

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
стратегическим коммуникациям

д.э.н., профессор



П.А. Дроговоз

« 27 » 10 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Константинова Сергея Валерьевича «Решение задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 — «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Актуальность. В диссертационном исследовании Константинова С.В. рассмотрен новый подход к численному решению основной задачи теории управления – задачи общего синтеза системы управления. Для решения этой задачи автор предлагает подход, основанный на применении методов символьной регрессии. Достоинством такого подхода является возможность поиска математической структуры универсальной функции управления. Для поиска этой структуры в диссертации используются данные об известных или предварительно найденных оптимальных траекториях. Разработанный автором метод позволяет осуществлять оценку близости найденного решения к оптимальному, что является преимуществом метода. До последнего времени не существовало методов численного решения задачи синтеза системы управления, позволяющих получить оценку качества найденного решения. Актуальность диссертации обусловлена важностью разработки универсальных численных методов решения задачи синтеза системы управления и оценки качества найденных решений.

Целью диссертационной работы является разработка и программная реализация численного метода решения задачи синтеза системы управления и его применение для решения прикладных задач.

Задачи. В диссертации решены следующие основные задачи.

1) Разработан численный метод синтеза системы управления на основе аппроксимации предварительно найденных оптимальных траекторий методами символьной регрессии.

МС
Е.И.

2) Предложен метод формирования множества данных для аппроксимации обучающих оптимальных траекторий путем численного решения задачи оптимального управления для различных начальных условий.

3) Проведено сравнительное исследование численных алгоритмов безусловной оптимизации для решения задачи оптимального управления на основе прямого подхода.

4) Разработан гибридный алгоритм оптимизации для решения задачи оптимального управления на основе прямого подхода.

5) Разработан программный комплекс для решения задачи синтеза системы управления предложенным методом.

6) Получено решение прикладной задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом с помощью предложенного метода.

Структура и содержание работы. Диссертация Константинова С.В. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения. В конце каждой главы приведены выводы. Основной текст диссертации изложен на 180 страницах. Список литературы содержит 180 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы и ее новизна.

В Главе 1 приводится постановка задачи синтеза системы управления, а также приводится обзор известных методов ее решения. Акцент сделан на большей значимости общей задачи синтеза системы управления и существенных отличиях этой задачи от задачи оптимального управления.

Из числа известных методов решения задачи синтеза системы управления в работе выполнен обзор метода динамического программирования, метода на основе функций Ляпунова, метода аналитического конструирования оптимальных регуляторов, метода бэкстеппинга, метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Показаны их преимущества и недостатки. В качестве базового численного метода решения задачи синтеза системы управления в работе рассмотрен метод на основе численной многокритериальной структурно-параметрической оптимизации. Существенным недостатком данного метода является осуществление поиска на пространстве всех возможных решений и отсутствие численной метрики для оценки близости найденного решения к оптимальному.

В Главе 2 представлен обзор методов символьной регрессии и рассмотрена возможность их применения для синтеза системы управления. Особенностью методов этого класса является возможность поиска на нечисловом пространстве кодов функций. Таким образом, данные методы являются подходящим инструментом для поиска математического выражения функции управления в задачах синтеза системы управления. В работе приведен обзор наиболее известных методов символьной регрессии - метода генетического программирования, метода декартового генетического программирования, метода грамматической эволюции и метода сетевого

оператора. Для каждого из рассмотренных методов приведено его описание с примерами, а также показаны преимущества и недостатки.

Глава 3 посвящена разработанному соискателем численному методу решения задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий методами символьной регрессии. Предлагаемый подход основан на идее получения функции управления путем аппроксимации точек оптимальных траекторий. Для этого задачу синтеза системы управления предложено решать в два этапа. На первом этапе определяется множество оптимальных траекторий путем решения задачи оптимального управления для различных начальных состояний объекта управления из заданной области. На втором этапе применяется метод символьной регрессии для аппроксимации полученных оптимальных траекторий. Решением поставленной задачи является математическое выражение функции управления, найденное методом символьной регрессии при условии минимизации ошибки аппроксимации. В главе приводится подробное описание предлагаемого метода и последовательности шагов при его использовании для решения задачи синтеза. Приведен функционал качества, используемый при поиске решения. Значение данного функционала позволяет определить близость найденного решения задачи к обучающим оптимальным траекториям. По значению данного функционала можно судить о качестве найденного решения.

Глава 4 посвящена численному решению задачи оптимального управления. Представлена постановка задачи оптимального управления. Для решения этой задачи в работе предлагается использовать прямой подход на основе сведения исходной задачи к задаче конечномерной оптимизации и применении методов нелинейного программирования.

При применении методов нелинейного программирования к задачам, полученным путем редукции исходной задачи оптимального управления, дополнительной сложностью является отсутствие информации о топологических свойствах целевой функции. Для задач с фазовыми ограничениями гарантировать выполнение условий гладкости, выпуклости и унимодальности целевой функции невозможно. В этой ситуации методы нелинейного программирования, использующие градиентные методы для определения направления поиска, могут оказаться неэффективными. Для преодоления данного недостатка автором предложено использовать современные мета-эвристические поисковые методы и алгоритмы. В работе приведен обзор следующих таких методов и алгоритмов: генетический алгоритм, метод дифференциальной эволюции, алгоритм роя частиц, пчелиный алгоритм, алгоритм летучих мышей, алгоритм серых волков. Представлены результаты экспериментального сравнения эффективности

указанных методов и алгоритмов с классическими градиентными методами на примере решения прикладной задачи оптимального управления гусеничным роботом в пространстве с фазовыми ограничениями. Результатами экспериментального исследования подтверждена более высокая эффективность предлагаемых алгоритмов, в частности, пчелиного алгоритма и алгоритма серых волков.

Для повышения эффективности численного решения задачи оптимального управления предложен новый алгоритм, разработанный на основе гибридизации пчелиного алгоритма и алгоритма серых волков. В гибридном алгоритме удалось достичь взаимной компенсации слабых сторон исходных алгоритмов, уменьшив при этом число настраиваемых параметров. По результатам проведенных тестов, совокупная эффективность гибридного алгоритма оказалась выше, чем у исходных алгоритмов по отдельности.

В Главе 5 рассмотрена прикладная задача синтеза системы управления автомобилеподобным роботом в пространстве с геометрическими ограничениями. Представлена модель робота в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши и математическая постановка задачи. Для поиска решения используется предложенный численный метод синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий. На первом этапе производится замена области начальных условий на конечное множество, для каждого из элементов которого отыскивается численное решение задачи оптимального управления с помощью предложенного гибридного алгоритма. Для поиска функции управления, аппроксимирующей полученное множество оптимальных траекторий, используется метод сетевого оператора.

Проверка качества решения задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом производится на основе сравнения траекторий из различных начальных состояний, полученных с помощью найденного решения задачи синтеза, и задачи оптимального управления. Результаты вычислительного эксперимента демонстрируют успешное решение прикладной задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом с помощью предложенного метода.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Научная новизна результатов:

- 1) Разработан численный метод решения задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий.
- 2) Проведено сравнительное исследование эффективности ряда метаэвристических методов и алгоритмов, по результатам которого

предложены алгоритмы для численного решения задачи оптимального управления.

3) Разработан новый гибридный алгоритм для решения задачи оптимального управления на основе прямого подхода.

4) Разработан программный комплекс, реализующий предложенные методы численного синтеза системы управления.

Практическая значимость. Разработка проблемно-ориентированного комплекса программ для синтеза системы управления была выполнена в рамках проекта 075-15-2020-799 «Методы построения и моделирования сложных систем на основе интеллектуальных и суперкомпьютерных технологий, направленные на преодоление больших вызовов» Минобрнауки России. Предложенный метод решения задачи синтеза системы управления используется в научно-исследовательской и коммерческой деятельности, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Достоверность результатов подтверждается строгими математическими выкладками и результатами вычислительных экспериментов.

Личный вклад. Все результаты, изложенные в диссертации, принадлежат лично автору. В совместных работах автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, выборе направления исследования, программной реализации и обсуждении результатов исследований.

Замечания:

1) В Главе 4 диссертации рассмотрено несколько методов глобальной оптимизации, которые классифицированы автором как эволюционные алгоритмы. Однако такая классификация применима только к генетическому алгоритму и методу дифференциальной эволюции. Остальные методы, рассмотренные в главе, следовало бы отнести к классу популяционных алгоритмов.

2) Применяемые для решения задачи оптимального управления эволюционные и популяционные алгоритмы относятся к классу мета-эвристических методов, для которых не доказана их сходимость. Этот факт упоминается в диссертации, однако данный вопрос следовало бы рассмотреть более детально применительно к основным результатам диссертации.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации изложены в 25 публикациях, среди них: 7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 15 публикаций в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 3 публикации в трудах российских и зарубежных конференций. Зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Заключение. Диссертационная работа Константинова Сергея Валерьевича является самостоятельно выполненной, завершенной научно-квалификационной работой, содержащей научно обоснованный подход к численному решению задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий.

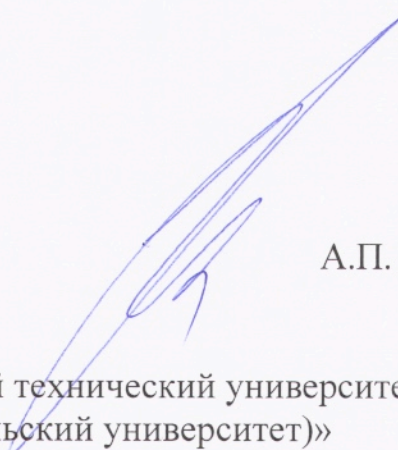
Диссертация обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения по решению задачи синтеза системы управления, которые реализованы в виде комплекса программ и применяются в научной и практической деятельности. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Диссертация Константинова Сергея Валерьевича соответствует всем требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020). Полученные соискателем теоретические и практические результаты позволяют сделать вывод о высокой научной квалификации автора.

Таким образом, Константинов Сергей Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет).

Заведующий кафедрой
систем автоматизированного
проектирования Московского
государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)
д.ф.-м.н., профессор



А.П. Карпенко

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1,
тел. (499)263-62-90, эл. почта: apkarpenko@bmstu.ru