

Учёному секретарю совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.224.01 на базе Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, к.ф.-м.н., доценту И.В. Смирнову 119333, г. Москва, ул. Вавилова д. 44, корп. 2

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации **Константинова Сергея Валерьевича «Решение задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Актуальность темы. Конструирование систем управления является одной из ключевых задач теории управления и играет важную роль в таких областях как экономика, физика, биология, экология, высокотехнологичное производство, робототехника и др. Ввиду большой сложности возникающих в данных сферах задач управления, применение классических методов вариационного исчисления для их решения становится практически невозможным. В связи с этим значительное внимание в настоящее время уделяется изучению приближенных и численных методов решения задач конструирования систем управления. При этом особое внимание уделяется таким свойствам системы управления, как оптимальность и устойчивость.

В представленной на отзыв работе автором предлагается новый численный метод синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий. Данный подход позволяет получить приближенное решение задачи синтеза, при этом полученная на основе такого решения система управления будет устойчивой к изменениям начальных состояний. Поиск решения осуществляется на основе методов символьной регрессии, в частности – метода сетевого оператора. Функционал качества построен на основе ошибки аппроксимации и позволяет сравнивать между собой разные возможные решения и определять их близость к оптимальному.

Таким образом, тема диссертационной работы Константинова С.В., связанная с разработкой численного метода решения задачи синтеза системы управления, является актуальной и востребованной.

Целью диссертационной работы является разработка численных алгоритмов решения задачи синтеза системы управления с возможностью оценки близости

найденного численного решения к оптимальному. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- Разработан численный метод решения задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий;
- Сформировано множество данных для аппроксимации из оптимальных траекторий путём численного решения задачи оптимального управления для разных начальных условий;
- Проведено сравнительное исследование численных методов решения задачи оптимального управления на основе прямого подхода для определения наиболее эффективных из них;
- Разработан гибридный алгоритм оптимизации для решения задачи оптимального управления;
- Формализован вид функционала качества аппроксимации и разработан алгоритм поиска оптимального решения на основе методов символьной регрессии;
- Разработан комплекс программ, реализующих все этапы предложенного численного метода синтеза системы управления;
- Осуществлено применение предложенного подхода и разработанного комплекса программ для решения прикладной задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом.

Методы исследования. Для достижения целей диссертации используются методы системного и сравнительного анализа в области теории оптимального управления, численных методов оптимизации, методов символьной регрессии и дифференциальных уравнений. При проведении вычислительного эксперимента применяется метод моделирования с использованием системного подхода.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследований:

- Разработан и апробирован численный метод решения задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий;
- Разработанный метод позволяет определять близость найденного решения к оптимальному;
- Разработан проблемно-ориентированный комплекс программ решения задачи синтеза системы управления. Его разработка выполнялась 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;
- Разработанный метод решения задачи синтеза системы управления используется в научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе инжинирингового центра «Интеллектуальные роботизированные системы и технологии» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова и внедрен в деятельность ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт» при проектировании и разработке программно-аппаратных комплексов;
- Разработанные алгоритмы применяются в научно-исследовательской работе роботозцентра Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук.

Достоверность результатов диссертационной работы определяется использованием строгих математических доказательств и утверждений, а также результатами проведенных вычислительных экспериментов, и подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными, опубликованными в научных изданиях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и зарубежных научных симпозиумах, конференциях и семинарах.

Публикации. Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 25 рецензируемых научных изданиях, в том числе 7 публикаций в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России, и 15 публикаций в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 180 российских и зарубежных научных работ, 1 приложения. Объем диссертации составляет 180 страниц машинописного текста.

Обзор диссертационной работы

Во введении приведено обоснование выбора темы диссертационного исследования, показана ее актуальность и значимость, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены результаты, имеющие признаки научной новизны, определены основные положения, выносимые на защиту. Также во введении аргументирована теоретическая и практическая значимость работы, перечислены научные конференции и семинары, на которых докладывались результаты исследований, показано число печатных научных работ, подготовленных и опубликованных автором за время работы по теме диссертации, и приведено краткое изложение содержания диссертации.

В главе 1 приведено описание и постановка задачи синтеза системы управления. В приведенном обзоре известных методов ее решения показано наличие существенных сложностей и ограничений их применения для решения прикладных задач. Также рассмотрен численный метод решения задачи синтеза системы управления на основе многокритериальной структурно-параметрической оптимизации, основным недостатком которого является отсутствие доказанной сходимости поиска.

В главе 2 приведено описание класса методов символьной регрессии. Важной особенностью данных методов в контексте решаемой задачи синтеза системы управления является их способность осуществлять поиск математического выражения функции управления. Далее в главе представлен обзор наиболее известных методов данного класса, рассмотрены особенности их применения для решения задачи синтеза системы управления.

В главе 3 приведено описание нового разработанного численного метода приближенного решения задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий. Предлагается двухэтапная схема решения поставленной задачи: на первом этапе производится решение задачи оптимального управления для различных начальных условий и формируется множество дискретных значений оптимальных траекторий; на втором этапе применяются методы символьной регрессии для аппроксимации найденного множества оптимальных траекторий и формировании

математического выражения функции управления. Использование критерия качества на основе ошибки аппроксимации позволяет производить оценку качества найденного решения задачи синтеза.

В главе 4 приведено описание и постановка задачи оптимального управления, показаны ее существенные отличия от задачи синтеза системы управления. Определение эффективного метода поиска решения задачи оптимального управления необходимо для реализации первого этапа алгоритма решения задачи синтеза, предложенного в главе 3, а именно – определения множества оптимальных траекторий. С этой целью в главе представлен обзор численных методов глобальной оптимизации, включая расширенное описание наиболее известных современных эволюционных алгоритмов. Приведено описание и результаты сравнительного эксперимента, по результатам которого делается вывод об эффективности и целесообразности применения эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимального управления на основе прямого подхода. Далее в главе рассмотрены методы гибридизации алгоритмов оптимизации и приведено описание нового разработанного гибридного алгоритма на основе пчелиного алгоритма и алгоритма серых волков.

В главе 5 приведены результаты применения разработанных в работе алгоритмов для решения прикладной задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом. Представлено описание математической модели с указанием ограничений, наложенных на управление и фазовое состояние объекта. Поиск решения осуществляется с помощью предложенного численного метода синтеза системы управления на основе аппроксимации оптимальных траекторий. Согласно данному методу, на первом этапе осуществляется определение множества оптимальных траекторий путем решения задачи оптимального управления для 9 начальных состояний с помощью предложенного гибридного эволюционного алгоритма. Далее применяется метод сетевого оператора для аппроксимации найденного множества и поиска математического выражения функции управления. Для полученных результатов решения прикладной задачи представлено сравнение с эталонными решениями, на основании которого сделано заключение об успешном решении задачи синтеза системы управления автомобилеподобным роботом и эффективности предложенных алгоритмов в целом.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

В приложении представлены акты о внедрении результатов диссертационного исследования в деятельность инжинирингового центра «Интеллектуальные роботизированные системы и технологии» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова и в деятельность ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт».

Общая оценка работы

Представленная на отзыв диссертационная работа Константинова С.В. «Решение задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора» является завершенным научно-квалификационным исследованием, выполненным на актуальную тему и содержащим новый научно-обоснованный подход к решению задачи синтеза системы управления. Работа содержит новые научные результаты, которые доведены до практической реализации в виде комплекса программ решения задачи синтеза системы управления.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением ее результатов в научную и коммерческую деятельность. Диссертация обладает внутренним единством и написана грамотным техническим языком. Теоретические и практические результаты получены автором лично и являются значимыми в области теории оптимального управления.

Замечания по работе

По рассмотренной работе имеется несколько замечаний:

1.Стр.5-6. Ссылка В.Г. Болтянского [12-14], как на основоположника принципа максимума Понтрягина, но в списке литературы фамилии Л.С. Понтрягина нет (кроме [51]), в которой Л.С. Понтрягин в соавторстве).

«Найденная функция управления по имеющейся информации о состоянии объекта управления должна предоставлять значение в виде вектора управления, обеспечивающего перемещение объекта из начального состояния в терминальное по оптимальной по заданному критерию качества траектории.»

«Позднее в формулировке появилось уточнение, что достижение терминального состояния объекта управления должно обеспечиваться для любого начального состояния из всего пространства состояний»

«...использовалось программное управление без реализации принципа обратной связи. Реализация такого программного управления производилась на основе решения задачи оптимального управления Найденная таким образом функция управления является функцией от времени и зависит только от состояния объекта управления в начальный момент времени, а не от текущего. В отличие от задачи оптимального управления, решение задачи общего синтеза системы управления реализует принцип обратной связи и позволяет найти функцию управления от координат пространства состояний объекта, при этом начальное состояние объекта уже не будет играть роли и может быть любым.»

Не точно. В общем случае не верно.

2.Стр. 6. «...такое решение будет обеспечивать достижение цели управления по траектории близкой к оптимальной, т.е. доставлять оптимальное значение критерия качества.»

«Движение близкое к оптимальной» не может обеспечивать «оптимальное значение критерия качества».

3.Стр. 6-17. «Рассмотрим постановку задачи...»

Следовало бы сделать предположения о существовании решения уравнения (1.1) и об управляемости этого объекта .

4.Стр. 17. Выражение (1.8).

По сформулированным выше условиям правильно было бы вместо $\min$ записывать $\inf$.

5.Стр. 18. «Принцип оптимальности, сформулированный Р. Беллманом [9] и лежащий в основе метода динамического программирования, определяет зависимость системы управления в любой момент времени только от текущего состояния системы.»

Не верно.

6.Стр.20. Формула (1.12)

Откуда появилось управление $u \in [u^+, u^-]$. Краевое условие для (12) не определено.

7.Стр.22. «...что использование данного метода позволяет получить множество значений векторов управлений для множества значений векторов состояний, и не позволяет получить структуру самой функции управления, описывающей данную зависимость»

Не верно

«...получается матрица оптимальных управлений, размерность и точность которой прямо пропорциональны и зависят от числа точек разбиения множества начальных состояний и применения методов аппроксимации найденных решений.»

«Разбиения множества начальных состояний»? Где это доказана «прямая пропорциональность»?

8.Предлагаемый в работе метод синтеза системы управления базируется на использовании множества траекторий, полученных эволюционными алгоритмами, которые не дают строго оптимальных решений. Найденная ими функция управления может быть не оптимальной.

Хотелось бы увидеть в диссертации более подробный анализ оптимальности полученного решения задачи синтеза;

9.Одним из преимуществ предложенного метода решения задачи синтеза выносится возможность оценки близости найденного решения к оптимальному на основе ошибки аппроксимации.

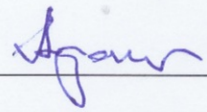
Данная оценка не используется в вычислительном эксперименте как критерий останковки алгоритма поиска по достижению желаемой точности.

Следует отметить, что указанные замечания не являются существенными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение

Диссертационная работа «Решение задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора» выполнена на высоком научном уровне, соответствует паспорту специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Константинов Сергей Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор,
ординарный профессор
департамента прикладной математики
Московского института электроники и
математики им. А.Н. Тихонова НИУ ВШЭ

 / В.Н. Афанасьев
« 16 » ноября 2022 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

<https://www.hse.ru/>

+7 (495) 771-32-32; +7 (495) 531-00-31

СПЕЦИАЛИСТ ПО
КАДРОВОМУ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
ОТДЕЛА ПО КАДРОВОМУ АДМИНИСТРИРОВАНИЮ
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛА

Подпись завер

