



данных моделей, направленное на учёт случайностей, влияющих на функционирование этих систем.

Разработка выборочных методов анализа иерархических систем с вероятностными критериями актуальна как с практической, так и теоретической точки зрения. При построении стохастических моделей предполагается, что распределение случайных факторов известно, однако на практике, как правило, доступны лишь результаты наблюдений реализаций случайных факторов, в связи с чем возникает необходимость разработки выборочных методов анализа данных систем. Несмотря на практическую значимость данного метода, его обоснование в стохастических иерархических системах с вероятностными критериями качества в общей постановке ранее проведено не было.

### **Краткий анализ содержания работы**

Диссертация изложена на 255 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 218 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы, приводится обзор литературы, в сжатом виде излагается содержание диссертации и формулируются результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** описываются методы построения математических моделей стохастических иерархических систем с вероятностными критериями. Приведены различные постановки двухэтапных и двухуровневых моделей с вероятностным и квантильным критериями. Доказан ряд теорем о свойствах непрерывности и измеримости целевых функций в данных моделях. Доказана эквивалентность априорных и апостериорных постановок задач, обоснован доверительный метод в двухэтапных задачах. Предложен ряд моделей экономических систем: модели планирования производства, модель выбора энергосберегающих проектов, модель определения налоговой ставки и модель размещения предприятий.

**Во второй главе** предлагаются методы дискретизации вероятностной меры в стохастических одноэтапных, двухэтапных и двухуровневых моделях. Первым описывается метод, основанный на приближении случайных параметров последовательностью случайных величин, сходящейся по распределению. Корректность метода доказана для специального класса задач. Затем формулируется метод выборочных аппроксимаций в моделях с вероятностными критериями, являющийся основным результатом диссертации. Доказывается ряд теорем о сходимости метода при его использовании в одноэтапных, двухэтапных и двухуровневых моделях. При некоторых предположениях получен достаточный объём выборки для построения дискретизации модели.

**В третьей главе** разрабатываются методы и алгоритмы решения задачи синтеза оптимальной стратегии в изучаемых моделях стохастических иерархических систем. Для ряда построенных дискретизаций моделей задача синтеза оптимальной стратегии сводится к задаче класса смешанного целочисленного программирования. Доказаны теоремы, обеспечивающие данное сведение. Предложен численный метод решения задачи с квантильным критерием и сепарабельной функцией потерь, основанный на дискретизации вероятностной

меры и поиске с чередующимися окрестностями. На основе предложенного численного метода разработаны алгоритмы решения одноэтапных и двухэтапных линейных и билинейных задач с квантильным критерием.

**Четвёртая глава** посвящена численным методам построения доверительного множества поглощения в стохастических системах, определяемого как множество начальных позиций системы, обеспечивающих требуемое терминальное состояние системы с заданной вероятностью. Данная задача аналогична построению множеств уровня функций вероятности и квантили в стохастических моделях. Предложен детерминированный и выборочный метод построения аппроксимаций доверительного множества поглощения. С помощью данных методов решена задача построения множества допустимых скоростей ветра в районе аэродрома. Также построены доверительные множества поглощения в двухэтапной модели планирования производства.

**В пятой главе** описывается разработанный программный комплекс, реализующий предложенные в работе алгоритмы и методы. Приведены результаты вычислительных экспериментов. С помощью разработанного программного комплекса решена задача оптимизации параметров взлетно-посадочных полосы.

**В заключении** формулируются итоги работы и предлагаются некоторые перспективные направления дальнейших исследований.

#### **Теоретическая значимость полученных результатов**

Основным новым научным достижением, представленным в диссертационной работе, следует считать разработку и обоснование выборочных методов анализа стохастических иерархических систем с вероятностными критериями.

В работе предложен новый подход к построению математических моделей стохастических иерархических систем. Ранее вероятностный и квантильный критерий при достаточно общих предположениях о свойствах системы не использовались. Разработан ряд новых математических моделей экономических систем. Доказаны новые теоремы об измеримости и непрерывности целевых и критериальных функций изучаемых моделей. Впервые доказана эквивалентность априорной и апостериорной постановки задач стохастического программирования с вероятностными критериями в нелинейной постановке. Доказана корректность доверительного метода в двухэтапных задачах с квантильным критерием.

Доказаны новые теоремы о сходимости выборочных аппроксимаций одноэтапных, двухэтапных и двухуровневых задач стохастического программирования с вероятностным и квантильным критериями. По сравнению с известными аналогами для задач стохастического программирования с критерием в форме математического ожидания и с вероятностными ограничениями, в данных теоремах предлагаются более общие условия сходимости. Определён объём выборки, при котором обеспечивается заданная точность решения задачи с заданной вероятностью.

Разработаны новые численные методы и алгоритмы решения одноэтапных и двухэтапных задач стохастического программирования с квантильным критерием. Алгоритмы основаны на построении выборочных аппроксимаций задачи. Достоинством данных методов является возможность постепенного увеличения точности аппроксимации задачи, при этом на каждом шаге синтезируется некоторое приближенное решение задачи.

Предложены новые методы построения доверительных множеств поглощения в стохастических системах. Данные методы позволяют значительно улучшить внутренние аппроксимации доверительных множеств поглощения, построенные с помощью известных методов.

### **Практическая значимость**

Практическое значение результатов работы иллюстрируется многочисленными прикладными моделями, разработанными и изученными в работе. В частности, описаны модели планирования производства, размещения предприятий, инвестирования проектов, определения налоговой ставки. С помощью алгоритмов и методов, предложенных в работе, были решены задачи из области авиационной и ракетно-космической техники. Получены решения задачи построения множества допустимых скоростей ветра в районе аэродрома и задачи определения параметров взлётно-посадочной полосы. Разработан программный комплекс, с помощью которого решены эти задачи и который может быть использован для анализа широкого класса стохастических иерархических моделей. Программный комплекс позволяет осуществлять синтез оптимальных стратегий в данных моделях на основе имеющихся статистических данных.

**Достоверность результатов диссертации** обеспечивается корректным использованием математических методов, доказательством теорем и подтверждением теоретических результатов вычислительными экспериментами.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Считаем целесообразным продолжить исследования по разработке методов алгоритмов анализа стохастических иерархических систем с вероятностными критериями.

Предложенные методы решения задачи определения допустимых скоростей ветра в районе аэродрома и задачи оптимизации параметров взлетно-посадочной полосы могут быть использованы на практике.

Результаты диссертации и разработанный программный комплекс можно рекомендовать для решения практических задач из технической и экономической сферы при оптимизации сложных иерархических систем, к которым предъявляются высокие требования к надёжности функционирования. Например, они могут быть использованы при планировании производства и инвестиций, оптимизации логистических схем.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте проблем управления РАН, Институте прикладной математики РАН, Институте динамики

систем и теории управления СО РАН, ФГУП ГКНПЦ им М.В.Хруничева, Институте космических исследований РАН, а также в других организациях и учебных заведениях, занимающихся вопросами теории моделирования и оптимизации сложных систем, в том числе многоуровневой и стохастической оптимизации.

#### **Замечание по диссертации**

Замена исходной исследуемой задачи, которая относится к выпуклому программированию, на задачу "смешанного линейно-целочисленного программирования" (СЛЦП) обсуждена в работе недостаточно полно. В то же время это центральная и достаточно неожиданная идея работы. В самом деле, задача СЛЦП это задача линейного программирования с обычными "непрерывными" переменными и булевыми (дискретными) переменными, входящими мультипликативно, в которой приходится искать глобальный минимум функции с большим числом локальных минимумов, в связи с чем эта задача внешне выглядит сложнее исходной. С другой стороны для СЛЦП разработано мощное программное обеспечение, основанное на эффективной комбинации симплекс-метода и метода ветвей и границ. Автор разработал метод сведения сложных задач квантильной оптимизации (или задач с вероятностными ограничениями) к задачам типа СЛЦП. В итоге вместо двухмерных/трехмерных задач автор может решать (хотя и с помощью внешнего программного обеспечения) задачи с 1000-1500 переменными. Это выглядит как весьма серьезный прогресс. Однако после чтения работы не остается четкого понимания, почему такие невыпуклые задачи можно успешно решать. Здесь можно провести параллель с полуопределенным программированием, но в этом случае ответом на вопрос об эффективности являются аналитические результаты Ю.Е. Нестерова и А.С. Немировского. Подобный ответ по отношению к подходу автора не просматривается.

Приведенное замечание не снижает достоинств работы, а скорее является рекомендацией к углублению исследований.

#### **Заключение**

Содержание диссертации соответствует автореферату и паспортам специальностей 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)».

Результаты работы представлены на ряде ведущих международных конференций и отражены в 28 публикациях, из которых 15 публикаций в журналах, индексируемых в международных системах цитирования Wos и Scopus, 2 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, а также в двух программах для ЭВМ.

Диссертация Иванова С.В. «Выборочные методы дискретизации иерархических стохастических моделей с вероятностными критериями» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук представляет

собой завершённую и целостную научно-квалификационную работу на актуальную тему. В работе получены новые научные результаты, обладающие высокой теоретической и практической значимостью, приведены строгие доказательства всех результатов. Продемонстрирована возможность применения разработанных методов и алгоритмов для решения прикладных задач из авиационной и ракетно-космической области, а также в области экономики. Совокупность полученных в работе результатов можно квалифицировать как научное достижение в области моделирования и анализа стохастических иерархических систем.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 и от 21 апреля 2016 года № 335, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Иванов Сергей Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 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)».

Доклад по материалам диссертации обсужден на заседании семинара кафедры «Прикладная математика» Арзамасского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Отзыв обсужден и согласован на заседании ученого совета Института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ им. Р.Е. Алексеева

« 8 » \_\_ сентября \_\_ 2020 г., протокол № 1.

Зав. кафедрой «Прикладная математика»  
АПИ НГТУ им. Р.Е. Алексеева  
д.ф.-м.н., профессор



Пакшин П.В.

Директор Института радиоэлектроники  
и информационных технологий  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д.т.н., доцент



Мякиньюков А.В.