

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Шмалько Елизаветы Юрьевны «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Диссертация Шмалько Е.Ю., согласно представленному тексту, посвящена созданию нового подхода к решению задач оптимального управления робототехническими системами в классе реализуемых систем. Полученные результаты представляют интерес для широкого класса прикладных задач управления роботами. Подход реализуется в два этапа. На первом этапе решается задача синтеза управления, а на втором этапе решается задача оптимального управления. Исходная задача оптимального управления переформулируется в конечномерную оптимизационную задачу, в которой ищется конечное число параметров, влияющих на движение объектов, при этом критерий оптимизации исходной задачи оптимального управления сохраняется. Данный подход в диссертации назван принципом синтезированного оптимального управления. Особенностью представленного подхода является возможность применения современных вычислительных методов машинного обучения с целью автоматизации поиска искомых законов управления.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений.

Тема диссертационного исследования соответствует заявленной специальности.

Во введении приведены все формальные необходимые разделы, которые также представлены и в автореферате. Описывается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе приведены формальные постановки задач оптимального управления, объектами которых являются мобильные роботы и группы роботов, и обзор существующих подходов к их решению. Сначала представлена задача оптимального управления, рассматриваются как непрямой подход к ее решению на основе принципа максимума Понtryгина, так и прямой подход, на основе аппроксимации функции управления и оптимизации параметров аппроксимирующей функции, указаны трудности реализации получаемых законов управления как функции времени. Далее

рассмотрена задача синтеза оптимального управления, отмечается, что для прикладных объектов управления именно задача синтеза имеет актуальность, так как обеспечивает управление по состоянию, отмечены существующие трудности решения задачи синтеза оптимального управления. При этом, автор обращает внимание на тот факт, что на практике, особенно в области робототехники, решение задачи синтеза управления не всегда актуально, поскольку, с одной стороны, решение общей задачи синтеза, включая различные фазовые ограничения, является вычислительно сложным и не всегда выполнимым, но при этом робототехнические системы, исследуемые в диссертации, функционируют в довольно изменчивых, и не всегда заранее определенных условиях, что требует перерасчетов оптимальных режимов управления. В таких ситуациях решение задачи синтеза становится не актуальным, и требуется разработка более гибких адаптивных подходов, что подтверждает актуальность диссертационного исследования.

Во второй главе представлен анализ практической реализуемости систем управления, получаемых в результате решения задачи оптимального управления, и предложен принцип синтезированного оптимального управления, представлена общая формулировка предложенного подхода, рассмотрены этапы его численной реализации, приводится обзор методов для решения поставленных в рамках подхода задач. Все рассматриваемые в диссертации результаты исследований подробно описаны и приведены необходимые формальные соотношения. В дальнейших главах диссертации рассматриваются различные аспекты предложенного подхода на примерах использования его для управления робототехническими системами.

Третья глава диссертации посвящена новому направлению в управлении, названному машинное обучение управления. В диссертации представлена задача машинного обучения управления как задача поиска неизвестной функции управления, приводятся теоретические обоснования возможности применения современных методов машинного обучения, таких как методы символьной регрессии, которыми автор, согласно представленному списку публикаций, занимается уже много лет, для разработки систем управления, что позволяет автоматизировать процесс получения искомых законов управления. В диссертации представлены собственные разработанные методы символьной регрессии и приведены вычислительные примеры применения разрабатываемых методов машинного обучения для решения задачи синтеза системы стабилизации в автоматическом режиме.

В четвертой главе представлена прикладная часть работы, сформулированы и представлены численные решения различных задач оптимального управления мобильными колесными и летающими автономными роботами. Приведены как результаты вычислительных экспериментов, проводимых для моделей рассматриваемых объектов, так и результаты натурных

экспериментов, свидетельствующие о том, что результаты, полученные с помощью предлагаемого принципа и представленные в диссертации, работают на реальных робототехнических объектах.

В заключении сформулированы основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту. В диссертации представлены оригинальные результаты, главные из которых заключаются в формулировке нового подхода к разработке систем управления робототехническими объектами в рамках реализуемых систем и предложенные численные методы машинного обучения, позволяющие автоматизировать процесс разработки систем управления.

В качестве достоинства следует отметить большое количество публикаций диссертанта, особенно в журналах высокого квартиля. Судя по публикациям и по примерам, представленным в диссертации представленный подход получен автором в результате многочисленных исследований различных задач управления для робототехнических объектов и в результате доведен от теоретических выкладок и вычислительных экспериментов до реализации на реальном объекте.

Основным недостатком работы является то, что автор переформулировал исходную задачу оптимального управления. Первоначально решается задача синтеза системы стабилизации, а далее задача параметрической оптимизации. Предпосылкой для такой переформулировки, по мнению автора, является необходимость работы в рамках реализуемых систем.

В качестве недостатков также следует отметить, что

- В названии диссертации не прослеживаются все цели работы, в частности связанные с применением методов машинного обучения для автоматизации расчетов.
- Проблема оптимального управления роботехническими системами в среде со сложными внешними характеристиками (например, управление беспилотным транспортным средством во время снегопада, при наличии множественных препятствий на дорогах и т.д.) обуславливает необходимость применения методов машинного зрения, алгоритмов распознавания образов и др., в том числе, использующих кластеризацию (например, нечёткую кластеризацию объектов-препятствий). Подобные алгоритмы позволяют оценить специфику окружающего пространства, осуществить поиск наилучших и безопасных маршрутов объезда препятствий, реализовать интеллектуальное маневрирование. Вместе с тем, подобные проблемы в диссертации не рассматриваются, что может несколько ограничить практическое применение предлагаемых методов и систем.

- В рамках сформулированного принципа синтезированного оптимального управления на втором этапе в разделе 2.2.2 предполагается нахождение оптимального расположения значения координат точки устойчивости для каждого заданного интервала времени управления. Следовало бы рассмотреть вопрос определения количества требуемых интервалов, влияние параметров разбиения на значение критерия качества.
- Для поиска оптимального расположения точек равновесия автор использует в основном эволюционные и популяционные алгоритмы, не имеющие строго обоснования сходимости, поэтому следовало бы говорить в данном контексте о субоптимальных решениях. Предложенные автором методы структурно-параметрического синтеза также в основе оптимизационного поиска используют эволюционный генетический алгоритм, требующий дополнительных обоснований, что найденное решение является оптимальным.

В целом указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы.

Диссертационная работа Шмалько Е.Ю. является самостоятельным завершенным научным исследованием в области робототехники, разработки систем управления, численных методов, алгоритмизации и создания компьютерных программных комплексов, выполненных автором на высоком научно-техническом уровне. Основные результаты, приведенные в диссертации получены впервые и лично автором. Основные положения докладывались на многочисленных всероссийских и международных профильных конференциях и опубликованы в ведущих научных изданиях, на предложенные методы получены 15 свидетельств о регистрации программ, а также опубликована одна монография в ведущем иностранном научном издательстве Springer. Кроме того, на представленный подход и полученные законы управления получены, представленные в диссертации, акты о внедрении в прикладных профильных научно-исследовательских организациях, таких как Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника МГТУ им. Н.Э. Баумана», ООО «Научно-производственное объединение НаукаСофт», ФАУ ЦАГИ, АО «ВПК «НПО Машиностроения».

Совокупность научных положений, полученных в диссертации, можно квалифицировать как крупное научное достижение. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации. Отмеченные выше замечания не снижают общей высокой оценки результатов диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Е.Ю. Шмалько «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» соответствует требованиям ВАК Российской

Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», а ее автор Е.Ю. Шмалько заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор, профессор РАН,  
главный научный сотрудник,  
Отделение теоретической экономики и математических исследований,  
Лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Центральный экономико-математический институт РАН

Акопов А.С.



14.10.2024

тел.: +7(499)129-16-00

e-mail: [akopovas@umail.ru](mailto:akopovas@umail.ru)

05.13.11 - Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (техн. науки)

ФГБУН «Центральный экономико-математический институт РАН»,

Лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации:

117418, Москва, Нахимовский пр. 47,

тел.: +7(499)129-16-00

e-mail: [akopovas@umail.ru](mailto:akopovas@umail.ru)

Подпись Акопова А.С. удостоверяю:

Ученый секретарь ЦЭМИ РАН

к.э.н.

А.И. Ставчиков

