

### **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Лутошкина Игоря Викторовича "Разработка, анализ и применение оптимизационных динамических моделей экономических систем с запаздыванием", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Актуальность.** Диссертационная работа "Разработка, анализ и применение оптимизационных динамических моделей экономических систем с запаздыванием" И.В. Лутошкина посвящена моделированию оптимизационных динамических систем, учитывающих точечное и/или распределенное запаздывание в реакции систем. Модели такого типа возникают в задачах механики, робототехники, искусственных и социальных системах, имеющих блок управления. Постоянное усложнение таких моделей приводит к необходимости развития соответствующих методов качественного и численного анализа. При этом распространение самой методологии моделирования происходит не только в технических и естественно-научных областях, но и в социальных, экономических. Последнее обуславливается развитием систем искусственного интеллекта, необходимостью создания новых моделей, позволяющих автоматизированно решать задачи управления, традиционно решаемые человеком.

Задачи с запаздыванием являются достаточно сложными для анализа и, за исключением простых случаев, требуется применение численных методов. Если стоит вопрос поиска оптимального управления системой с запаздыванием, в которой динамика описывается дифференциально-разностными или интегро-дифференциальными уравнениями, то задача существенно усложняется, повышаются требования к численным методам, применяемым к таким задачам. В основном численные методы решения задач оптимального управления базируются либо на полной дискретизации системы, либо необходимых или

достаточных условиях в задачах оптимального управления. Также развивается направление, связанное с аппроксимацией фазовых переменных полиномиальными сплайнами, функций управления сеточной функцией с последующим решением полученных задач нелинейного программирования. Все эти подходы имеют определенные достоинства и недостатки. Преодоление недостатков стимулирует создание новых численных методов решения задач оптимального управления.

Модели оптимизационных динамических систем с запаздыванием изначально создавались для решения технических проблем, связанных с управлением в самолето- ракетостроении. Был решен ряд задач, связанных с автоматизацией управления в технических системах. Современное развитие цифровизации приводит к необходимости создания моделей данного класса при управлении не только техническими, но и социально-экономическими системами. Здесь можно рассматривать проблемы управления производственными системами, в том числе предприятиями, макроэкономическими системами, непроизводственными компаниями.

**Научная новизна.** В диссертационном исследовании И.В. Лутошкина разработан единый подход к численному решению задач оптимального управления. Основы данного подхода заложены В.К. Горбуновым (научным консультантом диссертанта): был предложен метод параметризации для решения задач оптимального управления, когда динамика описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. И.В. Лутошкиным метод параметризации был развит для задач оптимального управления с динамикой в виде дифференциально-разностных уравнений, интегро-дифференциальных уравнений. Таким образом, в диссертации развивается новое научное направление для численного решения задач оптимального управления достаточно разного типа. Общая идея состоит в представлении управления в некотором классе функций, когда вычисление управления определяется выбором параметров этого класса. Таким образом, фазовая траектория также определяется параметрами функций управления. Получаемая при этом задача нелинейного программирования (НП) относительно параметров является нетривиальной. В частности, для применения методов решения задач НП требуются производные функций, описывающих задачу НП. В диссертационном исследовании разработаны алгоритмы построения этих производных.

Разработанный в диссертации подход апробирован на ряде вычислительных примеров, подтверждающих его эффективность. С помощью метода параметризации в диссертационном исследовании проведен анализ нескольких математических моделей, описанных в терминах задачи оптимального управления с запаздыванием. Данные модели являются новыми и описывают оптимизационные динамические системы некоторых экономических проблем. Научную новизну здесь составляет распространение методологии моделирования, получившей распространение в технических, естественно научных областях, на социально-экономические системы. И.В. Лутошкин разработал новые математические модели для ряда экономических проблем: модели с точечным запаздыванием (макроэкономическая модель двухсекторной экономики, модель управления экономической системой в условиях массового заболевания, модель управления производственным предприятием с учетом принципов менеджмента), с распределенным запаздыванием (модель инвестиционной стратегии фирмы, модели рекламных воздействий).

**Содержание диссертации.** Диссертация составляет 320 страниц, содержание представлено из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений.

Введение содержит обзор, посвященный численным методам решения задач оптимального управления, программным пакетам для решения задач оптимального управления, оптимизационным динамическим математическим моделям экономических процессов, рассматриваемых в диссертации. Во введении: обосновывается актуальность и новизна диссертационного исследования; формулируются цель, задачи исследования, положения, выносимые на защиту; определяются объект, предмет исследования. Даны сведения о публикациях автора, его личном вкладе, апробации исследования на конференциях и семинарах российского и международного уровня.

Первая глава содержит описание метода параметризации для задач оптимального управления, в которых динамика описывается дифференциальными, дифференциально-разностными, интегро-дифференциальными уравнениями. Обосновываются формулы вычисления производных в задаче нелинейного программирования, порожденной

параметризацией управления. В параграфе 1.4 доказываемость метода параметризации по функционалу.

Во второй главе представлены новые математические оптимизационные динамические модели с запаздыванием: модели с точечным запаздыванием (макроэкономическая модель двухсекторной экономики, модель управления экономической системой в условиях массового заболевания, модель управления производственным предприятием с учетом принципов менеджмента), с распределенным запаздыванием (модель инвестиционной стратегии фирмы, модели рекламных воздействий). При этом, в некоторых моделях запаздывание вводится не только для фазовых переменных, но также для управления.

Третья глава содержит качественный анализ некоторых авторских моделей. На основе необходимых условий экстремума проводится анализ двухсекторной модели экономики, модели инвестиционной стратегии фирмы, модели рекламных воздействий, что позволяет определить структуру оптимального управления. Для модели инвестиционной стратегии фирмы и модели рекламных воздействий обосновывается существование оптимального решения. Для модели управления экономической системой в условиях массового заболевания обосновывается выбор целевого функционала.

В четвертой главе представлен предметно-ориентированный вычислительный программный комплекс, реализующий метод параметризации для задач оптимального управления, описанных в первой главе. Сформулирована общая концепция программных средств, приведены вычислительные алгоритмы, реализующие функционал комплекса.

Пятая глава содержит вычислительные результаты, полученные применением программного комплекса к некоторым моделям из второй главы. Для модели двухсекторной экономики параметры оценивались на основе условных данных, для модели инвестиционной стратегии фирмы на основе данных ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», для модели управления рекламой два варианта параметров: на основе данных ОАО «Мегафон» и фирмы по производству и продаже одежды. Для модели управления экономической системой в условиях массового заболевания параметры оценивались для двух случаев: на основе данных о пандемии COVID-19 в 2020 году в РФ и Ульяновской области.

Заключение содержит полученные результаты в диссертационном исследовании и положения, выносимые на защиту.

#### **Замечания по диссертации:**

1. В параграфе 1.3 развивается метод параметризации для задач оптимального управления с интегро-дифференциальными уравнениями, однако в явном виде применение этого варианта метода параметризации отсутствует при численном анализе моделей в пятой главе.
2. В задаче нелинейного программирования (1.10) вводятся переменные  $w_0^k$ ,  $w_{0,0}^k$ . Судя по всему, оба вида переменных означают моменты переключения управления. В чем смысл разного обозначения этих переменных?
3. После параметризации исходной задачи (1.1)-(1.4) полученная задача (1.10) какими свойствами обладает? Является ли она выпуклой?

#### **Основные результаты диссертационного исследования:**

1. Развитие метода параметризации для решения задач оптимального управления с дифференциально-разностными уравнениями.
2. Развитие метода параметризации для решения задач оптимального управления с интегро-дифференциальными уравнениями.
3. Разработка новых оптимизационных моделей с дифференциально-разностными уравнениями: модели управления организационно-техническими системами, двухсекторная модель экономики, модели управления экономической системой в условиях массового заболевания.
4. Разработка новых оптимизационных моделей с интегро-дифференциальными уравнениями: инвестиционная модель производственной компании, обобщенная модель построения рекламных стратегий.
5. Концепция построения программных средств для реализации единого подхода, ориентированного на решение задач оптимального управления разного типа.
6. Проблемно-ориентированный комплекс, предназначенный для решения задач оптимального управления с точечным и распределенным запаздыванием как в фазовых, так и в управляющих переменных.

**Заключение.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 25 работах в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов докторских диссертаций, включая 17 в изданиях, входящих в WoS и Scopus. По результатам исследования опубликованы 3 монографии, получены 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Проведена апробация на научных конференциях и семинарах российского и международного уровня. Автореферат диссертации и опубликованные работы отражают основные результаты диссертации.

Личный вклад диссертанта определяется самостоятельным выполнением всех этапов исследования и руководством коллективными исследованиями в российских и международных программах: грант РФФИ № 01-01-00731 «Вариационные методы регуляризации и решения вырожденных уравнений и неравенств», грант РФФИ № 07-01-90000 Вьет/а «Разработка качественной теории и методов приближенного решения дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ)», государственное задание Министерства образования и науки РФ № 2.1816.2017/4.6 по теме «Исследование и разработка интегрированной автоматизированной системы управления производственно-технологическим планированием авиастроительного предприятия на базе цифровых технологий», грант РФФИ № 24-28-00542 «Разработка информационно-аналитического инструмента моделирования и оптимизации управления социально-экономическими системами в условиях массового заболевания».

Диссертация Лутошкина И.В. является законченным исследованием, в котором разработаны: новые численные методы решения задач оптимального управления с дифференциальными, дифференциально-разностными и интегро-дифференциальными уравнениями; комплекс программ для численного решения этих задач; новые оптимизационные модели с запаздыванием. Работа вносит значительный вклад в развитие методов математического моделирования. В диссертации решена крупная научная проблема, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение для страны в области моделирования оптимизационных динамических систем, в области управления производственными предприятиями и непромышленными компаниями, в области управления экономическими системами в условиях массового заболевания.

