

## УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, доктор физико-математических наук, академик РАН



Васильев С. Н.

« 04 » марта 2016 г.

## ОТЗЫВ

**ведущей организации – федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук –**  
**на диссертацию Моисеева Александра Николаевича «Исследование математических моделей систем и сетей массового обслуживания с высокоинтенсивными непуассоновскими входящими потоками», представленную к защите в Диссертационном Совете Д 212.267.08, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

**Актуальность темы диссертации.** Диссертация Моисеева А.Н. посвящена исследованию систем и сетей массового обслуживания, которые являются математическими моделями телекоммуникационных сетей и распределенных вычислительных систем обработки информации. Важным аспектом диссертационного исследования является анализ моделей с высокоинтенсивными непуассоновскими входящими потоками, которые являются наиболее адекватными современными моделями, применяющимися для описания потоков информации в реальных телекоммуникационных сетях и распределенных вычислительных системах. Несмотря на важность таких исследований для

решения многих научно-технических задач, в современной научной литературе эти исследования широко представлены только для марковских моделей систем и сетей обслуживания, когда входящий поток является пуассоновским, а обслуживание – экспоненциальным. Исследование же немарковских моделей с непуассоновскими входящими потоками и неэкспоненциальным обслуживанием представлено лишь отдельными работами, в которых рассматриваются задачи анализа систем и сетей специфической конфигурации.

Таким образом, разработка некоторых общих подходов и методов исследования немарковских моделей массового обслуживания и, в особенности сетей обслуживания, является актуальной научной проблемой, решение которой позволить значительно расширить возможности исследований в области теории массового обслуживания и круг решаемых с ее помощью инженерно-технических проблем. Решению именно этой задачи и посвящена диссертационная работа Моисеева А.Н.

**Характеристика диссертационной работы по главам.** Диссертация Моисеева А.Н. состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Текст работы изложен на 333 страницах. Список литературы включает в себя 254 наименования.

Во **введении** описана актуальность работы, выполнен обзор литературы, определены цель и задачи исследования, приведено краткое изложение диссертации по главам.

В **первой главе** описаны модели высокоинтенсивных непуассоновских потоков событий различных типов: рекуррентный, МАР, полумарковский, выполнен их асимптотический анализ. С применением метода асимптотического анализа, процедура которого модифицирована на случай предельного условия высокой интенсивности входящего потока, показано, что распределения вероятностей числа событий, наступивших в таких потоках в течение интервала времени фиксированной длины, при достаточно большой интенсивности потока аппроксимируются нормальными распределениями. Характеристики этих

распределений получены в данной главе и используются в дальнейшем при анализе моделей систем массового обслуживания (СМО) и сетей массового обслуживания (СеМО).

Во **второй главе** представлен анализ однофазных СМО, выполненный различными методами исследования: методом многомерных марковских процессов – для систем с обслуживанием фазового типа, методом выделения первого скачка – для систем с входящим рекуррентным потоком, методом динамического просеивания – для систем с произвольным типом входящего потока и произвольным обслуживанием. Показано, что в условиях высокой интенсивности входящего потока распределения вероятностей числа заявок в рассматриваемых системах в стационарном режиме функционирования являются асимптотически нормальными, получены параметры соответствующих нормальных распределений для каждого типа системы. В этой же главе выполнена процедура асимптотического анализа третьего порядка, получены соответствующие аппроксимации характеристических функций числа заявок в стационарном режиме функционирования бесконечнолинейных систем обслуживания с различными типами входящих высокоинтенсивных потоков. В результате получена более точная, по сравнению с гауссовской, аппроксимация стационарного распределения вероятностей числа заявок в системе, что подтверждается численными экспериментами, представленными в пятой главе. Также представлен анализ СМО вида  $GI/PH/\infty$ , выполненный методом начальных моментов, который позволяет аналитически получить допредельные выражения для первых и вторых моментов числа заявок в системе с обслуживанием фазового типа.

В **третьей главе** представлены аналогичные исследования, выполненные для многофазных СМО. Выполнена модификация метода выделения первого скачка на случай анализа многомерного совместного распределения числа заявок, находящихся на обслуживании на фазах СМО с рекуррентным входящим потоком, а также разработан оригинальный метод многомерного динамического



просеивания, который позволяет выполнять исследование немарковских многофазных СМО и СеМО при любых типах входящих непуассоновских потоков. С помощью данного метода и модификации процедуры асимптотического анализа на случай высокой интенсивности входящего потока и многомерной модели СМО установлено, что асимптотическое стационарное распределение числа заявок на фазах многофазных СМО в условиях высокой интенсивности входящего потока является многомерным гауссовским. Параметры этого гауссовского распределения для каждого вида многофазной СМО также получены в разделах третьей главы. Также представлен анализ многофазной СМО с экспоненциальным обслуживанием, выполненный методом начальных моментов. Полученные аналитические допредельные выражения для начальных моментов для данного типа систем позволяют оценить область применимости полученных гауссовских аппроксимаций.

В четвертой главе представлено исследование сетей массового обслуживания с высокоинтенсивными входящими потоками, марковской маршрутизацией, неограниченным числом приборов и произвольным обслуживанием в узлах. Показано, что стационарное совместное распределение числа заявок в узлах сетей данного типа асимптотически является многомерным гауссовским. Получены параметры этого гауссовского распределения для сетей с различными типами входящих потоков. Исследование выполнено методом выделения первого скачка и методом многомерного динамического просеивания. Представлена методика расчета оптимального числа приборов в узлах сети, обеспечивающая уровень потерь заявок в сетях с отказами, не превышающий наперед заданную величину уровня информационной надежности. Изложены результаты применения процедуры асимптотического анализа третьего порядка для сетей обслуживания с различными типами входящих высокоинтенсивных потоков. В результате анализа получены более точные, по сравнению с гауссовскими, аппроксимации многомерного стационарного распределения вероятностей числа заявок в узлах сети. Выполнен анализ модели СеМО с

экспоненциальным обслуживанием, который позволяет аналитически получить допредельные выражения для начальных моментов состояний сети и оценить область применимости полученных в других разделах асимптотических результатов на основе сравнения моментов в допредельном и асимптотическом случаях.

**В пятой главе** представлен численный анализ области применимости результатов, полученных в предыдущих главах диссертации. Анализ произведен на основе вычисления расстояний Колмогорова между распределениями вероятностей, построенными на основе асимптотических аппроксимаций, и эмпирическими распределениями, полученными на основе имитационного моделирования соответствующих систем и сетей. Кроме того, для моделей с экспоненциальным обслуживанием и обслуживанием фазового типа проведено сравнение асимптотических дисперсий с их допредельными значениями, а для задачи определения оптимального числа приборов с использованием имитационного моделирования выполнен анализ относительных частот отказов в моделях с ограниченным числом приборов.

**В шестой главе** представлено описание разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ и алгоритмов моделирования процессов массового обслуживания. Программный комплекс включает в себя приложение для имитационного моделирования систем и сетей обслуживания, а также алгоритмы расчета характеристик их функционирования на основе полученных в диссертации теоретических результатов. Приложение для имитационного моделирования реализовано на основе разработанной объектной модели и в соответствии с предлагаемой в работе архитектурой приложений с расширяемой элементной базой предметной области.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

**Научная новизна работы.** Диссертация содержит новые научные результаты в области разработки методов исследования немарковских моделей

массового обслуживания, в том числе – многомерных моделей, таких как многофазные СМО и сети обслуживания. Отличие от ранее известных результатов заключается в следующем:

- предложены математические модели высокоинтенсивных непуассоновских случайных потоков событий (рекуррентный, МАР, полумарковский потоки) и построенные на их основе модели систем и сетей обслуживания с входящими высокоинтенсивными потоками;

- впервые в теории массового обслуживания разработан метод многомерного динамического просеивания, позволяющий выполнять исследование многофазных систем и сетей массового обслуживания с непуассоновскими входящими потоками, неограниченным числом приборов и неэкспоненциальным обслуживанием в узлах;

- разработана модификация метода выделения первого скачка на случай анализа многофазных СМО и сетей обслуживания с рекуррентными входящими потоками;

- разработана модификация метода асимптотического анализа для применения в исследовании моделей с высокоинтенсивными входящими потоками, в том числе – многомерных моделей массового обслуживания;

- с использованием разработанных методов и модификаций получены выражения для стационарных асимптотических распределений вероятностей числа заявок в системах с неограниченным числом приборов, неэкспоненциальным обслуживанием и различными типами входящих высокоинтенсивных непуассоновских потоков;

- для многофазных СМО с неограниченным числом приборов, неэкспоненциальным обслуживанием и различными типами входящих высокоинтенсивных непуассоновских потоков с использованием разработанных методов и модификаций получены выражения для многомерных стационарных асимптотических распределений вероятностей числа заявок на фазах системы;



- для сетей обслуживания с марковской маршрутизацией, неограниченным числом приборов, неэкспоненциальным обслуживанием и различными типами входящих высокоинтенсивных непуассоновских потоков с использованием разработанных методов и модификаций получены выражения для многомерных стационарных асимптотических распределений вероятностей числа заявок в узлах сети;

- предложена оригинальная методика расчета оптимального числа приборов в узлах сетей обслуживания с конечным числом каналов на основе результатов анализа моделей сетей с неограниченным числом приборов в узлах;

- разработан комплекс проблемно-ориентированных программ и алгоритмов для численного анализа и имитационного моделирования сетей обслуживания с неограниченным числом приборов, с помощью которого установлена область применимости полученных асимптотических результатов.

**Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается математически корректными выводами и доказательствами теорем, представленными в работе, согласованностью результатов, полученных для разных моделей между собой и с известными в теории массового обслуживания результатами, а также многочисленными экспериментами с применением имитационного моделирования и численного анализа.

**Значимость полученных автором диссертации результатов для развития теории массового обслуживания.** Разработанный в диссертации Моисеевым А.Н. метод многомерного динамического просеивания позволяет проводить анализ многомерных немарковских моделей массового обслуживания, таких как многофазные СМО и СеМО с непуассоновскими входящими потоками и неэкспоненциальным обслуживанием в узлах, что открывает новые перспективы в исследовании немарковских моделей обслуживания с неограниченным числом приборов, анализ которых ранее представлялся невозможным. Предложенные в диссертации модели высокоинтенсивных потоков событий, построенные на их основе модели СМО и СеМО, модификации методов выделения первого скачка и

асимптотического анализа позволяют формулировать и решать задачи научных исследований для нового класса моделей массового обслуживания.

**Практическая значимость результатов работы.** Разработанные автором в диссертационном исследовании методы и модификации методов, а также полученные с их помощью конкретные формулы позволяют производить анализ и расчет характеристик реальных технических систем, адекватными моделями которых являются системы и сети массового обслуживания. Кроме того, предложенная в диссертации Моисеевым А.Н. методика расчета оптимального числа приборов является практически важным, математически обоснованным способом расчета мощностей вычислительных узлов при проектировании распределенных вычислительных систем. Разработанный автором комплекс проблемно-ориентированных программ и алгоритмов моделирования процессов массового обслуживания может использоваться для выполнения расчетов соответствующих характеристик реальных систем.

**Полнота опубликования научных результатов и апробация.** По материалам диссертации выполнено 49 научных публикаций, в том числе 18 статей 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, и в журналах, включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus, издано 2 монографии, получены 2 свидетельства о регистрации программных продуктов, опубликовано 27 работ в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций. Результаты работы докладывались на 21 научной конференции международного и всероссийского уровня. Все материалы диссертационного исследования достаточно полно отражены в опубликованных работах.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертации не объяснено, какой смысл имеет ограничение (2.40) и насколько сильно оно сужает область применимости результатов теоремы 2.5.



2. Основную формулу (3.23) метода многомерного динамического просеивания следовало бы оформить в виде теоремы.

3. Было бы желательно привести примеры применения разработанных математических моделей и методов для конкретных прикладных систем.

4. В шестой главе недостаточно описаны элементы приложения, моделирующих случайные величины, процессы и потоки случайных событий.

5. Было бы логично асимптотический анализ третьего порядка, выполненный во второй и четвертой главах диссертации, провести также и для моделей, представленных в первой и третьей главах.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Моисеева А.Н., в которой решена актуальная научная проблема разработки методов исследования математических моделей немарковских систем и сетей массового обслуживания с высокоинтенсивными непуассоновскими входящими потоками, неэкспоненциальным обслуживанием и неограниченным числом приборов в узлах.

**Общее заключение.** Диссертационная работа Моисеева А. Н. является законченной научно-исследовательской работой, посвященной актуальной научной проблеме, отличается научной новизной и практической значимостью полученных результатов. Достоверность результатов работы не вызывает сомнений, сами результаты достаточно полно опубликованы и апробированы. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. По своему содержанию диссертация полностью соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Таким образом, считаем, что диссертация Александра Николаевича Моисеева «Исследование математических моделей систем и сетей массового обслуживания с высокоинтенсивными непуассоновскими входящими потоками» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от

24 сентября 2013 г. № 842, и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым 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, Моисеев Александр Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв составил заведующий лабораторией №17 автоматизированных систем массового обслуживания и обработки сигналов Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, доктор технических наук Фархадов Маис Паша оглы. Отзыв обсужден и одобрен на расширенном семинаре лабораторий № 6, 16, 17, 21, 44, 68, 69 Института проблем управления РАН, протокол №3 от 02 марта 2016 г.

Заведующий лабораторией автоматизированных систем массового обслуживания и обработки сигналов ИПУ РАН, доктор технических наук (специальность 05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети)

Фархадов М.П.

04.03.2016 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)