а для систем параллельного обслуживания парных заявок – двумерным гауссовским, что обобщает известные результаты для аналогичных систем с пуассоновским входящим потоком. За счет построения асимптотики третьего порядка в рамках предложенного метода удалось повысить точность аппроксимации по сравнению с гауссовской в три и более раз.

– разработан оригинальный метод предельной декомпозиции, основанный на использовании свойства разделения пуассоновского потока, предназначенный для исследования СМО с пуассоновским входящим потоком и произвольной функцией распределения времени обслуживания заявок, позволяющий проводить анализ не только процесса изменения числа занятых приборов, но и различных потоков заявок к приборам системы (суммарных, повторных).

**Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций**, содержащихся в диссертационной работе Моисеевой С.П., подтверждается строгим математическим аппаратом, использованием методов теории вероятностей, случайных процессов, теории массового обслуживания,

дифференциального и интегрального исчисления. Совпадение результатов исследования частных случаев рассматриваемых систем с известными ранее является косвенным подтверждением достоверности и обоснованности используемых в работе методов.

### **Практическая значимость результатов работы.**

Помимо научной новизны разработанных моделей и методов анализа их вероятностных характеристик, практическую значимость представляет возможность их использования на практике при моделировании и расчете параметров систем облачных вычислений с учетом пульсирующего трафика пользователей. Кроме того, результаты могут быть использованы в учебном процессе в дисциплинах по выбору студентов, обучающихся по направлению «Прикладная математика и информатика». Практическую значимость работы подтверждает поддержка исследований ведомственной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)», а также грантами госзадания Минобрнауки РФ на проведение научных исследований в Томском государственном университете № 8.4055.2011 (2012 – 2013 гг.), № 1.511.2014/К (2014 г.).

### **Полнота опубликования научных результатов**

По материалам диссертации опубликовано 62 работы, в том числе 2 монографии, 14 статей в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций» (из них 1 статья в издании, включенном в международную базу научного цитирования Scopus), остальные в других научных изданиях (из них 8 зарубежных конференций, 1 статья в сборнике материалов, включенном в международную базу научного цитирования Web of Science).

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Литературный обзор по теме диссертационного исследования выполнен в объеме, достаточном для обоснования актуальности темы и новизны полученных результатов. Однако нет обоснования применения



рассматриваемых систем в современных инфокоммуникационных системах и СМО с облачной инфраструктурой.

2. Метод просеянного потока, разработанный автором, иллюстрирован только в диссертации, а в автореферате дано лишь общее описание, что затрудняет понимание.

3. Из текста диссертации не ясно, можно ли применять разработанные методы для исследования других систем, например, с неоднородными приборами.

4. В главе 6 следовало бы дать комментарии по поводу вычислительной сложности разработанного программного обеспечения.

Отмеченные недостатки не влияют на положительную оценку выполненной работы, посвященной научной проблеме анализа моделей массового обслуживания, выходящих за рамки классических, с непуассоновскими входящими потоками и произвольным временем обслуживания.

### **Заключение**

Диссертационная работа Моисеевой С.П. является законченной научно-квалификационной работой. Диссертация написана на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью полученных результатов. Полученные в диссертации результаты обобщают ранее известные, что существенно развивает теорию случайных процессов и теорию массового обслуживания. Стройность и строгость изложения, ясная постановка задач, строгость доказательств свидетельствуют о высокой научной квалификации автора.

Результаты работы в достаточной мере апробированы, своевременно опубликованы, а автореферат полностью отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа С.П. Моисеевой соответствует критериям пунктов 9–14 «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических

наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор, Моисеева Светлана Петровна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук.

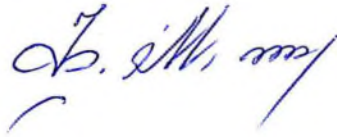
Отзыв заслушан и одобрен на заседании научного семинара ИПУ РАН, протокол № 10/17 от 9 октября 2014 г.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией № 17

«Автоматизированных систем массового обслуживания  
и обработки сигналов» ИПУ РАН,

д.т.н., с.н.с.



Фархадов Маис Паша Оглы

18 ноября 2014 г.

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем управления  
им. В. А. Трапезникова Российской академии наук  
Адрес: 117997, ГСП-7, В-342, г. Москва, Профсоюзная, 65  
<http://www.ipu.ru/>  
Тел.: +7 495 334-89-10  
E-mail: [snv@ipu.ru](mailto:snv@ipu.ru)