

А. М. Цирлин

Российский семинар «Приближенные методы оптимального управления в приложении к квантовым системам»

Российский семинар «Приближенные методы оптимального управления в приложении к квантовым системам», организованный при поддержке РФФИ (проект 10-01-01700-э_г), проходил в Переславле-Залесском, в Институте программных систем им. А.К. Айламазяна РАН 20–25 декабря 2010 года. Основная цель Семинара — обсуждение в кругу заинтересованных специалистов новых важных результатов, полученных участниками в ходе выполнения плановых НИР и ряда проектов, поддержанных РФФИ, связанных с приближенными методами для задач оптимального управления, регулярных и вырожденных, их реализацией в параллельных вычислениях и приложениями в различных областях. Среди них — итерационный глобальный метод улучшения управления для нелинейных систем общего вида с использованием линейного уравнения в частных производных относительно функции Кротова (уравнения Кротова), реализованный в параллельных вычислениях; метод, основанный на преобразовании Гурмана актуальной задачи управления динамикой квантовой системы, описываемой уравнением Шредингера, к производной задаче меньшего порядка, что приводит к многократному повышению эффективности глобального метода.

Семинар был организован в форме тематических пленарных докладов ведущих ученых по персональным приглашениям, круглых столов (дискуссий) и секционных заседаний при участии молодых ученых, аспирантов и старших студентов, в том числе исполнителей указанных и других проектов РФФИ. Доклады по тематике были распределены по трем секциям:

- (1) методы нелокального улучшения управлений,
- (2) улучшение и оптимизация импульсного управления периодическими процессами,

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№10-01-01700-э_г).

(3) оптимизация управления в квантовых системах.

По согласованию с руководством Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации, первое пленарное заседание было совмещено с заседанием Секции управления, устойчивости и оптимизации систем совета (председатель — доктор технических наук Б.Т. Поляк) при участии ведущих специалистов ИПУ РАН д.т.н. А.Г. Бутковского, д.ф.-м.н. Е.Я. Рубиновича, д.т.н. А.П. Курдюкова, и др.

Были заслушаны два пленарных доклада. Первый был сделан д.т.н. В.Ф. Кротовым, ИПУ РАН, на тему «Нелокальный метод улучшения управления динамическими системами и управляемые объекты квантовой механики». Метод нелокального (глобального) последовательного улучшения управления был предложен в начале 1970-х годов и получил дальнейшее развитие в ряде работ автора и его последователей. Этот метод обладает рядом преимуществ перед широко применяемыми методами локального улучшения процессов (отсутствие настроечных параметров, меньшая зависимость от начального приближения и др.). Особый интерес представляют наиболее практичный вариант метода с линейной функцией, разрешающей основные соотношения метода глобального улучшения, и его приложения. Среди них — системы линейных дифференциальных уравнений с управляемыми коэффициентами, представляющими в точной или приближенной постановке широкий и актуальный класс задач управления квантовым состоянием атомов и молекул, динамика которых описывается уравнением Шредингера, а цели управления адекватно формализуются квадратичными критериями оптимальности. Решение таких задач в контексте современных исследований в области нанотехнологий и квантовых компьютеров вызывает интерес физиков, которые активно этот метод применяют. В докладе были представлены результаты приложения метода к исследованию задачи оптимального управления квантовой системой на модели Ландау–Зинера, демонстрирующие его высокую эффективность.

Второй доклад д.т.н. А.М. Цирлина, ИПС РАН, «Оптимальное параметрическое управление квантовой системой как ансамблем осцилляторов» был посвящен решению задач оптимального параметрического управления одиночным осциллятором и ансамблем квантовых осцилляторов с использованием лазерного излучения. Последняя

задача эквивалентна лазерному охлаждению или нагреву тел с кристаллической структурой. На примере этих задач продемонстрированы возможности метода В.И. Гурмана перехода к новым переменным пространства состояний управляемой системы. Оба доклада вызвали большой интерес и оживленную дискуссию участников.

Другие пленарные доклады и секционные заседания проходили согласно программе Семинара. Обзорный доклад В.И. Гурмана, д.т.н., ИПС РАН, «Приближенная оптимизация управления в параллельных вычислениях» был посвящен одному из плодотворных направлений в области приближенных и вычислительных методов оптимального управления, которое базируется на достаточных условиях оптимальности Кротова и принципе расширения. Спецификой разработанных на этом направлении итерационных процедур является возможность априорного оценивания получаемых приближенных решений и использование характерного свойства вырожденности прикладных задач и соответствующих специальных методов для поиска начальных приближений, что, как известно, является критическим моментом при использовании итерационных улучшающих алгоритмов. Представлен собственный опыт работы в этом направлении, связанный с созданием, развитием и приложениями программно-алгоритмического комплекса улучшения и приближенно оптимального синтеза управления (ПК ISCON). В нем реализуются новые методы, ориентированные на параллельные вычисления на суперкомпьютерах кластерного типа с учетом высокой степени возможного параллелизма, обусловленного самой природой рассматриваемого класса задач оптимизации как задач систематического сравнения вариантов с целью выбора наилучшего.

Другой обзорный доклад д.ф.-м.н. Я.Д. Сергеева, представлявшего Нижегородский университет имени Лобачевского и Университет Калабрия (Италия), «Глобальная оптимизация» был посвящен теоретическим и практическим важным вопросам разработки численных методов решения широкого класса задач глобальной оптимизации и сделан в форме обзора соответствующих статей и монографий, в том числе отражающих научные достижения Нижегородской школы: *Сергеев Я.Д., Стронгин Р.Г., Гришагин В.А.* Введение в параллельную глобальную оптимизацию, Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1998; *Strongin R.G., Sergeyev Ya.D.* Global optimization with non-convex constraints: Sequential and parallel algorithms, Kluwer Academic

Publishers, Dordrecht, 2000; *Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е.* Диагональные методы глобальной оптимизации. Физматлит, 2008.

В докладе д.ф.-м.н. А.С. Буддаева и к.ф.-м.н. Д.О. Трунина из БГУ «Нелокальное улучшение управлений в полиномиальных по состоянию системах» предложены новые методы нелокального улучшения управления в классе полиномиальных по состоянию систем с терминальными ограничениями. Эти методы, родственные упомянутому методу Кротова, не содержат традиционных настроечных параметров и имеют возможность улучшения неоптимальных управлений, удовлетворяющих принципу максимума. Трудоемкость построения улучшающего управления определяется необходимостью решения краевой задачи, которая проще, чем краевая задача принципа максимума благодаря использованию специального метода возмущений. Эффективность продемонстрирована на ряде тестовых примеров и прикладной задаче, связанной с моделированием иммунных процессов.

В докладе д.т.н. А.Ю. Горнова «Оптимизация управляющего импульса при проведении операции обмена спиновой информации между ячейками квантового компьютера» сформулирована и решена указанная задача оптимизации управляющего импульса как задача оптимального управления с терминальными ограничениями. Задача заключается в определении оптимальной формы и длительности импульса напряжения для проведения операции обмена (SWAP). Критериями оптимизации служат минимумы вероятности ошибки нахождения электронов в определенных точках и изменения энергии управления. С помощью разработанной вычислительной технологии определена форма управляющего импульса напряжения и траектории вероятностей нахождения электронов со спином «вверх» и со спином «вниз» в разных квантовых точках. Проведенные численные эксперименты подтвердили принципиальную возможность использования этих состояний для реализации квантовых вычислений.

Следует отметить несколько важных и интересных докладов молодых участников на секциях. В докладе к.ф.-м.н. Е.А. Трушковой, ИПС РАН, «Синтез управления в окрестности приближенного решения задачи с частично закрепленным правым концом» описан метод улучшения управления нелинейной системой в окрестности траектории текущего приближения на основе замены задачи управления с частично закрепленным правым концом более простой линейно-квадратической задачей, для которой решение можно найти в явном

аналитическом виде, а полученное управление применить к исходной модели. Рассмотрено приложение соответствующего итерационного алгоритма к коррекции простой аппроксимации скользящего режима как обобщенного решения задачи управления.

В докладе А.О. Блинова, ИПС РАН, «Приближенный синтез оптимального управления с использованием нелокальных аппроксимаций» описаны методы синтеза приближенно-оптимального управления для дискретных динамических систем, базирующегося на многомерной среднеквадратической аппроксимации функции Кротова–Беллмана, реализованные в составе задач ПК ISCON. Приводятся конкретные содержательные примеры решения задач моделирования и синтеза управления разработанными и реализованными методами, в том числе задачи об оптимальном маневре подъема-разгона и безопасной зоне нештатной посадки вертолета.

Доклад О.В. Батуриной и О.В. Моржина посвящен вычислительным экспериментам по применению метода глобального (нелокального) улучшения В.Ф. Кротова к исследованию задачи оптимального управления квантовой системой, описываемой уравнением Шредингера с гамильтонианом в форме Ландау–Зинера. Проведены реализации стандартного метода глобального улучшения, а также модификации с регуляризацией функционала по управлению. Основным результатом является демонстрация высокой эффективности глобального метода применительно к модели, характерной для проблем оптимального управления системами спинов, описываемыми уравнением Шредингера.

В целом состоялся весьма плодотворный обмен постановками задач, идеями решений и результатами, о чем свидетельствует появление уже в ходе Семинара нового подхода к задачам управления квантовыми системами и на его основе — полное аналитическое решение задачи синтеза оптимального управления на модели Ландау–Зинера, для которой до сих пор применялись лишь численные методы как отечественными, так и зарубежными авторами.

В данном тематическом выпуске электронного журнала публикуются в форме статей избранные труды участников. Из шести публикуемых статей пять содержат приложения к квантовым системам, причем две из них (*Гурман В.И., Блинов А.О.* Синтез оптимального управления квантомеханической системой и *Трушкова Е.А.* Улучшение управления в одном классе систем с линейным неограниченным

управлением) мотивированы выявленными в ходе обсуждений проблемами и постановками задач и фактически написаны во время Семинара.

А. М. Tsirlin. *Russian seminar «Approximate methods of optimal control in applications to quantum systems ».*

Образец ссылки на статью:

А. М. Цирлин. *Российский семинар «Приближенные методы оптимального управления в приложении к квантовым системам»* // Программные системы: теория и приложения : электрон. научн. журн. 2011. № 1(5), с. 3–8. URL: http://psta.psir.ru/read/psta2011_1_3-8.pdf