

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию ИВАНОВА Сергея Валерьевича на тему «Выборочные методы дискретизации иерархических стохастических моделей с вероятностными критериями», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»

Диссертационная работа посвящена математическому моделированию сложных стохастических иерархических систем с учетом вероятностных критериев качества и их анализу с помощью статистических методов.

**Актуальность избранной темы диссертации.** Моделирование сложных иерархических систем требует учета как сложных отношений подчинения между моделируемыми подсистемами, так и случайных и неопределенных факторов, влияющих на их функционирование. Естественным аппаратом для математического моделирования таких систем выступают двухуровневые и многоуровневые задачи в стохастической постановке. В большинстве известных работ по данной тематике учет случайностей ограничивается использованием в оптимизационной модели критериальной функции в форме математического ожидания. Однако данный подход не позволяет в полной мере учесть требования к надежности функционирования системы. В стохастическом программировании известны подходы к обеспечению требований надежности, состоящие в использовании критериальных функций в форме вероятности и квантили. Исследование двухуровневых и других стохастических моделей с вероятностными критериями является актуальной и важной задачей математического моделирования и системного анализа.

Задачи, связанные с разработкой выборочных методов дискретизации стохастических моделей актуальны по двум причинам. Во-первых, в последние годы разработан мощный математический аппарат сведения оптимизационных моделей с вероятностным и квантильным критериями при дискретном распределении случайных факторов к детерминированным задачам оптимизации, в которых содержатся и вещественные, и целочисленные переменные. Данные задачи (особенно в линейном случае) могут быть успешно решены с помощью специальных программных средств. Поэтому обоснование возможности замены непрерывного распределения дискретным в указанных моделях становится особенно актуальным. Во-вторых, данный подход позволяет при неизвестном распределении случайных факторов рассматри-

вать задачу формирования оптимальной стратегии как статистическую задачу оценивания оптимальной стратегии в стохастической модели на основе выборки. Это существенно отличается от классического подхода, принятого в стохастической оптимизации, при котором считается, что оптимальная стратегия ищется в предположении, что распределение случайных факторов известно. Свойства статистических оценок в моделях с вероятностным и квантильным критериями к настоящему времени изучены недостаточно.

По указанным выше причинам диссертационная работа С.В. Иванова представляет как теоретический, так и практический интерес и, безусловно, является актуальной.

**Оценка содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, который включает 218 наименований. Диссертация представлена на 255 страницах. Содержание представленной работы достаточно точно соответствует теме исследования.

Во *введении* обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и основные задачи работы, описываются методы исследования, приводится краткое содержание по главам, а также излагаются положения работы, выносимые на защиту.

В *первой главе* приводится описание построения математических моделей сложных систем. Рассмотрена двухэтапная модель принятия решения, которая возникает в ситуации, когда имеется возможность наблюдения реализаций случайных параметров в ходе её функционирования, и при этом имеется возможность принять дополнительное решение. Приводятся два способа описания качества функционирования системы: посредством функции вероятности и посредством функции квантили. Рассмотрены линейные двухэтапные модели, двухуровневые модели с асимметричной и симметричной информацией. В заключении формулируется двухуровневая модель конкурентного размещения предприятия.

*Вторая глава* посвящена обоснованию процедуры дискретизации вероятностных мер в изучаемых моделях. Рассмотрен общий подход к дискретизации вероятностной меры, основанный на приближении случайных величин, присутствующих в модели, сходящейся последовательностью случайных величин. Для некоторых классов задач доказывается сходимости получаемой при данной аппроксимации последовательности решений. Рассмотрены модели с симметричным распределением и с монотонными функциями потерь.

В *третьей главе* разрабатываются и обосновываются численные методы синтеза оптимальных стратегий в стохастических моделях с вероятностными критериями.



В *четвертой главе* рассматриваются методы построения так называемых доверительных множеств поглощения в стохастических системах. Под доверительным множеством поглощения понимается множество начальных состояний системы, обеспечивающих требуемое положение системы в терминальный момент времени. Показано, что задача построения множества поглощения аналогична построению множества уровня функции вероятности.

В *пятой главе* приводятся описание и апробация программного комплекса, который был специально разработан для решения задач на основе выборочных методов в задачах стохастического программирования.

**Новизна проведенных исследований и полученных результатов.** Принципиальный вклад в развитие теории стохастического программирования состоит в том, что в работе предложен общий подход к моделированию двухуровневых и двухэтапных стохастических систем с вероятностным и квантильным критериями. Ранее подобные модели формулировались лишь в некоторых достаточно частных постановках.

В соответствии с этим в диссертации, в частности, получены следующие *основные* новые научные результаты:

- доказан ряд теорем о сходимости выборочных аппроксимаций различных постановок стохастических иерархических задач;
- для одноэтапных задач стохастического программирования с вероятностным и квантильным критерием доказано, что имеет место сходимость выборочных аппроксимаций при минимальных предположениях о функциях, описывающих постановку задачи (требуется лишь их полунепрерывность и измеримость);
- разработан ряд новых алгоритмов и численных методов решения стохастических задач с вероятностными критериями;
- предложены новые методы построения так называемых доверительных множеств поглощения, что является важной задачей при анализе стохастических систем. Показано также, что эта задача аналогична построению множеств уровня функции вероятности;
- на основе разработанных в диссертации методов решен ряд практических задач. В частности, построено множество допустимых скоростей ветра в районе аэродрома, гарантирующих безопасную посадку, которое улучшает внутреннюю аппроксимацию данного множества, известную ранее;
- для одноэтапных, двухэтапных и двухуровневых задач стохастического программирования реализован комплекс программ для отыскания оптимальных и субоптимальных решений.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Все выводы и рекомендации, приведенные в диссертационной работе, строго обоснованы. Выбранный математический аппарат для построения моделей стохастических систем является логичным и естественным, что подтверждается многочисленными прикладными моделями, разработанными ранее и успешно примененными для анализа различных экономических и технических систем.

Достоверность результатов основана на корректности математических постановок исследуемых проблем, а также на строгих доказательствах всех утверждений. Достоверность теоретических результатов подтверждается также результатами компьютерного моделирования.

**Значимость для науки и практики полученных результатов.** Полученные в диссертации результаты, а также доказанные теоремы, вносят заметный вклад в теорию стохастического программирования и позволяют в более широком контексте посмотреть на теорию и практику решения двухуровневых и двухэтапных задач с вероятностными критериями.

Практическая значимость результатов работы связана с возможностью применения разработанных методов для математического моделирования экономических и технических систем. С помощью предложенных методов решены, в частности:

- задача оптимизации площади взлётно-посадочной полосы;
- задача прогнозирования скорости ветра в районе аэродрома.

Разработан ряд моделей конкретных прикладных систем, включая:

- модель планирования производства;
- модель распределения инвестиций в энергосберегающие проекты;
- модель определения налоговой ставки;
- модель размещения предприятий.

Для практики особую значимость приобретает разработанный и описанный в диссертационной работе комплекс программ, который позволяет синтезировать оптимальные стратегии в разработанных математических моделях с учётом характеристик моделируемых систем и на основе статистических данных об их функционировании в прошлом.

**Автореферат** полностью соответствует диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы в период с 2013 по 2020 годы многократно докладывались и обсуждались на многих Международных и Всероссийских научных конфе-



ренциях и семинарах. Исследования по теме диссертации поддержаны шестью грантами основных научных фондов Российской Федерации.

Результаты диссертации в полной мере отражены также в 30 научных работах, в числе которых 15 научных работ опубликованы в изданиях, включенных в системы цитирования Web of Science и Scopus. Соискателем получены в том числе два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Недостатки и замечания по диссертационной работе.** Необходимо отметить некоторые недостатки работы и сделать ряд замечаний. К замечаниям общего характера можно отнести следующие.

1. Название диссертации носит более широкий смысл, чем собственно ее содержание. Это предствляет не совсем оправданным, поскольку позволяет предполагать, что диссертация посвящена исследованию произвольных иерархических стохастических систем, в то время как предметом исследования являются одноэтапные, двухэтапные и двухуровневые системы, которые являются частным случаем иерархических систем.

2. Второе замечание относится ко всем разработанным в диссертации алгоритмам поиска оптимальных решений. Поскольку алгоритмы синтеза оптимальных стратегий в стохастических системах во многих случаях связаны с большим объемом вычислений, особенно, если это связано с невыпуклыми функциями и областями, то следовало бы привести априорные оценки сложности этих алгоритмов, зависящие от основных параметров, характеризующих размерность решаемых задач. При этом желательно, чтобы были оценки как временной, так и емкостной сложности.

Далее – замечания более частного характера.

3. Ключевым понятием при построении моделей в диссертации является абстрактно вводимая функция потерь, принимающая значения из расширенной действительной области (включающей по определению и бесконечные значения). Из текста не совсем понятно, в каких случаях функция потерь может принимать отрицательные значения (как, например, в модели планирования производства), и значения равные отрицательной бесконечности. Тем более что последний случай особо исследуется, в частности, в лемме 1.1.

По этой причине в работе следовало уделить больше внимания практическому смыслу учета бесконечных значений функции потерь в двухэтапных и двухуровневых задачах.

4. Судя по смыслу, выбор типа применяемого критерия зависит от физического содержания решаемой задачи, а также от предпочтений лица, принимающего решение. Тем не менее, было бы весьма интересно, если бы в

диссертации были приведены хотя бы общие соображения относительно того, в каком случае следует выбирать вероятностный критерий, а в каком – квантильный. Хорошо, если бы этому вопросу был посвящен хотя бы небольшой, но отдельный раздел диссертации. Это, безусловно, сделало бы диссертацию более ориентированной на практическое использование.

5. В задачах иерархической оптимизации и многих задачах оптимального управления, в частности, управления нелинейными системами, как правило, возникают невыпуклые структуры (функции управления, ограничения, области определения). К таким задачам зачастую невозможно применять стандартные методы оптимизации, поскольку не всегда может быть найден глобальный экстремум, а могут получаться решения вообще далекие от оптимальности. Методы решения таких задач сложны как с содержательной, так и с вычислительной точек зрения.

Соискатель это, безусловно, понимает, многие результаты формулируются в предположении выпуклости штрафных функций, а также областей. В тех случаях, когда может появляться невыпуклость, в диссертации приводятся соответствующие комментарии (стр. 42, 71, ..., 195, 226, 228). Однако вопросы, связанные с решением задач невыпуклой оптимизации, остаются в основном вне рассмотрения, что не критично, но несколько снижает качество проведенных исследований.

6. При моделировании с помощью комплекса программ, реализующих разработанные методы (Глава 5), используются выборки очень большого объема. Вместе с тем непонятно, какими могут быть результаты при решении реальных задач, когда такие выборки получить невозможно?

Ряд замечаний относится к форме изложения результатов и обнаруженным техническим ошибкам диссертационной работы.

7. Некоторым методическим недостатком работы является то, что зачастую при изложении сначала используется термин или обозначение, и только затем дается его определение.

8. При изложении математических результатов диссертации встречается очень много различных, но близких по смыслу математических объектов со схожими обозначениями. Это усложняет чтение диссертации, поскольку трудно запомнить их содержательный смысл.

9. В выражениях (1.3) используются одновременно и супремум, и максимум функции вероятности. Аналогичное замечание относится и к выражениям (1.5).

10. На стр. 112 делается ссылка на Предположение 1.1, сформулированное в разделе 1.2.1. Однако в этом разделе такого предположения нет.



11. Одной и той же буквой  $\chi$  обозначается характеристическая функция (везде по тексту) и в то же время штрафная функция (стр. 139).

12. В тексте диссертации иногда встречаются математические объекты, которые не были должным образом определены. Например,

– на стр. 124 появляется параметр  $t$ , который не был определен ранее;

– на стр. 184 не определена функция  $\tilde{\Phi}(z)$ ;

– на стр. 185 используется функция  $\hat{\Phi}(\bar{y}, \beta, x)$ , которая также не определена явно. Однако по смыслу можно понять, что это функция потерь, записанная в многомерной сферической системе координат. Вместе с тем, для большей ясности перед формулировкой теоремы 4.5 о квазивыпуклости этой функции следовало бы предварительно дать интерпретацию понятия квазивыпуклости в сферической системе.

13. Диссертация написана корректно и грамотно. Однако имеется значительное число опечаток и синтаксических ошибок (например, на стр. 8, 9, 12, 14, 22, 27, 28, 30, 31, 45, 59, 71, 75, 89, 122, 137, 142, 164, 208, 225, 226). Встречаются повторы либо отсутствие слов и выражений (стр. 19, 34, 67, 125, 129, 186).

14. Имеются опечатки в математических выражениях и формулах:

стр. 35. В 7-й строке должно быть равенство вместо нестрогого неравенства;

стр. 38. В Следствии 1.1 ошибочно написано «... максимизации функции квантили ...» в то время как должно быть «... максимизации функции вероятности ...»;

стр. 87, 91. В нескольких формулах записано  $u$  вместо  $s(u)$ ;

стр. 95. Пропущен индекс в формуле (2.32);

стр. 188. В выражении для  $\Phi(y, x)$  должна быть функция  $\min$  вместо  $\max$ .

стр. 51, 54, 118. Опечатки и пропуски в математических выражениях.

Указанные замечания в основном носят методический или технический характер, либо характер пожеланий, поэтому они ни в коей мере не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

**Соответствие диссертации паспортам научных специальностей.**  
Диссертация С.В. Иванова соответствует следующим областям исследований Паспорта научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
- развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей;
- реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
- разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Диссертация соответствует также как минимум следующим областям исследований Паспорта научной специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»:

- формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;
- разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;
- разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

**Общая оценка работы.** Представленная диссертация является завершённой научно-исследовательской и квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно. Работа написана на высоком научном уровне и включает в себя новые теоретические и методологические положения. Полученные в работе результаты можно квалифицировать как научное достижение в области стохастического программирования и моделирования сложных систем. Обоснованность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Все защищаемые автором положения диссертации имеют строгое обоснование и являются новыми. С.В. Иванов имеет достаточное количество публикаций по основным результатам диссертационной работы, в том числе в высокорейтинговых научных изданиях. Ценность работы состоит также в том, что соискатель не ограничился только теоретическими исследованиями, но разработал практические алгоритмы решения большого класса задач стохастического программирования.

Считаю, что по уровню научных и практических результатов диссертация «Выборочные методы дискретизации иерархических стохастических моделей с вероятностными критериями» удовлетворяет всем требованиям п. 9-



14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Иванов Сергей Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник  
НИИ робототехники и процессов управления  
Южного федерального университета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

КАРКИЩЕНКО  
Александр Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

Почтовый адрес: 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, д. 2.

Телефон: +7 863 437 16 94.

Эл. почта: [karkishalex@gmail.com](mailto:karkishalex@gmail.com)

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Личную подпись

ЗАВЕРЯЮ:

