

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию РАЗУМЧИКА Ростислава Валерьевича

«Методы анализа и алгоритмы управления частично наблюдаемыми стохастическими системами обслуживания», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

### **Актуальность темы исследования**

Современные системы компьютерной обработки информации, такие как распределенные вычислительные сети и суперкомпьютеры, являются сложными объектами, в которых десятки протоколов служат единственной цели — обеспечению работы на заданном уровне качества обслуживания. Жизненно важно здесь научиться максимально эффективно использовать доступные ресурсы. И это непросто, поскольку зачастую увеличение числа и мощности ресурсов может и не привести к росту производительности системы, то есть, числа выполняемых заданий в единицу времени.

Не вдаваясь в технические подробности, допустимо считать такие системы набором обслуживающих ресурсов (серверов, процессоров), на которые поступают заявки на выполнение заданий. Имеется большое количество исследований методов прогнозирования и оптимизации использования доступных ресурсов. Однако, по мере появления и внедрения более современных технологий, информационные системы приобретают новые особенности, не позволяющие сводить их анализ к уже известным теоретическим моделям.

Одной из таких особенностей, служащей источником всевозможных проблем, является частичная наблюдаемость системы. В большой функционирующей сети актуальная информация о состоянии узлов может мгновенно устаревать, а процедура сбора такой информации сама увеличивает нагрузку на информационную систему. Сложность и дороговизна процесса разработки, создания и эксплуатации современных систем с частичной наблюдаемостью заставляют искать способы повышения их эффективности и снижения затрат, в том числе с опорой на методы математического моделирования. В связи с этим получение здесь новых фундаментальных результатов представляется актуальным и важным направлением научных исследований, в котором необходим постоянный прогресс.

Диссертация Р.В. Разумчика посвящена исследованию системных связей и закономерностей функционирования частично наблюдаемых стохастических управляющих систем массового обслуживания (СМО), ориентированных на повышение эффективности их эксплуатации. Здесь развиваются, во-первых, методы анализа функционирующих изолированно друг от друга и частично наблюдаемых СМО, в которых недоступны для наблюдения принципиально важные для качественного управления системой сведения. Указанные методы восходят к работам Г.П. Климова, А.Д. Соловьева, А.В. Печинкина и др. в теории массового обслуживания (ТМО) по специальным дисциплинам обслуживания. Во-вторых, большое внимание уделяется вопросу централизованного управления входящими потоками в стохастических системах с параллельным обслуживанием при полной недоступности динамической информации об их состоянии. Перспективность предложенных в диссертации решений подтверждается модельными примерами.

## Характеристика работы

На языке кибернетики можно сказать, что объединяющей моделью для всей диссертации служит цепочка из субъекта и частично наблюдаемого объекта, в которой отсутствует обратная связь. На основе анализа публикаций об опыте эксплуатации современных крупных вычислительных центров диссертант сфокусировал внимание на двух трактовках частичной наблюдаемости. В первом случае частичная наблюдаемость понимается так, что субъект не имеет точной информации об одном или нескольких исходных параметрах объекта. Во втором случае субъект, имея целью достижение определенных свойств у траекторий величин, связанных с объектом, и имея возможность воздействия на объект, вынужден выбирать воздействия, не имея откликов объекта. Эти две трактовки приводят к логичному делению основного текста диссертации на две части.

Перейдем теперь к поглавному обсуждению диссертации. Во Введении приводится краткое изложение основного содержания диссертации. Приведенный здесь материал дает читателю достаточно полноценное представление о решаемой проблеме, о пользе результатов для теории и практики, о методах исследования и пр. Если какие-то результаты являются новыми, то автор отмечает их отличие от известных в литературе и дает ссылки. В ходе обзора автор старается отмечать взаимосвязь появляющихся конструкций с известными в литературе, часто пользуясь ссылками на литературу и сносками.

В главе 1 диссертации вводит и исследует новое семейство вероятностных моделей в виде систем массового обслуживания. Данное семейство, при указанных автором условиях, может быть приспособлено для анализа частично наблюдаемых СМО, в которых фактические времена обслуживания заявок не становятся известными ни в момент поступления в систему, ни в момент начала обслуживания. Для планировщика доступны лишь их прогнозные значения. Этот результат является одним из центральных результатов диссертации. Если рассматривать результаты главы 1 отвлеченно, то они связаны с развитием аналитического аппарата анализа стационарных характеристик ранее не изучавшихся классов СМО инверсионного типа. Автором расширена область применения специальной методики (по-видимому впервые предложенной А.В. Печинкиным) на новый класс СМО, допускающих не сохраняющее работу (т.е. неконсервативное) обслуживание. Эта методика основана на удалении из рассмотрения интервалов времени, на которых процесс, описывающий функционирование системы, находится в специальном образом выбранном множестве состояний; оставшиеся части процесса состыкуются.

В главе 2 предложен и обоснован новый метод анализа частично наблюдаемых СМО. Данный метод сводится к сравнению значений стационарных вероятностно-временных характеристик, которые могут быть рассчитаны по имеющимся данным, с характеристиками вспомогательных СМО. Автор показывает, что при определенных условиях (например, когда убывает функция интенсивности  $B'(x)/(1-B(x))$  распределения  $B(x)$  для прогнозных времен обслуживания) из данных можно извлечь новую информацию, заменяя исходную систему новой — одной из класса, предложенного в главе 1. Например, применение развитой в главе 1 теории к СМО типа M/G/1-PS позволяет провести точные вычисления при таком переходе и этим доказать обосновать приемлемость получаемых оценок. Представленные при этом результаты численного анализа позволяют надеяться, что предложенный

метод будет пригоден для весьма широкого класса частично наблюдаемых СМО, включая и системы с непуассоновским входящим потоком. Также вызывает интерес то, что полученные в этой главе результаты содержат новый пример неконсервативных СМО, близких к классическим системам с дисциплиной справедливого разделения процессора.

В главах 3 и 4 диссертации внимание сосредоточено на СМО с несколькими параллельно работающими узлами. При этом каждое поступающее требование направляется в очередь ожидания через центрального «диспетчера». При этом, диспетчер не имеет актуальной информации о степени занятости каждого узла. В связи с этим, автор предлагает использовать стратегию управления типа «диспетчеризацией по предыстории». Предлагается новый алгоритм диспетчеризации, проводится сравнение с известными ранее алгоритмами. На ряде вычислительных экспериментов демонстрируется, что использование нового алгоритма способно повысить эффективность использования вычислительных ресурсов. Всего автором предложено три метода для создания квазиоптимальных алгоритмов диспетчеризации: аналитический, аналитико-имитационный и эвристический. Первые два приводят к равномерно наилучшим стратегиям при любой загрузке в сравнении с ранее известными из научной литературы; последний — к стратегиям, превосходящим известные в области низкой загрузки. Последнее обстоятельство полностью компенсируется вычислительной простотой и легкой, по сравнению с известными алгоритмами, масштабируемостью решения. В итоге, результаты глав 3 и 4 дают основание утверждать, что диспетчеризацию по предыстории можно рекомендовать для повышения качества управления рассматриваемыми частично наблюдаемыми стохастическими системами с параллельным обслуживанием.

В Заключении автор резюмирует итоги работы и формулирует несколько вопросов, на которые следует обратить первоочередное внимание при продолжении исследований. Язык и стиль изложения материала, в целом, соответствует уровню квалификационной научной работы. Требования ВАК к оформлению диссертаций выполнены. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

### **Характеристика результатов (новизна, достоверность и обоснованность)**

В диссертации строго используются методы теории вероятностей и случайных процессов, методы стохастического упорядочивания распределений вероятностей, методы классического математического анализа и матричной алгебры, теории интегральных преобразований, статистического имитационного моделирования. Этим обеспечивается достоверность полученных выводов и рекомендаций.

В диссертации получены следующие *основные* новые результаты:

- Введение и анализ новых моделей неконсервативных систем массового обслуживания инверсионного типа.
- Применение специальных дисциплин обслуживания для уточнения значений характеристик качества функционирования частично наблюдаемых систем массового обслуживания.
- Формулировка и обоснование нового метода повышения эффективности диспетчеризаций, не требующего изменений структуры и состава системы массового обслуживания.

Научные положения диссертации обоснованы в достаточной мере. Основные результаты диссертации докладывались на крупных конференциях по тематике исследования. Кроме того, предложенные в диссертации методы применялись для аналитического исследования ряда стохастических систем, разрабатываемых в рамках проекта 075–15–2020–799 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Методы построения и моделирования сложных систем на основе интеллектуальных и суперкомпьютерных технологий, направленные на преодоление больших вызовов».

Материалы диссертации опубликованы в 27 печатных работах, из которых 14 — в журналах из перечня ВАК. Вклад Р.В. Разумчика в работы, выполненные в соавторстве, отмечен в автореферате и диссертации правильно, и является определяющим.

### Замечания по работе

По диссертации имеются следующие замечания.

1. На стр. 38 делается предположение, что функции  $D(x, y|u, v)$ ,  $D^*(x, y|u, v)$ ,  $D_0(x|u, v)$ ,  $D_0^*(y|u, v)$ ,  $D(y|u, v)$  и  $D_0(u, v)$ , отвечающие за длительности обслуживания требований, имеют непрерывные ограниченные плотности (по переменным  $x$  и  $y$ ). Поскольку эти плотности зависят от нескольких переменных, неясно, предполагается ли непрерывность по некоторым переменным (например, только по  $x$  и  $y$ ) или по всем. Заметим, что некоторые популярные в теории массового обслуживания распределения (экспоненциальное, равномерное) имеют разрывные плотности (разрывы на концах диапазона значений). Исключены ли такие распределения из рассмотрения?
2. В формулировке теоремы 1 на стр. 41 не ясно, по какой переменной берется производная в записи  $p'_k(x_1, \dots, x_k)$  и  $q'_n(x_1, \dots, x_n)$ , а в формуле (1.3) переменная  $k$  должна начинаться со значения 2 (т.е., следовало писать  $2 \leq k \leq n-1$ ), так как уравнение (1.3) при  $k = 1$  не совпадает с уравнением (1.2). Аналогично, в равенстве (3.6)  $k$  должно начинаться с 1, а не с 0.
3. На стр. 44 в формуле для  $p_1(a)$  порядок дифференциалов должен быть  $dx du dv$ , а не  $du dv dx$ .
4. Хочется отметить необычное для математики определение подмножества  $\mathfrak{M}^*$ . Обычно, при определении принадлежности элемента множеству временной фактор исключают, то есть в любой момент времени должно быть возможно однозначно дать один и тот же ответ (либо «принадлежит», либо «не принадлежит»). Здесь же добавлено условие, что СМО принадлежит  $\mathfrak{M}^*$ , если найдется вероятностно-временная характеристика, для которой известны условия существования стационарного распределения. То есть, факт принадлежности к  $\mathfrak{M}^*$  определяется общим прогрессом науки и может менять статус с «не принадлежит» на «принадлежит» по мере выхода новых научных публикаций.
5. В разделе 2.2 на стр. 110 ведется обсуждение дисциплины LIFO GPP и имеется ссылка на теорему 3. Однако в теореме 3 рассматривалась дисциплина LIFO Re. Следовало пояснить, почему здесь можно применять теорему 3.

6. На стр. 119 при доказательстве того, что  $\Psi^{(1)}(s)$  является преобразованием Лапласа–Стилтьеса, используется ссылка на теорему Бохнера–Хинчина в формулировке из учебника «Курс теории вероятностей» Б.В. Гнеденко. Теорема Бохнера–Хинчина применяется для характеристики характеристических функций, а не преобразований Лапласа–Стилтьеса. Следовало пояснить, как свести один вопрос к другому, или следовало воспользоваться другими критериями, например, критерием С.Н. Бенштейна.
7. На стр. 135–136 сначала используется математическое ожидание  $EW_{n+1}^{(m)}$  в формуле (3.2), а только абзацем ниже говорится, что это *условное* математическое ожидание. В научной литературе используется обозначение для условного математического ожидания в виде  $E(W_{n+1}^{(m)}|\cdot)$ , где после вертикальной черты указывается событие, определяющее условие. В частности, разные события-условия могут приводить к разным значениям математического ожидания. Такая невнимательность к обозначениям привела к тому, что, во-первых, вводимая далее вероятность  $w_n^{(m)}(k) = P\{\tilde{W}_n^{(m)} = k\Delta\}$ , по виду абсолютная (безусловная), должна трактоваться всё-таки как условная (в тексте об этом ничего не сказано). Но условие на стр. 135 не дает применить формулу полной вероятности так, чтобы получились соотношения (3.5) и (3.6). Следовательно, это какая-то новая условная вероятность? Какая? Во-вторых, при педантичной записи переход от предпоследней вынесенной формулы на стр. 136 к последней формуле на этой странице, оказывается, что в правой части появляется условное математическое ожидание  $E(W_n^{(m)}|\cdot)$  с иным (избыточным) набором зафиксированных значений входных случайных величин (туда будет входить  $t_{n+1}$ ), чем это предполагалось при определении символа  $EW_n^{(m)}$ . Наконец, при определении условного математического ожидания и условной вероятности обычно фиксируют значения случайных величин, так как они порождают события. Как понимать условное математическое ожидание относительно «распределения размеров первых  $n$  заданий»? Распределение вероятностей — это не событие и не случайная величина.
8. При описании реализации вычислительных экспериментов в главах 3, 4 отсутствует разъяснение, как именно оценивалось стандартное отклонение для таблиц 10 (стр. 181), 22 (стр. 204), 24 (стр. 205) и др. Известно, что применение формулы выборочной дисперсии для зависимых наблюдений может давать существенную погрешность из-за неучета корреляционных связей между разными членами в одном временном ряде.
9. Иногда встречаются обозначения, не введенные ранее. Так, на стр. 70 используется не определенная ранее переменная  $P_k^{(1)}$ . Также в тексте имеется незначительное количество опечаток: «насколько» вместо «настолько» (стр. 21, 6-я строка сверху), «заявки» вместо «заявке» (стр. 37, 8-я строка сверху), на стр. 70 в 6-й строке сверху имеются лишние аргументы в записи  $P_k^{(i, y_2, \dots, y_k)}(x_1, \dots, x_k)(x, \infty, \dots, \infty)$ , в списке литературы в пункте [399] написано «augvey» вместо «survey».

## Заключение

Сделанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Р.В. Разумчика является законченной научно-квалификационной работой, в ко-

торой решена фундаментальная научная проблема разработки комплекса вероятностных моделей и создания на их основе методов анализа и алгоритмов управления для стохастических систем обслуживания с частичной наблюдаемостью. Работа выполнена на высоком уровне, имеет теоретическую и практическую ценность.

С учетом вышесказанного, диссертация Р.В. Разумчика «Методы анализа и алгоритмы управления частично наблюдаемыми стохастическими системами обслуживания» полностью соответствует требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1 — Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Считаю, что Р.В. Разумчик заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент

заведующий кафедрой теории вероятностей и  
анализа данных федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,  
доктор физико-математических наук (специальность  
01.01.05 – теория вероятностей и математическая  
статистика), доцент по кафедре прикладной  
теории вероятностей  
Зорин Андрей Владимирович

17.11.2022

 /А. В. Зорин/



Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,  
Телефон: (831) 462-30-85, E-mail: unn@unn.ru