

ОТЗЫВ **официального оппонента**

на диссертационную работу Кучмина А.Ю. «Идентификация и синтез систем управления динамическими объектами с ограничениями», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении) (технические науки)

Актуальность темы исследований

Многолетние исследования А.Ю. Кучмина, нашедшие отражение в диссертационной работе, нацелены на разработку методов идентификации математических моделей и управления сложными техническими объектами. Ключевая особенность рассматриваемых диссертантом задач состоит в необходимости учета разнообразных ограничений в рамках тех или иных проблем оптимизации. Разработанные на ранних стадиях развития науки методы оптимизации такие, как метод наименьших квадратов при сглаживании экспериментальных зависимостей или методы вариационного исчисления при изучении поведения динамических объектов, рассматривали ситуации, когда оптимум заведомо расположен внутри области допустимых решений. В дальнейшем нужды практики привели к задачам, где оптимальные решения находятся на границах допустимых областей изменения искомых показателей. В качестве ответа на указанные вызовы были разработаны методы множителей Лагранжа и математического программирования для решения задач статической оптимизации, принцип максимума для решения задач программного управления, динамическое программирование для решения задач управления с обратной связью. В настоящее время интенсификация процессов контроля и управления все больше приводит к необходимости использования граничных режимов, позволяющих максимально ускорить процедуры построения математических моделей и достижения заданных характеристик управляемых объектов. Одновременно отчетливо проявляются тенденции к усложнению задач практики в плане увеличения как числа оптимизируемых параметров и переменных, так и количества требующих учета ограничений. Разработанные ранее методы, однако, чаще всего пасуют при попытках «лобового» применения для решения все более трудных практических проблем, поэтому тема диссертационной работы А.Ю. Кучмина, направленной на модификацию существующих и разработку новых методов условной оптимизации в целях решения сложных прикладных задач, вне всяких сомнений, актуальна.

Новизна исследования и полученных результатов

Важной частью диссертационной работы, имеющей, на наш взгляд, самостоятельное значение, является значительный по объему и глубине обзор проблем оптимизации, относящихся к идентификации математических моделей и управлению. Литературный обзор содержит 185 публикаций. Здесь важные элементы новизны заключаются в анализе «про» и «контра» различных методов. В частности, сделан вывод об ограниченной применимости метода множителей Лагранжа, сводящего задачу условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации. В качестве альтернативы рассматриваются методы, где анализ ограничений позволяет «нащупать» подобласти, интервалы или точки граничных областей, где следует искать решение задач условной оптимизации.

Рассматривая вопросы новизны основных разделов работы, следует отметить, что диссертация находится на стыке фундаментальной и прикладной науки. В ней много серьезной математики и механики, и вместе с тем содержится большое количество

прикладных результатов, относящихся к электромеханическим управляемым системам и системам контроля прочности материалов.

Что касается главных фундаментальных результатов диссертации, то к ним, прежде всего, относятся разработки по решению задач нелинейного программирования при произвольных ограничениях. Для распространенных в приложениях целевых функций типа метрик (то есть функций, линии равного уровня которых образуют замкнутые выпуклые множества) разработан «метод многомерных оболочек» (ММО), позволяющий решать задачи с большим количеством варьируемых переменных и ограничений. Основой ММО является построение области допустимых решений путём анализа ограничений произвольного вида и их аппроксимации кусочно-полиномиальными ограничениями или рациональными дробями, что позволяет свести исходную задачу к набору взаимосвязанных подзадач с линейными ограничениями, формирующими выпуклые многомерные оболочки, что существенно сужает область поиска. Практически важной особенностью ММО является то, что при нахождении оптимальных значений не применяется операция дифференцирования. Это позволяет использовать метод при решении задач оптимизации недифференцируемых функций.

Для решения задач управления нелинейными динамическими объектами в условиях ограничений на управляющие и фазовые переменные предложен оригинальный метод, модифицирующий известный метод скоростного градиента. Суть модификации заключается в дополнении функции Ляпунова штрафными слагаемыми. Метод приводит к алгоритму релейного управления, когда управляющие воздействия переключаются с максимальных на минимальные уровни и обратно. Рассматривается приложение данной методики к задаче управления динамическим механическим объектом при ограничениях на перемещения, скорости перемещений и управляющие воздействия.

Новизна результатов в прикладных областях связана с применением рассмотренных выше фундаментальных методов для решения конкретных задач условной оптимизации. В частности, ММО применен для синтеза траектории движения модуля интеллектуальной электромеханической системы (ИЭМС), использующей актуаторы.

Результаты комплексного применения ряда известных и разработанных в диссертации новых методов относятся к многоуровневой системе управления проектируемым в России новым высокоточным радиотелескопом. Сложность и своеобразие возникающих задач обусловлены крайне жесткими требованиями к качеству управления. При 70-метровом диаметре зеркала телескопа допустимые погрешности его фокусировки требуют максимальных отклонений от оптимальной формы поверхности зеркала менее миллиметра.

В рамках комплекса задач, связанных с радиотелескопом:

- разработаны кинематическая и динамическая модели блока ИЭМС на базе гексапода фирмы PI M-810, включая модель модуля с изменяемой геометрией,
- выполнена идентификация параметров гексапода при его управляемом движении в малых отклонениях относительно заданной траектории,
- разработаны новые методы синтеза и идентификации сложных распределённых систем управления на основе модели базового блока ИЭМС как динамического объекта с параллельной кинематической схемой для управления элементами зеркальных систем больших полноповоротных радиотелескопов.

Важно отметить, что эти прикладные исследования были выполнены на основе разработанных автором метода многомерных оболочек при решении задач программного управления и модифицированного с учетом штрафных функций метода скоростного градиента при синтезе законов управления с обратной связью.

Еще один круг рассмотренных в диссертации прикладных задач связан с созданием методов и алгоритмического обеспечения для автоматизированной обработки данных испытаний материалов на прочность. Предложены эффективные алгоритмы совместных фильтрации и анализа экспериментальных сигналов, полученных на установке

Гопкинсона. Показано, что при фильтрации взаимосвязанной триады нагружающего, отраженного и прошедшего импульсов от разного рода измерительных помех и определения временных сдвигов этих сигналов данная задача может быть сведена к последовательности задач квадратичного программирования. Предложенные алгоритмы фильтрации и анализа сигналов позволяют эффективно выделять осцилляционные составляющие, которые присутствуют как в нагружающем, так и в прошедшем, и отражённом сигналах и могут быть обусловлены влиянием экспериментальной установки. Удаление этих составляющих привело к более чем двукратному уменьшению среднеквадратических отклонения экспериментальных данных от получаемых модельных зависимостей. Серьезного положительного эффекта удалось добиться благодаря учету ограничений, вытекающих из физики рассматриваемых явлений, причем глубокое проникновение в эту физику является краеугольным камнем развиваемого в диссертации подхода к проблемам идентификации и управления.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, достаточны и обеспечиваются качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также математически строгим применением различных методов решения поставленных задач.

Полученные автором результаты прошли апробацию в рамках 16 международных и российских конференций.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Полученные в диссертационной работе результаты вносят вклад в развитие теории управления, предлагая новые научно-обоснованные подходы к решению задач статической и динамической оптимизации в условиях разнообразных ограничений. Предложенные в работе методы относятся к идентификации математических моделей и управлению. Основной упор сделан на сложные управляемые электро-механические объекты, однако универсальный характер предлагаемых подходов имеет серьезную перспективу и для иных управляемых объектов и процессов, где благодаря учету ограничений физической, экономической или технологической природы за счет сужения области поиска удастся упростить и ускорить нахождение приближенных решений сложных задач оптимизации.

Применение автором разработанных им методов для решения таких важных и сложных технических задач как управление изменением формы зеркала радиотелескопа или автоматизированная обработка данных контроля прочности материалов определяет большое практическое значение результатов диссертации. Более конкретно, проведенные исследования стали основой для создания универсального контроллера модуля ИЭМС на базе гексапода фирмы PI M-810. В ходе работы был создан пакет программ для фильтрации и анализа экспериментальных данных по динамической прочности материалов для установки с разрезным стержнем Гопкинсона-Кольского и стенда с газовой пушкой.

Можно с уверенностью утверждать, что практическое значение работы будет неуклонно возрастать по мере расширения круга практических проблем условной оптимизации, где для получения субоптимальных решений за приемлемое время целесообразно будет использовать методики и опыт автора диссертации.

Соответствие материалов диссертации паспорту научной специальности

Согласно пункту 1 паспорта специальности 05.11.16 в диссертации дано научное обоснование способов повышения эффективности таких перспективных информационно-измерительных систем как радиотелескоп и стенды контроля прочности материалов.

Анализ публикаций автора по теме исследования

Содержание диссертации в достаточном объеме опубликовано как в российских научных журналах из перечня ВАК РФ (14 публикаций), так и в иностранных научных журналах, включенных в базы «Scopus» и «Web of Science» (10 публикаций). Помимо этого, имеется 16 публикаций в сборниках трудов международных и всероссийских конференций. По результатам работы получены 4 патента РФ. Автором написаны главы в 2 совместных монографиях.

Автореферат диссертации и опубликованные работы отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. Крайне широкое название работы создает впечатление некоторой неопределенности предмета исследований, поскольку не определен класс объектов, параметрической идентификации математических моделей и управлению которыми посвящена диссертация. На наш взгляд, более удачным было бы, например, название «Методы математического программирования для построения динамических моделей и высокоточного управления в прикладной механике».

2. Для описания квазистационарных ИЭМС в разделе 1.3 без какого-либо предварительного обсуждения и ссылок введена в рассмотрение основная изучаемая в диссертации динамическая модель (1.3). Учитывая нетривиальный характер данной модели (различные временные сдвиги), полезно было бы привести соображения в пользу именно такого описания.

3. При идентификации управляемых объектов нередко возникают серьезные проблемы, связанные с необходимостью подачи специальных тестовых воздействий для наблюдения реакции на них идентифицируемого процесса. При этом возникает коллизия между стремлением «раскачать» объект идентификации и противоположным требованием его стабилизации на заданном уровне. В диссертационной работе, однако, вопросы дуального управления не рассматриваются.

4. В преамбуле к главе 2 применительно к идентификации содержится критический анализ метода множителей Лагранжа, сводящего задачу условной оптимизации функций нескольких переменных к задаче безусловной оптимизации. На основе этого анализа сделан вывод о непригодности данного подхода для сложных задач с нелинейными ограничениями, что послужило основанием для разработки принципиально другого метода, использующего раздельный анализ различных видов ограничений и целевой функции. В связи с этим возникает вопрос, почему не был рассмотрен в качестве альтернативы методу множителей Лагранжа близкий по идее, но, как представляется, более универсальный метод штрафных функций, тем более, что он активно применяется автором в разделе 4.5, посвященном задачам управления с обратной связью.

5. Глава 5 посвящена обработке результатов экспериментов по анализу характеристик динамической прочности строительных материалов. Этот раздел интересен как со стороны практики (т.к. содержит важные результаты для обработки данных испытаний прочности), так и со стороны теории как пример применения предлагаемых автором подходов к решению задач условной оптимизации путем их сведения к задачам математического программирования. Материал этой главы приятно контрастирует с

некоторыми другими главами благодаря большому количеству фактических данных, а не только цепочек общих формул и результатов компьютерного моделирования. Здесь на конкретных примерах показано, как важно для получения реально значимых результатов сочетать владение математическим инструментарием с проникновением в физику явлений. Вместе с тем положительное впечатление несколько снижается в заключительных разделах 5.5 – 5.7, посвященных анализу триады импульсов путём аппроксимации последовательностями радиально-базисных функций. Такое снижение связано:

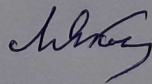
- с отсутствием пояснений на тему необходимости применения радиально-базисных функций;
- с мало понятными выкладками в разделе 5.5, по-видимому, предполагающими большой багаж знаний у читателей в области использования рассматриваемых разложений, и потому не сопровождающимися никакими пояснениями;
- с отсутствием комментариев к многочисленным графикам (рис. 5.9) в конце пятой главы.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация А.Ю. Кучмина соответствует п.9 «Положения о защите и порядке присуждения ученых степеней» и посвящена решению актуальной научной проблемы повышения эффективности решения задач идентификации и управления, сводящихся к оптимизации при ограничениях. Учет ограничений предложенными в диссертации методами позволяет сократить время получения субоптимальных решений и повысить их точность. В диссертации показано, как разработанные методы могут быть эффективно применены для идентификации и управления интеллектуальными электромеханическими системами (ИЭМС), использующими актуаторы, и, в частности, - системами управления зеркалом радиотелескопа. Универсальность разработок подтверждается их эффективным применением для статистической обработки данных контроля прочности материалов.

По актуальности, научной новизне и практической значимости диссертационная работа «Идентификация и синтез систем управления динамическими объектами с ограничениями» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Андрей Юрьевич Кучмин, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении) (технические науки).

Официальный оппонент:



профессор Высшей школы
«Механика и процессы управления»
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Л.М. Яковис

6 мая 2022 г.

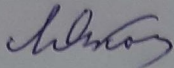
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Официальный сайт: <https://www.spbstu.ru/>
Высшая школа «Механика и процессы управления»

Почтовый адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 1-й уч. к., пом. 433-1

Телефон: +7 (812) 552-77-78, e-mail: leonid@yakovis.com

Яковис Леонид Моисеевич, д.т.н. – 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Я, Л.М. Яковис, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кучмина Андрея Юрьевича, и их дальнейшую обработку.



Подпись Л.М. Яковиса заверяю

