

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию и автореферат Финкельштейн Евгении Александровны «Вычислительные технологии аппроксимации множества достижимости управляемой системы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии)

### Актуальность темы

Главным объектом исследования в диссертационной работе Финкельштейн Е. А. является множество достижимости динамической управляемой системы. Характеристики множества достижимости важны при решении краевых задач оптимального управления и других задач теории управления. Исходя из предположений о множестве достижимости возможно делать выводы о существовании и единственности решения и применимости тех или иных методов. Хорошо разработана теоретическая база для аналитического описания множества достижимости некоторых классов линейных систем. Для нелинейных систем в большинстве случаев возможно нахождение только численной аппроксимации множества достижимости. Именно этой, нерешенной к настоящему времени, актуальной задаче и посвящена работа Финкельштейн Е.А. В диссертации предлагаются новые алгоритмы аппроксимации множеств достижимости именно нелинейных систем, для которых данная задача имеет только частные решения.

Разработанные алгоритмы объединены в вычислительную технологию, которая хорошо апробирована на тестовых и прикладных задачах. Тот факт, что в диссертации решены не только модельные, но и реальные многомерные, со сложными нелинейными зависимостями, задачи, является, на мой взгляд, важным преимуществом.

В качестве дополнительного аспекта обуславливающего актуальность темы можно отметить то, что множество достижимости может служить основой для методов решения важных задач теории управления. Быстрый способ построения даже грубой аппроксимации множества достижимости, например, расширит возможности для численного поиска управления с обратной связью.

Таким образом, в работе рассматривается задача, для которой не существует общепризнанного решения, но которое может служить основой для



большого числа актуальных задач. Это позволяет сделать вывод об общей актуальности проделанной работы.

### **Структура работы**

В первой главе выполнен обзор существующих подходов к решению рассматриваемой задачи аппроксимации множества достижимости и родственных задач оптимального управления. Сформулированы условия применимости разработанных вычислительных технологий, обосновано сужение класса управлений используемых при реализации вычислительных технологий до кусочно-непрерывных или кусочно-постоянных функций.

Вторая глава диссертации посвящена разработанным алгоритмам аппроксимации множеств достижимости и содержит подробное изложение выносимых на защиту положений.

Предложенные алгоритмы реализованы в специализированном программном обеспечении OPTCON-MD, на их основе построена вычислительная технология. Её главным преимуществом является возможность использовать многометодные схемы, которые позволяют получить большую уверенность в достоверности численных результатов. Этой технологии и вопросам тестирования посвящена третья глава.

Описанные в четвертой главе подходы к решению некоторых классов задач теории управления и решения прикладных задач подтверждают практическую значимость диссертационной работы.

Диссертация имеет понятную структуру, все важные результаты изложены подробно и логично следуют один за другим, каждая глава оканчивается выводами. В заключении излагаются основные результаты диссертационной работы. Работа является законченным научным исследованием.

### **Оценка новизны и достоверности**

Основные научные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработаны алгоритмы равномерного и квазиравномерного заполнения объема множества достижимости, позволяющие рассматривать задачи оценки множества достижимости произвольной размерности. Алгоритмы сконструированы таким образом, что позволяют провести настройку параметров, и адаптировать расчет под конкретную задачу. Получаемые в результате работы алгоритмов аппроксимативные наборы точек состоят из относительно небольшого числа элементов и удобны для дальнейшей обработки:



хранения, расчета характеристик множества достижимости, визуализации множества и т.д.

2. Для двумерных систем разработаны алгоритмы кусочно-линейной аппроксимации границы множества достижимости. Алгоритм, основанный на принципе максимума Понтрягина, использует известную и даже очевидную идею. Но предложенные в работе дополнительные процедуры позволили автору реализовать новый метод численной аппроксимации границы множества достижимости. Тестовые примеры и результаты сравнения, приведенные в тексте диссертации и в приложении, наглядно подтверждают работоспособность этого алгоритма.

3. Разработана технология аппроксимации множества достижимости объединением эллипсов или шаров. В рамках данной работы технология успешно применяется для построения внешней оценки множества достижимости, но имеет также потенциал для использования в других задачах связанных с описанием областей, содержащих какие-либо пробы, например, кластеризации. Конструкция объединения, а не пересечения фигур, дает дополнительные, по сравнению с традиционным методом эллипсоидов, возможности для описания сложных невыпуклых объектов.

4. Разработаны вычислительные технологии построения аппроксимаций многомерных множеств достижимости. Возможность комбинировать различные по сути алгоритмы и в диалоговом режиме настраивать параметры позволяет эффективно решать задачу аппроксимации множества достижимости нелинейной динамической системы. На примерах показана применимость технологии для многомерных систем с векторным управлением, нелинейных по всем своим переменным и систем с разрывной правой частью.

5. Разработаны новые методики сравнения алгоритмов аппроксимации множества достижимости и создана тестовая коллекция невыпуклых тестовых множеств достижимости, отсутствующая в доступной литературе как для задач аппроксимации множеств достижимости, так и связанных задач оптимального управления.

Все выносимые на защиту результаты представляются новыми и получены диссертантом впервые.

Можно утверждать, что, хотя задачей описания множества достижимости занималось и занимается большое количество исследователей, что подтверждает приведенный в диссертации обзор литературы, задача остается актуальной и пока не может считаться решенной. Полученные в работе результаты, главным



образом разработанные алгоритмы, являются продвижением на этом пути, но оставляют место для дальнейшего совершенствования.

Четвертая глава подтверждает применимость разработанных вычислительных технологий в прикладных задачах и практическую значимость. С точки зрения оценки новизны, наибольшее значение имеет исследование климатическо-экономической DICE модели и модели, описывающей автоколебательную реакцию.

Достоверность результатов диссертационной работы не вызывает сомнений. Приводятся результаты большого числа вычислительных экспериментов, проведенных с использованием разработанных методик сравнения, тестовые расчеты сопоставляются, когда это возможно, с работами известных специалистов.

Результаты работы полно опубликованы, в том числе в 6 статьях в журналах из перечня ВАК, 4 из которых входят в Web of Science. Финкельштейн Е.А. выступала с докладами по теме диссертации на многих международных и всероссийских конференциях. На разных этапах работы, результаты обсуждались на специализированных семинарах в ведущих научных институтах.

В качестве общих замечаний по работе можно указать следующие:

1. К большому сожалению, предложенные в работе алгоритмы не являются гарантирующими. Это связано с тем, что алгоритмы носят недетерминированный характер и опираются на эвристические процедуры. Тем не менее строгие оценки вероятности получения результата могли бы существенно усилить работу.
2. В п. 2.2. дана ссылка на метод «глубоких ям», идеологически схожий с предложенным алгоритмом, однако прямого сравнения не приводится.
3. В п. 2.5. наблюдается путаница с размерностью. Предлагается технология аппроксимации множества достижимости объединением эллипсов, то есть двумерными объектами, но далее в тексте критерием выступает объем, а не площадь. С вычислительной точки зрения метод применим для задач разной размерности, и было бы справедливо использовать термин эллипсоид.
4. В описании стандартных вычислительных схем п. 3.3. стоило напомнить о трактовке приведенных параметров (например,  $N_s$ ,  $K_L$ ).

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

## Заключение

Диссертация Финкельштейн Е.А. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа имеет научное и практическое значение для системного анализа, и в частности численного исследования управляемых динамических систем и задач теории управления. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат отражает основное содержание диссертации, в нем представлены все важные этапы работы.

Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Финкельштейн Евгения Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии).

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
ФИЦ ИУ РАН

Антипин Анатолий Сергеевич

119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

Телефон: +7 (499) 135-62-60

Эл.почта: [ipiran@ipiran.ru](mailto:ipiran@ipiran.ru)

Подпись официального оппонента заверяю.

Гербовая печать

Дата

