

В диссертационный совет  
Д 212.125.04  
на базе Московского  
авиационного института

## ОТЗЫВ

**официального оппонента Чечкина Александра Витальевича на диссертационную работу Попкова Сергея Игоревича «МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

**Актуальность темы работы.** Диссертационная работа Попкова Сергея Игоревича посвящена применению теории марковских процессов для математического описания поведения вероятностных многоагентных систем боевого назначения. На основе построенной в диссертации математической модели поведения многоагентной системы автор разрабатывает численные методы и алгоритмы решения прямых и обратных задач ведения эффективных боевых действий беспилотных летательных аппаратов, разрабатывает комплекс программных средств для применения их в реальных боевых условиях и в условиях специальных тренажеров, имитирующих боевую обстановку в режиме военных игр и военных учений. Поэтому диссертационная работа Попкова Сергея Игоревича является актуальной задачей, имеющей важное прикладное значение.

Основной целью диссертационной работы Попкова С.И. является разработка математической модели управления поведением многоагентных систем и разработка показателей оценивания эффективности решения прямых и обратных задач боевого поведения группировки интеллектуальных агентов в театре своих действий. Кроме этого в работе разрабатываются численные методы, алгоритмы и программные комплексы обеспечивающие эффективное применение научных результатов диссертации на практике боевого применения, для прогнозирования такого поведения и для обучения и

совершенствования боевого мастерства операторов группировки беспилотников с использованием учебно-тренировочных тренажеров.

**Научная новизна** заключается в создании новой научно-обоснованной модели вероятностных многоагентных систем с децентрализованной архитектурой, разработкой и доведением до программно-технической реализации методов и алгоритмов решения прямых и обратных задач поведения группировки боевых беспилотников, в разработке метода прогнозирования оперативной оценки ресурсов, необходимых для решения задачи. Кроме того, в работе Попкова С.И. обосновывается и разрабатывается математическое и программное обеспечение учебно-тренировочного тренажера операторов группировок боевых беспилотников.

Степень **обоснованности** и **достоверности** научных положений, рекомендаций и выводов, сформулированных в работе, достаточно высокая, и подтверждена корректным использованием методов теории марковских процессов, методов анализа данных и оптимизации, методов вычислительной математики, анализом результатов вычислительных экспериментов на демонстрационных вариантах поведения группировки беспилотников, а также обоснованным выбором допущений и ограничений в моделях и методах, используемых при реализации численных алгоритмов. Имеются высокие оценки военных экспертов Всероссийского конкурса Министерства обороны РФ 2018 года по поиску перспективных в интересах Вооруженных Сил Российской Федерации научно-исследовательских работ граждан Российской Федерации, высокие оценки экспертов Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики».

**Оценка содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы.

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность работы, указывается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется современное состояние проблемы, подробно разбираются основные типы используемых сегодня моделей поведения многоагентных систем, в частности на базе деревьев решений, на базе глубинного обучения с использованием многослойных нейронных сетей,

на базе генетических алгоритмов. Делается обоснованный вывод о необходимости построения вероятностной модели.

Во второй главе строится математическая модель вероятностной многоагентной системы с плоским игровым полем, на котором вводится дискретная полярная система координат с неподвижным полюсом в точке нахождения цели для поражения ее атакующими агентами. Подразумевается, что агенты могут перемещаться не только в полярной плоскости, но еще над ней и под ней. По сути автор использует трехмерную цилиндрическую систему координат, но явно об этом не говорит. Поведение каждого агента определяется автономно. Динамика изменения вероятностей пребывания  $k$ -го агента в состояниях марковских процессов определяется системой *уравнений Колмогорова* в матричной форме и пересчитывается численным методом на каждом такте атаки. Вероятности поражения цели каждым агентом определяются автономно картой осуществимости, которая отражает меняющиеся с каждым тактом атаки боевые возможности каждого агента. Вероятности поражения каждого агента со стороны цели определяются автономно картой уязвимости, которая учитывает изменяемые с каждым тактом атаки индивидуальные потери каждого агента. Карты осуществимостей и уязвимостей пересчитываются на каждом такте игры, отслеживая перемещение цели, что позволяет учитывать её движение по игровому полю и учитывая потери (изменения) каждого агента. Распределения вероятностей, которые задают эти карты, при решении многих прикладных задач целесообразно задавать как произведение двух логистических функций, зависящих от расстояний между агентами и целью, от разностей высот между агентами и целью; все параметры карт осуществимости и уязвимости идентифицируются методом максимального правдоподобия по имеющимся эмпирическим данным так, чтобы обеспечить наибольшую вероятность наблюдаемых удачных и неудачных попыток поражений цели и агентов в контрольной серии опытов.

Автор рассматривает в главе отдельно случай простейшего автономного поведения каждого агента. Для этого случая строго доказываются два утверждения о поведении многоагентной системы в целом в случае поражения цели и в случае поражения каждого агента системы. В случае простого поведения агентов удается получить результаты в аналитическом виде. Это позволило спрогнозировать изменения состояний всей многоагентной системы и проанализировать их для различных параметров агентов.

В третьей главе диссертации рассматривается поведение многоагентной системы в дальнесрочной перспективе, с точки зрения разбора прошедшего боя и формулирования стратегических действий лица, принимающего решения. В случае произвольного поведения каждого агента получить результаты боя в аналитическом виде не удастся. Автор предлагает использовать численные эксперименты многочисленных боев и проведение их статистического анализа с использованием макропараметров. В качестве макропараметров автор рассматривал: время до выигрыша в тактах, относительное количество поражённых агентов в конце игры, номер ближайшего к цели кольца, в котором располагается агент, количество агентов, располагающихся на игровом поле. Проведя достаточное число вычислительных экспериментов и сделав их статистический анализ, результаты такого прогнозирования в диссертации были представлены в виде зависимостей между макропараметрами. Такие зависимости отражаются во второй вероятностной модели поведения многоагентной системы, отражающие уже общие статистические закономерности. Далее эти зависимости автор диссертации предлагает использовать для решения прямых и обратных стратегических задач боевого применения многоагентной системы атакующих беспилотников. В конце главы диссертации рассматривается подробный демонстрационный пример решения прямой и обратной задач динамики поведения конкретной многоагентной вероятностной системы.

В четвертой главе рассматривается Программная реализация вероятностной модели поведения прикладной многоагентной системы. Сама программная версия базовой модели, описывающей многоагентную систему, представляет собой реализацию пяти основных компонентов, связанных между собой: математического аппарата, общего алгоритма действий участников моделируемого процесса (в данном случае, речь идет об агентах и цели), редактора входных данных и параметров модели, проигрывателя модели и подсистемы ввода-вывода для хранения данных. В главе дается общее описание задействованных в программной реализации модели структур.

Пятая глава посвящена разработке и применению численного метода внешней оптимизации для идентификации марковских процессов, позволяющего увеличить эффективность основного метода оптимизации. Изучается взаимодействие между методами, вводится понятие шаблон «декоратор», вводится двумерное пространство параметров для проведения процедуры оптимизации. Выписывается пошагово алгоритм вычисления

метода внешней оптимизации. Приведен пример практического применения метода. Наглядно показывается повышение эффективности работы алгоритма оптимизации за счет адаптивного изменения его метапараметров.

В шестой главе автор рассматривает проблемы применения построенных математических моделей, методов и алгоритмов для разработки тренажера для автоматизированных беспилотных летательных аппаратов и робототехнических комплексов на базе вероятностной модели поведения боевой вероятностной многоагентной системы. Разработанные в диссертационной работе математические и программные средства предназначены для обеспечения оптимального управления наземными и воздушными комплексами боевой техники в случае ведения боя с эффектом неопределенности, когда перемещение боевой единицы носит намеренно стохастический характер с целью уменьшения вероятности ее поражения целью, выступающей в роли противника. Упор в работе был на решение актуальной задачи создания полностью автоматизированных боевых комплексов, необходимость использования которых выявил опыт военных конфликтов последних лет. Тем не менее, может возникнуть ситуация, когда человек должен взять на себя управление в качестве оператора сложной многоагентной системы со стороны цели, обеспечивая ее защиту от потенциального нападения агентов, участвующих их поведение на противоположной стороне конфликта в моделируемой ситуации.

В первых пяти главах диссертации не рассматривалось человеко-машинное взаимодействие, которое позволило бы вести обучение и определять уровень компетентности потенциальных операторов многоагентной системы, тогда как такой вид обучающего процесса с практической точки зрения полезен даже тем, что позволил бы избежать выхода из строя реального дорогостоящего оборудования во время тренировок.

Попковым С.И. были рассмотрены подобные системы, работа которых могла бы обеспечить функционирование описанного процесса обучения. Для некоторых из них характерно наличие математической модели, описывающей адаптивное обучение, однако ограничения реализации в рамках конкретной предметной области не позволяют организовать процесс обучения для оператора сложных систем в общем вид. Для других систем не предусмотрено наличие специализированной математической модели для оценки уровня обучения по заданным критериям, несмотря на адаптацию к предметной области сложных систем. В диссертации был разработан и программно реализован виртуальный адаптивный тренажер на основе модели

многоагентной системы в качестве программного комплекса взаимосвязанных приложений и библиотек. Тренажер рассмотрен с точки зрения бизнес-процесса в контексте взаимодействия испытуемого с комплексом программ, обеспечивающих определение уровня навыков, а также его формирование у пользователя тренажера. Работа тренажера была проиллюстрирована на демонстрационном примере действий вероятностной многоагентной системы.

В заключении диссертации перечислены результаты, выносимые на защиту и приведен список литературы из 105 наименований.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Сделаем ряд замечаний по работе:

1. В работе нет явного описания цилиндрической системы координат для театра боевых действий агентов, хотя в тексте диссертации можно найти учет трехмерного поведения агентов в театре действий.

2. Предложенная вероятностная модель поведения многоагентной системы не описывает в явном виде взаимодействия агентов между собой. В модели также нет обсуждения случая наличия нескольких целей.

3. В диссертации имеются некоторые стилистические замечания, неточности и опiski. Например, термин «критерий» постоянно используется в смысле термина «показатель», что неверно. Так на стр.102 имеем текст - «... критерий эффективности увеличивается с 10,84 до 13,69...» или на стр. 103 - «...среднее значение критерия...» и др. В работе на стр. 30 и 38 случайный марковский процесс поведения вероятностной многоагентной системы, т.е. бой группы беспилотников, назван эволюцией многоагентной системы. Применение термина «эволюция» в этом случае представляется спорным. В заголовке главы 6 имеем «Применение и разработка тренажера для...» правильнее было бы переставить местами первые слова - «Разработка и применение тренажера для...». На стр. 33 вводится состояние  $S_k$  как поражение цели со стороны  $k$ -го агента, а рядом на стр. 34 вводится такое же обозначение  $S_k$  как состояние перехода  $k$ -го агента в одну из смежных ячеек театра действий. В работе главы явно невыделены и не пронумерованы. При этом общее число глав в диссертации, равное 6, вполне можно уменьшить до привычных трех или четырех для кандидатских диссертаций. Например, вполне можно было главы 2 и 3, а также 4 и 5 объединить. Имеются и другие редакторские замечания.

**Заключение.** Несмотря на отмеченные замечания, диссертационная работа Попкова Сергея Игоревича «Моделирование поведения вероятностных многоагентных систем с децентрализованной архитектурой», содержит решение актуальной научно-технической задачи и отвечает критериям п.8 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Попков Сергей Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:  
Профессор Департамента анализа  
данных, принятия решения  
и финансовых технологий  
федерального государственного  
образовательного бюджетного  
учреждения высшего образования  
«Финансовый университет при  
Правительстве Российской Федерации»,

д.ф.-м.н., проф.

Александр Витальевич Чечкин

Адрес: 125993, Москва ГСП-3, Ленинградский пр-т, д. 49,  
тел. 8(499)503-4702, e-mail: a.chechkin@mail.ru

