

«Утверждаю»

И.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт программных систем им. А. К. Айламазяна Российской академии наук»,  
председатель Ученого совета,  
кандидат технических наук

И.П. Тищенко

2026 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Симкиной Анастасии Вячеславовны «Алгоритмы построения и аппроксимации предельных множеств 0-управляемости и достижимости для линейных дискретных систем с геометрическими ограничениями на управление», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

#### Актуальность

В диссертации Симкиной А.В. рассматривается фундаментальная задача теории управления – построение и аппроксимация предельных множеств 0-управляемости и достижимости для линейных дискретных систем с геометрическими ограничениями на управление. Данные множества играют ключевую роль при решении задач терминального управления, быстрогодействия и гарантированного оценивания состояния. В отличие от непрерывного случая, где теория множеств достижимости разработана достаточно полно (интегралы Ауманна, дифференциальные включения, эллипсоидальные оценки А.Б. Куржанского и Ф.Л. Черноусько), для дискретных систем вопрос построения предельных аналогов этих множеств остаётся открытым. В частности, отсутствуют универсальные конструктивные методы, позволяющие строить внешние оценки с гарантированной точностью. Диссертационная работа Симкиной А.В. направлена на восполнение указанного пробела, что определяет её *научную значимость и актуальность*.

#### Научная новизна

В диссертационной работе разработан новый подход к внешнему оцениванию предельных множеств 0-управляемости и достижимости,

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ  
12.05.2026 г.

основанный на сочетании методов выпуклого анализа и принципа сжимающих отображений в метрическом пространстве компактов. Для почти периодических систем (матрица приводится к блочно-диагональному виду с комплексно-сопряжёнными блоками) разработан метод декомпозиции, сводящий многомерную задачу к совокупности двумерных подзадач.

Результаты, представленные в диссертации, являются новыми.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов обоснована строгостью математических доказательств и продемонстрирована результатами численного моделирования.

Основные результаты опубликованы в 17 научных работах, из которых 3 в периодических изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 4 в журналах из перечня ВАК и 10 в других изданиях и материалах конференций. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

### **Краткая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

**Во введении** обосновывается актуальность, приводится краткая историческая справка по тематике диссертации, определяются цели и задачи работы, методы исследования, приводится краткое содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена построению предельного множества 0-управляемости. Вводятся основные определения, формулируются и доказываются леммы о структуре предельного множества и необходимые и достаточные условия его ограниченности. Разработан метод опорных полупространств, приведены явные формулы для случая вещественной жордановой клетки. Завершает главу применение принципа сжимающих отображений с получением оценки погрешности аппроксимации.

**Вторая глава** симметричным образом рассматривает предельное множество достижимости. Получены условия ограниченности, разработан метод опорных полупространств, предложен подход на основе сжимающих отображений. Важно отметить, что условия ограниченности множества достижимости отличаются от условий для множества 0-управляемости (требование на собственные значения по модулю строго меньше 1 против строго больше 1), что автор чётко фиксирует.

**Третья глава** посвящена почти периодическим системам. Предложен метод декомпозиции, сводящий исходную задачу размерности  $2m$  к

$m$  двумерным подзадачам. Получены явные выражения для внешних оценок предельных множеств в виде прямого произведения кругов, радиусы которых зависят от погрешности аппроксимации углов поворота.

**Четвертая глава** содержит описание программы, реализующей алгоритмы первой и второй главы. Таким образом, полученные теоретические результаты доведены до практического использования и применяются для решения ряда модельных задач, имеющих прикладной характер.

**Заключение** содержит краткие итоги диссертационной работы и перечисление основных результатов. Также автор приводит возможные направления дальнейших исследований.

### **Основные результаты работы, полученные автором**

1. Необходимые и достаточные условия ограниченности предельных множеств 0-управляемости и достижимости для линейных автономных систем с дискретным временем и геометрическими ограничениями на управление, сформулированные в терминах спектральных свойств матрицы системы и проекций множества допустимых управлений. *(Изложены в первой и второй главах)*
2. Алгоритм построения внешних оценок предельных множеств 0-управляемости и достижимости на основе аппарата опорных полупространств, включая явные аналитические формулы для границ указанных множеств в случае вещественных жордановых клеток и комплексно-сопряжённых собственных значений. *(Изложены в первой и второй главах)*
3. Алгоритм построения внешних оценок предельных множеств 0-управляемости и достижимости на основе принципа сжимающих отображений в метрическом пространстве компактов с расстоянием Хаусдорфа, позволяющий строить аппроксимации с любой наперёд заданной точностью. *(Изложены в первой и второй главах)*
4. Алгоритм аппроксимации предельных множеств достижимости и 0-управляемости для почти периодических систем при ограниченных вычислительных ресурсах, позволяющий выбирать наилучшее рациональное приближение угла поворота для минимизации погрешности внешней оценки. *(Изложены в третьей главе)*
6. Программа на языке C++, реализующая разработанные алгоритмы построения внешних оценок предельных множеств 0-управляемости и достижимости, при помощи которой решены прикладные задачи: управление аэростатом (построение предельного множества 0-управляемости), стабилизация уровня глюкозы в плазме крови (внешнее оценивание

предельного множества достижимости на основе опорных полупространств) и демпфирование высотного сооружения в зоне сейсмической активности (оценка предельного множества достижимости с использованием метода декомпозиции для почти периодических систем). *(Изложены в четвёртой главе, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ)*

Сформулированные результаты **соответствуют следующим пунктам паспорта специальности** «2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.
2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.
5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

**Практическая ценность** работы определяется возможностью использования ее результатов для решения задач управления различными механическими объектами, а также для моделирования систем с дискретным временем. Методы построения предельных множеств достижимости и управляемости позволяют решать различные задачи анализа.

### **Замечания**

1. В работе не проводится количественного или качественного сравнения предложенных алгоритмов оценивания предельных множеств с существующими аналогами. Такое сравнение позволило бы объективно оценить преимущества и недостатки разработанных подходов.

2. Во второй главе показано, что предельное множество достижимости может быть не замкнутым и не открытым. Это важное наблюдение, но оно не используется в дальнейшем. Следовало бы обсудить, как свойство (не)замкнутости влияет на применимость предложенных методов внешнего оценивания (которые строят замыкания).

3. В задаче демпфирования высотного сооружения в четвертой главе не указана погрешность дискретизации. Переход от непрерывной модели к дискретной осуществляется с шагом 1. Не обсуждается, насколько велика погрешность такой аппроксимации и как она влияет на точность оценок предельных множеств достижимости.

4. Не отмечено, чем отличаются результаты и методы решения поставленной задачи от результатов и методов ее решения для непрерывных систем.

Данные замечания не умаляют научной ценности данной диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

### Заключение

Диссертационная работа представляет собой законченную и целостную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты новы и представляют как теоретический, так и практический интерес.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Диссертация обсуждена на научном семинаре Института программных систем им. А. К. Айламазяна РАН 30.04.26, протокол № 12.

Руководитель семинара, д.ф.-м. наук

04.05.2026

*Сачков*

Сачков Ю.Л.

Адрес: 152021, Ярославская область, Переславский район, с. Вельское, ул. Петра Первого, д. 4 «а».

тел.: 8 (4852) 695-228

e-mail: psi@botik.ru

*Юрий Сачков Ю.Л. завершил  
написание отчета о работе ИИС  
им. А.К. Айламазяна РАН  
Елена Шмелева*



*Сачков ознакомлен  
22.05.2026*