

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, профессора  
Гапонова Игоря Юрьевича  
на диссертационную работу Носикова Максима Владимировича  
«Системы управления внутрикамерными  
радиационно-стойкими манипуляторами»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)»

### Актуальность темы

В настоящее время появляется все больше индустриальных и инженерных задач и приложений, требующих применения дистанционно управляемых систем. Подобные задачи включают в себя работу с потенциально опасными и вредными для здоровья человека веществами и объектами, управление роботами в удаленных средах (открытый космос и подводные системы), дистанционное управление роботами в опасной или труднодоступной обстановке (исследование шахт и пещер, инспекция сводов и крыш зданий и опор мостов), манипулирование и сборка микроскопических объектов (производство MEMS-компонентов и микроэлектроники, приложения биотехнологии и медицины), и многие другие. Особое место в приложениях телеуправляемых робототехнических систем традиционно занимает атомная промышленность, где дистанционно управляемые манипуляторы применяются для утилизации ядерных отходов, работы внутри герметичных камер, разборки объектов инфраструктуры АЭС и многих других задачах. Острая потребность в разработке подобных роботов обуславливается как необходимостью иметь надежные системы для ликвидации последствий происшествий на АЭС (сложность применения существующих систем была в очередной раз подчеркнута при работах после аварии на АЭС Фукусима-1 в 2011 г.), так и в постоянной необходимости в плановых работах по утилизации ядерных отходов, обеззараживанию и разборке АЭС, одним из последних примеров которого служит масштабный проект на Торпском ядерном перерабатывающем заводе в британском Селлафилде, который займет десятилетия. Таким образом, актуальность разработки систем дистанционного управления радиационно-стойкими манипуляторами, описанных в данной диссертации, не вызывает никаких сомнений.

## Оценка содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов по работе в заключении, списка библиографических источников из 107 наименований, содержит 189 страниц основного текста (в т.ч. 74 рисунка и 30 таблиц) и 9 страниц приложений.

Основное содержание работы опубликовано в 11 печатных работах, в том числе 2 – в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, 3 статьи индексированы в международной базе цитирования Scopus. Опубликованные материалы отражают основное содержание диссертации. В списке литературы приведены научные работы за период с 1967 по 2019 год. По результатам работы получен 1 патент Российской Федерации на полезную модель, оформлены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Публикации в открытой печати в достаточной степени раскрывают содержание диссертации и характеризуют личный вклад автора.

В главе 1 автор приводит анализ современного состояния автоматизации технологических процессов в герметичных камерах. Описаны типовые операции по перемещению различных объектов, а также приведены характеристики и кинематические схемы наиболее часто используемых манипуляторов, а также режимы и задачи управления ими. Глава завершается описанием отдельных составляющих роботизированной системы, таких, как задающие органы, программная архитектура и системы технического зрения. Таким образом, данная глава содержит необходимый экскурс в область приводимого исследования и готовит почву для описания конкретного решения, представленного автором в последующих частях работы.

Глава 2 содержит основные научные результаты работы и освещает сразу несколько основных тем. В секции 2.1 приведено детальное описание исполнительного органа манипулятора как объекта управления. Указываются его детальные характеристики и параметры, необходимые для последующего моделирования: кинематическая структура, массо-инерционные характеристики, а также параметры силовой и сенсорных частей робота. Часть 2.2 посвящена синтезу структуры системы управления (СУ) манипуляторами. В частности, описаны основные задачи и режимы работы СУ, а также требования к ней, приведены диапазоны постоянных времени в системе, а также отдельно описываются субконтур системы управления. Глава 2.3 посвящена описанию математического аппарата, используемого для моделирования и реализации алгоритмов управления 6-степенным исполнительным органом манипулятора. В частности, рассмотрены решения прямой и обратной задач кинематики по

положению и скорости для робота с выбранными параметрами, а также приведены детальные описания методов решения этих задач. Данная секция завершается описанием алгоритмов обхода точек и выполнения траекторий манипулятора. Часть 2.4 посвящена описанию синтеза программной архитектуры системы управления устройством и приводит ее детальное описание вместе с блок-схемами реализации отдельных ее частей в среде ROS. В секции 2.5 приводится описание человеко-машинного интерфейса системы управления. В частности, выполнен анализ существующих структурных и алгоритмических способов для обеспечения управляемости манипулятора по всем степеням подвижности, а также предложен комбинированный способ управления путем сочетания двух задающих органов. В заключающих частях секции автор также описывает алгоритм адаптации характеристики задающего органа в зоне малых отклонений и управляющий модуль. В части 2.6 автор приводит описание методов синтеза алгоритмов автоматизированного позиционирования схвата манипулятора на основе данных системы технического зрения (СТЗ). Особое внимание уделяется таким вопросам, как описание типичных проблем СТЗ, структуры СТЗ внутрикамерного манипулятора, алгоритмов идентификации QR-кодов на объекте манипулирования с помощью видеокамер, а также методы трансформации систем координат камеры к базе робота. Автор также приводит экспериментальные данные распознавания объектов на некоторых изображениях. Наконец, вторая глава завершается в секции 2.7 описанием системы тренажерного обучения для повышения эффективности использования системой дистанционного управления неподготовленными пользователями. Автор приводит детали о видах учебно-тренировочных заданий в системе, а также предлагает описание системы анализа действий оператора.

3-я глава содержит экспериментальные результаты исследования предлагаемой системы. В частности, автор описывает конструктивное исполнение и приводит результаты лабораторных испытаний опытного образца манипулятора МР-48, проводит анализ результатов работы системы технического зрения и системы тренажерного обучения, а также приводит результаты испытаний и опытной эксплуатации исполнительного органа и системы управления в условиях действующего производства.

Автореферат соответствует содержанию работы и отражает ее основные положения.

## **Научная новизна, достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования**

В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты следующие положения:

1. Синтезирована новая структура системы управления манипулятором и разработан человеко-машинный интерфейс «оператор-манипулятор» для управления 6-степенным манипулятором с кинематическими парами вращательного типа, с учетом специфических требований к условиям эксплуатации.

2. Предложен способ комбинированного адаптивного управления манипулятором от двух задающих органов типа «многокоординатный джойстик», на основе которого реализованы режимы управления по заданной траектории движения либо по текущим командам оператора.

3. Предложен новый алгоритм формирования управляющих воздействий на приводы манипулятора (в автоматизированном режиме работы), отличающийся тем, что в уравнение вычисления управляющих воздействий введены матрицы оценки приближения вектора состояния манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающего органа.

4. Разработана архитектура и алгоритмы подсистемы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, позволяющие обеспечить качественную подготовку персонала к работе с роботам-манипуляторами.

## **Практическая ценность диссертационной работы**

Практическая значимость диссертации подтверждается тем, что в рамках опытно-конструкторских работ по заказу ФГУП ПО «Маяк» был спроектирован и изготовлен опытный образец радиационно-стойкого манипулятора, защищенный патентом РФ.

В состав роботизированной системы также вошли исследованная в работе система управления и технического зрения. Работоспособность манипулятора «МР-48» была подтверждена экспериментально при эксплуатации устройства в автоматическом и автоматизированном режимах.

Представленные в Приложениях документы о внедрении результатов исследования, а также подробные листинги и структурные схемы разработанного программного обеспечения, подтверждают применимость на практике предложенных в диссертации научных положений и разработок.

## **Замечания**

К работе имеются следующие замечания:

1. На мой взгляд, диссертация была бы полнее, если бы содержала большее количество графиков и экспериментальных данных. На данный момент в тексте приводится только оценка движения робота и пример управляющих воздействий до/после обучения, из-за чего трудно сделать заключение о всесторонности оценки работы системы.
2. Так как значительная часть работы посвящена синтезу новой структуры системы управления (СУ), то хотелось бы видеть более подробный и глубокий анализ СУ, в частности, результаты моделирования работы системы с использованием приведенных динамических уравнений робота в режиме телеуправления, экспериментальные результаты движения робота с данной СУ и в сравнении с другими системами управления, а также анализ устойчивости.
3. Так как автор предлагает способ комбинированного адаптивного управления системой на основе данных с разных устройств, не до конца ясно, как будет работать СУ, например, при зашумлении данных на одном канале, что особенно важно при высоких уровнях радиации. Было бы интересно увидеть графики движения робота по различным траекториям, особенно трехмерным, в режиме дистанционного управления.
4. Очень важным для устойчивой работы системы является качество алгоритмов технического зрения (ТЗ), используемых в работе. Тем не менее, предложенная система ТЗ исследована только в лабораторных условиях, а некоторые практические вопросы освещены, на мой взгляд, недостаточно – например, устойчивое определение объектов манипулирования при различных ориентациях видеокамеры (когда QR-код виден лишь частично).

## **Общий вывод по диссертационной работе**

Диссертационная работа Новикова М.В. представляет собой самостоятельную, хорошо структурированную и организованную научно-исследовательскую работу, направленную на решение важной проблемы – разработку систем управления радиационно-стойкими манипуляторами, остро необходимыми современной атомной промышленности. Хотелось бы отдельно отметить детальность и стройность описания таких аспектов разработки дистанционно управляемых роботизированных комплексов, как требования к управляющему ПО, базе данных, описание структуры манипуляторов и задающих устройств и многие другие, благодаря чему диссертационная работа имеет высокую методическую ценность для последующих исследований. Считаю, что

