

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доктора физико-математических наук Ананьевского Игоря Михайловича**

на диссертационную работу Берлина Леонида Михайловича

«Скалярное управление системой несинхронных осцилляторов по критерию быстродействия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

### **Актуальность исследования**

Диссертационная работа Берлина Л.М. посвящена аналитическому и численному исследованию задачи оптимального быстродействия для системы, состоящей из нескольких несинхронных осцилляторов, со скалярным ограниченным по модулю управлением. Задача актуальна для многомерных колебательных механических систем с дефицитом управления, т.е. в случае, когда размерность вектора управляющих параметров меньше числа степеней свободы системы. Разработанные методы и основанные на них алгоритмы решения ориентированы на этот класс задач и могут быть применены при моделировании и численном синтезе управления в реальных физико-технических системах колебательной природы, что говорит об актуальности темы диссертационной работы.

### **Содержание и структура работы**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и списка рисунков. Общий объем диссертации составляет 114 страниц с 19 рисунками. Список литературы включает 80 наименований. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Во введении приведен подробный обзор литературы, показана актуальность работы, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе сформулирована основная задача, решению которой посвящена диссертация – задача построения оптимального по быстродействию управления системой несинхронных осцилляторов с ограниченным по модулю скалярным управлением. Сначала автор проводит исследование управляемости и некоторых других свойств системы несинхронных осцилляторов с ограниченным скалярным управлением. С использованием теоремы Суссмана – Джарджевича, которая основывается на анализе алгебры Ли векторных полей, им доказана сильная достижимость рассматриваемой

системы. С помощью теоремы ЛаСалля – Конти установлена ее глобальная управляемость.

Автор ищет оптимальное управление в классе кусочно-непрерывных функций времени. На основе принципа максимума Понтрягина выписано необходимое условие оптимальности. Введена в рассмотрение функция переключений и показано, что на любом конечном отрезке она имеет конечное число нулей, из чего делается вывод об отсутствии особых режимов управления. Установлена единственность оптимального управления для любого начального состояния. Показана связь между решениями задачи разгона и задачи остановки. В заключительном параграфе первой главы с помощью численного интегрирования проиллюстрированы некоторые особенности поведения множеств достижимости рассматриваемой системы.

Вторая глава посвящена изучению свойств оптимального управления. Поскольку оптимальное управление представляет собой кусочно-постоянную функцию времени, принимающую значения  $\pm\varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – максимально допустимая величина модуля управления, а число переключений конечно, то эта функция определяется набором моментов переключений. Можно сказать, что автор параметризует семейство этих управляющих функций такими наборами моментов переключений. Подробно изучаются функции, имеющие  $2N-1$  переключений ( $N$  – число осцилляторов). Установлено, что в этом случае полное оптимальное время движения и моменты переключений управления непрерывно зависят от начального состояния системы в задаче о скорейшей остановке (или от конечного состояния в задаче разгона). Для управлений с другим числом переключений получены условия, которые вместе с условиями принципа максимума Понтрягина составляют условия оптимальности.

Для системы двух осцилляторов и управлений с двумя переключениями моменты переключений описаны как функции начального (конечного) состояния. Исследованы кривые, разделяющие классы переключений на фазовой плоскости одного осциллятора. В задаче остановки с помощью необходимых условий экстремума и с использованием итерационного алгоритма Нейштадта–Итона для поиска начального значения сопряженного вектора найдены оптимальные траектории. Проведено сравнение полученных классификаций траекторий на основе количества переключений релейного управления, и установлено их совпадение. В качестве иллюстрации представлены рисунки с изображениями множеств начальных состояний первого осциллятора, отвечающих управлению с различным числом переключений.

Третья глава посвящена доказательству непрерывной зависимости полного оптимального (т.е. минимально возможного) времени движения и моментов переключений оптимального управления от начального состояния системы в задаче о скорейшей остановке (или от конечного состояния в задаче разгона). Полученные результаты проиллюстрированы с помощью численного моделирования динамики системы, состоящей из двух осцилляторов.

В заключении сформулированы основные выводы по работе и обозначены возможные направления развития полученных в ней результатов.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе получены и изложены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1) Свойства сильной достижимости и глобальной управляемости системы несинхронных осцилляторов с ограниченным скалярным управлением.

2) Метод решения задачи быстродействия системой несинхронных осцилляторов, базирующийся на необходимых условиях экстремума для любого заданного количества неизвестных моментов переключения оптимального управления.

3) Непрерывная зависимость минимально возможного времени движения и моментов переключений оптимального по быстродействию управления от параметра ограничения на управление и от граничных условий в задаче управления системой несинхронных осцилляторов.

Данные результаты соответствуют пп. 1, 3 и 4 паспорта заявленной специальности.

### **Обоснованность и достоверность полученных научных результатов**

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректностью и полнотой исходных положений, строгостью доказательств и непротиворечивостью математических выкладок. Результаты теоретических исследований подтверждены средствами компьютерного моделирования. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых изданиях и представлены на отечественных и зарубежных конференциях. Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об обоснованности и достоверности полученных результатов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории и методов решения задач оптимального управления линейными механическими системами,

содержащими колебательные подсистемы, с ограниченным управлением, размерность которого меньше числа степеней свободы системы.

Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для численного решения задач синтеза управления в широком классе технических систем со сложной нелинейной динамикой. В окрестности рабочих режимов такие модели после линеаризации часто сводятся к системе осцилляторов с единственным ограниченным входом, что позволяет применять полученные результаты.

### **Замечания по диссертации**

После прочтения диссертационной работы возникли следующие незначительные замечания/вопросы:

1. На мой взгляд, исследование рассматриваемой задачи быстродействия можно упростить, избавившись от одного параметра путем перемасштабирования фазового пространства и сведения задачи к задаче с ограничением на управление, равным единице.
2. Недостаточно информативно изложен смысл леммы 10 в главе 2 для класса двух переключений. Каким конечным состоянием в задаче разгона она отвечает? Также требуется в самой лемме указать её справедливость только для задачи разгона.

### **Заключение**

Указанные замечания не являются критическими и не снижают положительное впечатление от диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой, обладающей новизной, теоретической и практической значимостью. Диссертация выполнена лично соискателем на высоком математическом уровне.

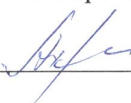
Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 научных работах: одна статья в рецензируемом научном издании по специальности 2.3.1 (физ.-мат.), относящемся к категории К1 Перечня ВАК, 3 работы в журналах, индексируемых в международных базах данных и приравненных к журналам Перечня ВАК категории К1, 9 работ в материалах международных и всероссийских конференций и одна публикация в прочих изданиях.

Диссертационная работа Л. М. Берлина представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Представленные в диссертации результаты являются новыми, прошли серьёзную апробацию и опубликованы в рецензируемых научных журналах и доложены на конференциях.

Содержание автореферата полно и правильно отражает основные положения диссертации. На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Берлина Леонида Михайловича «Скалярное управление системой несинхронных осцилляторов по критерию быстродействия» удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:  
главный научный сотрудник, и.о. заведующего  
лабораторией механики управляемых систем  
ФГБУН Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ананьевский Игорь Михайлович



« 30 » апреля 2026 г.

ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

E-mail: anan@ipmnet.ru

Телефон: +7-495-434-00-17



Ананьевского И. М. заверяю

секретарь М.А. Котов