

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию  
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»

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация Е.Ю. Шмалько посвящена проблеме получения оптимальных законов управления робототехническими объектами в классе реализуемых систем в автоматическом режиме.

Робототехника в настоящее время является бурно развивающимся направлением и представлена практически во всех сферах народного хозяйства. Появление большого количества и разнообразия роботов, обусловили необходимость разрабатывать новые формализованные подходы к управлению этими новыми объектами с учетом их особенностей таких как наличие большого количества фазовых ограничений в виде препятствий, возможность динамического изменения среды в процессе функционирования и т. п. Созданием систем управления для таких объектов занимаются, как правило, небольшие коллективы специалистов, в круг задач которых входит полный цикл разработки. системы управления. Традиционные способы расчета систем управления в робототехнике, не всегда применимы в силу сложности моделей. Поэтому тема исследования, посвященная разработке методов, позволяющих автоматизировать процесс получения законов управления робототехническими системами является актуальной как с научной, так и практической точки зрения.

### **Анализ структуры и содержания диссертации**

Диссертационная работа Е.Ю. Шмалько объемом 316 с. включает введение, 4 главы, заключение, список литературы из 236 источников и приложений, включающих список опубликованных работ с указанием личного вклада автора в работах, написанных в соавторстве, свидетельства автора о регистрации программ на разработанные методы и акты о внедрении результатов диссертационной работы.

**Во введении** обоснованы актуальность и новизна диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы теоретическая и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.



**В первой главе** диссертации рассматриваются задачи, выполняемые робототехническими системами, которые могут быть сформулированы в виде задач оптимального управления, автором представлены их математические формулировки. Робототехническая система, как один робот, так и группа роботов, автором описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений со свободным вектором управления в правых частях. В качестве особенностей задач в робототехнике автор приводит возможные фазовые ограничения, включая как статические области, куда робот не должен попадать, возможные динамические фазовые ограничения, определяющие отсутствие столкновений роботов в случае группового взаимодействия, а также особые зоны, которые робот должен проехать в обязательном порядке. Автором приводятся различные возможные критерии качества управления. Предложенные автором формулировки представляют практический интерес при разработке законов управления роботами, например, для нахождения оптимального пути в текущих реальных условиях для точного достижения заданных терминальных условий, задачи предотвращения столкновений со статическими и динамическими препятствиями, задачи взаимодействия с другими объектами управления.

Автор приводит аналитический обзор методов теории оптимального управления с оценкой их применимости к решению поставленных задач. Указываются трудности реализации получаемых законов управления в виде функции времени, с одной стороны, и сложности получения общих решений в классе функций от состояния объекта управления, с другой стороны.

**Вторая глава** посвящена обоснованию и описанию предложенного нового подхода, названного принципом синтезированного оптимального управления. Предложенный автором подход представляет интерес для робототехники поскольку направлен на поиск оптимального закона управления в классе реализуемых систем. В отдельном разделе представлен анализ свойства реализуемости модели объекта управления, автор формализует понятие этого свойства, которое соответствует ненарастанию ошибки между состоянием реального объекта и состоянием, определяемым по модели объекта, в процессе функционирования на определенном интервале. Приводятся предположения о существовании данного свойства у объектов управления с введенной системой стабилизации. Автором предложен двухэтапный способ реализации предложенного принципа синтезированного оптимального управления, когда на первом этапе решается задача синтеза системы стабилизации объекта, а на втором этапе решается задача оптимального расположения



точек равновесия, переключаемых с заданным интервалом. Такой двухэтапный подход представляет безусловный практический интерес, поскольку, как указывает автор, второй этап конечномерной оптимизации может быть реализован непосредственно на бортовом вычислителе робота, позволив произвести перерасчет оптимального расположения точек равновесия в случае изменения среды функционирования.

Автор приводит обзор методов решения каждой из поставленных задач двух этапов предложенного подхода. Преимуществом данного подхода является возможность использовать такие известные и хорошо формализованные методы решения задач синтеза как бэкстэппинг, аналитическое конструирование оптимальных регуляторов или традиционные ПИД и ПИ регуляторы.

Автор предлагает и новые современные подходы, основанные на машинном обучении, мотивируя их выбор возможностью автоматизации процесса синтеза закона управления.

Основным содержанием **третьей главы** является формализация и обоснование применения методов машинного обучения в разработке систем управления и описание разработанных автором методов машинного обучения на базе символьной регрессии.

**Четвертая глава** направлена на анализ возможностей применения предложенного принципа в робототехнике. Приведены вычислительные примеры для различных задач, представлены результаты моделирования и исследования поведения рассматриваемых объектов в условиях неопределенностей моделей и начальных условий. Даны сравнения с прямым подходом к расчету оптимальных законов управления. Также, согласно представленным результатам, успешно реализованы и натурные эксперименты для колесного робота с дифференциальным приводом. Разработанные автором комплексы программ для автоматического синтеза систем стабилизации робототехнических объектов, и расчета оптимальных режимов управления ими представляют значительный научный и практический интерес, о чем также свидетельствуют представленные акты о внедрении результатов диссертационной работы.

В **заключении** обобщаются основные результаты диссертации. В приложениях приведены дополнительные материалы по теме исследования, касающиеся программной реализации разработанных методов символьной регрессии, а также авторские свидетельства на программы и акты о внедрении.



## **Научная новизна, обоснованность положений, результатов и выводов.**

Научная новизна представленной работы состоит в том, что автором создан новый методологический подход к разработке законов управления робототехническими объектами, разработана двухэтапная архитектура реализации предложенного принципа синтезированного оптимального управления, разработаны новые численные методы на основе машинного обучения. Обоснованность и достоверность основных положений подтверждается не только путем моделирования, но и с помощью экспериментов с реальными мобильными роботами.

Результаты диссертации достаточно подробно представлены в изданной монографии, и достаточно весомом количестве публикаций, включая 7 публикаций в международных журналах первого и второго квартиля.

Автореферат адекватно отражает основные положения и результаты диссертационного исследования.

## **Замечания по диссертации.**

1. Выглядит несколько странно, что при анализе литературы не упомянута широко известная монография Я.З. Цыпкина "Адаптация и обучение в автоматических системах" - М.: Наука, 1968, тесно связанная с темой диссертационного исследования. Несмотря на почтенный возраст этой книги, многие изложенные в ней идеи не устарели и по сей день.
2. Теоретическая часть работы, связанная с исследованием введенного свойства реализуемости, которым должна обладать модель объекта управления, чтобы расчетные значения по модели не расходились бы с реальными, требует более глубокой математической проработки. При решении задачи оптимального управления через синтез системы стабилизации как предложено в представленном подходе необходимо дополнительно исследовать вопрос потерь исходного функционала качества в сравнении с исходной задачей. В работе не сделано никаких предположений об ограниченности и непрерывности функционалов, о свойствах функции правых частей объекта управления (равномерность, ограниченность, управляемость).
3. Сравнение автором результатов работы, предложенных в третьей главе машинных методов синтеза системы стабилизации с известными подходами, представленными в обзоре методов во второй главе, позволило бы более объективно судить об их теоретической значимости.

4. Не акцентировано внимание на реализации предложенного подхода в режиме реального времени с соблюдением условий перерасчета положения точек равновесия на борту объекта.

### **Заключение по диссертационной работе.**

Перечисленные замечания не снижают научную ценность представленной диссертационной работы и ее положительную оценку в целом. Считаю, что диссертационное исследование Е.Ю. Шмалько «Принцип синтезированного оптимального управления в робототехнических системах» представляет собой законченное научное исследование, выполнено автором самостоятельно, отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, содержит новые научно обоснованные методологические, технические и алгоритмические решения, внедрение которых повышает научно-технический потенциал нашей страны, а ее автор, Шмалько Елизавета Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Официальный оппонент

заведующий кафедрой прикладной математики,

Арзамасского политехнического института (филиала)

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный

технический университет им. Р.Е. Алексеева»,

доктор физико-математических наук,

профессор  Пакшин Павел Владимирович

24 октября 2024 г.

тел.: +7 (910) 1224189, e-mail: [pakshinpv@gmail.com](mailto:pakshinpv@gmail.com)

Подпись Пакшина Павла Владимировича заверяю:

Директор  Глебов Владимир Владимирович

