

На правах рукописи



**ГОРНОСТАЕВ** Игорь Вячеславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ  
РОБОТАМИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владивосток  
2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» и ФГБУН «Институт автоматике и процессов управления» ДВО РАН.

Научный руководитель: **Филаретов Владимир Федорович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Колюбин Сергей Алексеевич**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
факультета систем управления и робототехники  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

**Шеленок Евгений Анатольевич**  
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры  
автоматики и системотехники ФГБОУ ВО  
«Тихоокеанский государственный университет»,  
г. Хабаровск.

Ведущая организация: ФГБУН Институт проблем механики им.  
А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
г. Москва.

Защита состоится «30» марта 2023 г. в 14:00 на заседании  
диссертационного совета 99.0.073.03 на базе ФГБУН «Институт автоматике и  
процессов управления» ДВО РАН, ФГАОУ ВО «Дальневосточный  
федеральный университет», ФГБУН «Институт проблем морских технологий»  
ДВО РАН по адресу: 690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, пос. Аякс,  
кампус ДВФУ, корпус В, 7 уровень, конференц-зал «Сопка».

С диссертацией можно ознакомиться Научной библиотеке ДВФУ по  
адресу г. Владивосток, о. Русский, кампус ДВФУ, корпус А, 10-й этаж и на  
сайте [https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=108859788&IBLOCK\\_ID=1156](https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=108859788&IBLOCK_ID=1156)

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 99.0.073.03,  
доктор технических наук, профессор



Жирабок Алексей Нилович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Повышение производительности современного промышленного производства связано с развитием средств автоматизации в целом и промышленной робототехники, в частности. Для увеличения эффективности применения робототехнического оборудования требуется предельное возрастание скорости выполнения технологических операций (ТО), при которой должна сохраняться заданная точность движения рабочих инструментов (РИ) по заданным траекториям. С целью сохранения точности при одновременном повышении скорости движения манипуляционных роботов (МР) требуется учитывать изменения их нагрузочных параметров, а также ограничения усилительных и исполнительных элементов, поскольку с увеличением скорости РИ одновременно возрастают негативные эффекты динамического взаимовлияния между степенями подвижности МР, для компенсации негативных последствий которых требуется увеличивать сигналы управления, часто приводящие к насыщению усилителей и приводов МР. Кроме того, точность работы МР резко снижается, когда некоторые их степени подвижности неожиданно выходят на свои ограничения или их текущие конфигурации подходят к особым положениям, характеризуемым неоднозначностью в решении обратных задач кинематики (ОЗК). В результате в отдельных степенях подвижности МР даже возникают заранее непредсказуемые реверсы, помимо повышения динамических ошибок управления приводящие к возникновению аварийных ситуаций, которые должны быть полностью исключены, в том числе и за счет использования избыточных степеней подвижности МР, одновременно увеличивающих их рабочие области. Однако существующие методы решения ОЗК для кинематически избыточных МР либо не гарантируют исключения появления реверсов во всех их степенях подвижности, либо слишком сложны с вычислительной точки зрения, что существенно ограничивает область применения современной робототехники.

В результате появляются важные и актуальные задачи разработки таких новых технических решений и методов синтеза систем управления (СУ) МР, которые позволили бы обеспечить предельно быстрое, но точное движение их РИ, исключаяющее насыщения всех электроприводов МР, а также входы их механизмов в ограничения и в особые положения, одновременно увеличивая рабочие области многозвенников за счет избыточных степеней подвижности.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в описание динамики и создание СУ МР внесли отечественные и зарубежные ученые С.Л. Зенкевич, Д.Е. Охоцимский, Ю.В. Подураев, Е.П. Попов, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, S. Dubowsky, B. Siciliano, D. Stokic, M. Vukobratovic и другие. В настоящее время работы по созданию новых СУ МР ведутся во многих российских научных организациях: в институте механики МГУ, ИПМ им. Келдыша,

ИПМех им. Ишлинского, ИПУ им. Трапезникова, МГТУ им. Баумана, МГТУ СТАНКИН, НГТУ, СевГУ, ЦНИИ РТК, а также в ведущих зарубежных институтах и университетах: в Массачусетском технологическом институте, университете Карнеги-Меллона, университете Пенсильвании, Мичиганском университете, технологическом институте Джорджии, Стэнфордском университете и др.

Многие авторы отмечают, что для повышения производительности современных МР требуется разрабатывать новые методы формирования программных сигналов, задающих режимы движения МР. Известные методы формирования программных скоростей движения РИ МР основаны на применении различных профилей скорости, оптимальных по быстродействию и адаптивных СУ. Но все они либо не обеспечивают высокую производительность промышленного оборудования, либо могут быть применены только для решения частных задач. Для формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР применяются аналитические и численные методы, а также методы машинного обучения, использующие нейронные сети, нечеткую логику и генетические алгоритмы. Но их применение ограничено конструкциями МР, вычислительной сложностью или невозможностью обхода МР их нежелательных положений.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертации является создание новых решений и методов синтеза СУ МР, способных обеспечить предельно высокую скорость перемещения их РИ в процессе выполнения ТО без снижения заданной динамической точности, а также без входа механизмов МР в ограничения и особые положения с одновременным увеличением их рабочих областей.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, которые обеспечивали бы их движение на предельно высоких скоростях без ухудшения заданной динамической точности с учетом ограничений входных сигналов их исполнительных элементов.

2. Разработать метод построения гладких пространственных траекторий и автоматического задания режимов движения РИ МР по этим траекториям на предельно высоких скоростях с сохранением заданной динамической точности с учетом взаимовлияний между всеми их степенями подвижности и ограничений на входные напряжения электроприводов.

3. Разработать метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности МР, которые позволят сохранить требуемую динамическую точность управления с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности МР и возможных появлений особых расположений их звеньев в пространстве.

#### **Научная новизна.**

1. Предложен метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, гарантирующий точное выполнение ТО с учетом

возможных изменений параметров нагрузки их электроприводов и ограничений мощности их исполнительных элементов за счет обеспечения постоянной работы этих элементов в преднасыщенном состоянии.

2. Предложен метод синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления за счет непрерывной работы хотя бы одного из электроприводов МР вблизи зоны насыщения и без входа в нее.

3. Предложен метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления за счет использования избыточных степеней подвижности для исключения в приводах этих МР нежелательных реверсов, связанных со входом манипуляторов в особые положения и аварийными остановками в процессе выполнения ТО при подходе некоторых степеней подвижности к ограничениям или РИ – к границам рабочих областей МР.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** На основе представленных в диссертации методов можно создать высокоскоростные и высокоточные СУ МР, которые позволят повысить производительность многих МР. Как показали проведенные исследования, эти СУ легко реализуются на типовом оборудовании при использовании зарегистрированных программ для ЭВМ.

Полученные в диссертации результаты уже были использованы при выполнении научно-исследовательских работ в научно-образовательном центре «Автоматизация и управление высокотехнологичными производствами» Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) по государственному заданию Министерства образования и науки РФ №2.11216.2018/11.12, а также в учебном процессе ДВФУ при подготовке бакалавров по направлению 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и при выполнении грантов РФФИ (№ 20-38-70161, 20-08-00701, 18-08-01204, 16-38-00187, 16-29-04195, 16-07-00718, 16-07-00300). Эти результаты также планируется использовать в ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) при управлении МР «Kuka».

**Методы исследования.** В процессе решения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, дифференциальных уравнений, теоретической механики, методы аналитического решения ОЗК для МР, а также методы численного моделирования разработанных СУ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, обеспечивающих точное и предельно быстрое выполнение ТО при наличии ограничений на мощности исполнительных элементов этих МР и при изменениях параметров нагрузки их электроприводов.

2. Метод синтеза систем для автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по гладким пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления при наличии взаимовлияний между всеми степенями подвижности МР и ограничений мощности их исполнительных элементов.

3. Метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, обеспечивающих сохранение требуемой динамической точности управления при наличии конструктивных ограничений во всех степенях их подвижности и особых положений звеньев этих МР и расширяющих их рабочие области.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** работы обеспечивается корректным применением использованных в работе теоретических методов, а также подтверждается полученными в диссертации результатами численного моделирования и проведенными экспериментами.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации апробировались и обсуждались на Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект» (Железногорск, 2015 и 2017 гг.), International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (Джакарта, Индонезия, 2016 г.), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Санкт-Петербург, 2017 г.), международных научно-технических конференциях «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии» (Омск, 2017, 2018 и 2019 гг.), Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (Севастополь, 2017 г.), Всероссийской конференции «Технические проблемы освоения мирового океана» (Владивосток, 2017 г.), International Russian Automation Conference (Сочи, 2019 г.), International Multi-Conferences on Industrial Engineering and Modern Technologies (Владивосток, 2019 и 2021 гг.), International Conference on Interactive Collaborative Robotics (Санкт-Петербург, 2020 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 39 научных работ, в том числе 5 из них – в научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 5 патентов на изобретения, 16 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные положения диссертации докладывались на девяти международных (6 из них проиндексированы в базах Scopus и 2 – в WoS) и на четырех Всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований, и 2 приложения. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 34 рисунка и 1 таблицу.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность разработки новых методов высокоскоростного и высокоточного управления МР, определены цели и задачи исследования, дано общее содержание диссертации.

**В первой главе** проведен анализ известных СУ, обеспечивающих выполнение ТО с помощью МР. На основе анализа опубликованных источников выявлены особенности и недостатки методов синтеза этих систем, не позволяющие их эффективно применять при выполнении высокоточных ТО с повышенной скоростью (производительностью).

В частности, было показано, что для решения задачи формирования программных скоростей движения РИ МР в основном используются различные профили скорости, оптимальные по быстродействию СУ и системы, настраивающие программные скорости движения по непрерывно измеряемым в процессе работы значениям входных напряжений, якорных токов и динамических ошибок. На основе проведенного анализа было определено, что решить задачу повышения производительности МР вполне можно за счет формирования таких программных скоростей движения РИ, при которых хотя бы один из электроприводов МР непрерывно работает в преднасыщенном состоянии (в линейной зоне усилителей мощности) с учетом возможных изменений параметров нагрузки этих электроприводов.

Также в первой главе проведен анализ существующих методов формирования программных сигналов управления для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Показано, что наибольшее распространение среди них получили методы, связанные с аналитическим или численным решением ОЗК. Было выявлено, что требуемую динамическую точность движения РИ МР по гладким пространственным траекториям можно обеспечить при введении избыточных степеней подвижности, автоматическое управление которыми в процессе работы позволяет исключить возможность входа всех степеней подвижности МР в ограничения, самих МР – в особые положения, а их РИ – на границы рабочих областей этих МР.

С учетом проведенного анализа в последнем разделе первой главы дана полная постановка задачи для разработки новых методов управления МР, обеспечивающих повышение их производительности при сохранении требуемой точности выполняемых работ и операций.

**Во второй главе** рассмотрен созданный метод [2] синтеза систем автоматического управления движениями МР, обеспечивающих точное выполнение ТО на предельно высоких скоростях с учетом ограничений по входным напряжениям электроприводов при изменениях параметров нагрузки этих электроприводов.

Было показано, что существенное повышение скорости работы

электроприводов может быть обеспечено за счет использования релейного управления, при котором их разгон и торможение осуществляются на пределе мощности используемых усилительных и исполнительных элементов. При этом длительности интервалов, на которых подаются напряжения одного знака, должны выбираться такими, при которых обеспечиваются точные перемещения валов электроприводов из одного заданного положения в другое. Для повышения производительности работы указанная задача сводится к расчету моментов времени, в которые должны выполняться изменения знаков напряжения (начало разгона и торможения). Эти моменты рассчитываются с использованием математического описания электроприводов, переменных параметров их нагрузки и ограничений входных напряжений. Причем в отличие от известного в теории оптимального управления принципа максимума Понтрягина решение этой задачи получается без использования функции Гамильтона и трудоемкого процесса определения законов переключения управляющих сигналов в конкретные моменты времени.

В диссертации предложенный метод использован в технологическом процессе, в котором одностепенной МР перемещает в горизонтальной плоскости накопитель деталей по дуге окружности над движущейся лентой конвейера с произвольно расположенными на ней объектами через область, наблюдаемую видеокамерой. Требуемая ТО с каждым  $i$ -ым объектом выполняется, когда рабочий орган МР неподвижно находится над очередным объектом  $O_i$ . При этом угол отклонения звена МР от оси, проходящей через середину конвейера, равен  $\tilde{q}_i$ , а угол поворота ведущего колеса конвейера –  $\varphi^*$ . При выполнении каждой ТО из накопителя на объект устанавливается одна деталь, что приводит к дискретному уменьшению момента инерции, приведенного к валу электродвигателя манипулятора, на фиксированную величину. Момент инерции, приведенный к валу электродвигателя конвейера, принимается постоянным.

МР и конвейер приводятся в движение электроприводами постоянного тока, описываемыми дифференциальными уравнениями 3-го порядка:

$$L_j J_{Ej} \ddot{\theta}_j + R_j J_{Ej} \dot{\theta}_j + K_{Mj} K_{\omega j} \dot{\theta}_j + R_j M_{стрj} = K_{Mj} K_{yj} U_j, \quad (1)$$

где  $j = \overline{1, 2}$  – номер электропривода манипулятора и конвейера, соответственно;  $L_j$  и  $R_j$  – соответственно, индуктивности и активные сопротивления якорных цепей электродвигателей;  $K_{Mj}$  и  $K_{\omega j}$  – соответственно, их коэффициенты крутящего момента и противо-ЭДС;  $K_{yj}$  – коэффициенты усиления усилителей мощности;  $U_j$  – входные напряжения;  $J_{Ej}$  – суммарные моменты инерции роторов двигателей и приведенных к ним моментов инерции вращающихся частей редукторов МР и конвейера;  $M_{стрj}$  – нелинейные характеристики моментов сухих трений, приведенных к валам двигателей;  $M_{двj}$  – моменты, развиваемые электродвигателями;  $\theta_j$  – углы поворотов валов



электродвигателей;  $\dot{\theta}_j$ ,  $\ddot{\theta}_j$ ,  $\ddot{\theta}_j$  – соответственно, первая, вторая и третья производные  $\theta_j$ . С учетом передаточного числа редукторов –  $i_{pj}$  угол поворота МР  $q = \theta_1/i_{p1}$ , а угол поворота ведущего колеса конвейера  $\varphi = \theta_2/i_{p2}$ .

Для перемещения МР в новое положение  $\tilde{q}_i$  вначале на его привод подается управляющий сигнал, обеспечивающий максимально быстрый разгон, а затем знак этого сигнала в определяемый момент времени меняется на противоположный для его максимально быстрого торможения и остановки в положении  $\tilde{q}_i$ . Аналогично осуществляется управление электроприводом конвейера, перемещающим объекты под рабочий орган МР. Моменты времени начала торможения МР и конвейера определяются в процессе их движений с использованием непрерывного решения уравнений

$$\theta_j = c_{1j} + c_{2j}e^{\lambda_{2j}t} + c_{3j}e^{\lambda_{3j}t} + C_j t, \quad (2)$$

которые являются аналитическими решениями уравнений (1) с измененными на противоположные разгону знаками прямоугольных сигналов  $U_j$  на входе электроприводов, где  $t$  – время движения с одним прямоугольным сигналом управления;  $\lambda_{2j}$  и  $\lambda_{3j}$  – действительные отрицательные корни составленных для уравнений (1) характеристических уравнений третьего порядка, равные  $-(R_j \pm \sqrt{R_j^2 - 4K_{Mj}K_{\omega j}L_j / J_{Ej}})/(2L_j)$ , соответственно;  $c_{1j}$ ,  $c_{2j}$ ,  $c_{3j}$  – константы, рассчитываемые с учетом начальных значений  $\theta_j$ ,  $\dot{\theta}_j$ ,  $\ddot{\theta}_j$ ;  $C_j$  – константы, определяемые частными решениями неоднородных уравнений (1).

В результате с учетом выражений (2) удастся рассчитывать промежуточные углы  $q_s$  и  $\varphi_s$  поворота МР и конвейера, соответственно, до начала их торможения прямолинейными сигналами с учетом текущих параметров вращения электроприводов. Если  $|q_s - \tilde{q}_i| > \varepsilon_{don 1}$  и  $|\varphi_s - \varphi^*| > \varepsilon_{don 2}$ , где  $\varepsilon_{don j}$  ( $j=1, 2$ ) – некоторые малые величины, то разгон или движение МР и конвейера с постоянной скоростью будут продолжены. Нарушение любого из этих условий приводит к началу торможения электропривода МР (конвейера) до остановки или до изменения знака скорости вращения соответствующего электропривода вблизи  $q_s$  или  $\varphi_s$ . После завершения торможения МР (конвейера) минимизация  $|q - \tilde{q}_i|$  или  $|\varphi - \varphi^*|$  обеспечится типовой следящей СУ. Если конвейер уже доставил объект к месту выполнения ТО, то эта операция выполняется и начинается новое движение МР к следующему объекту. Иначе МР ожидает подхода объекта к месту проведения ТО.

Результаты проведенного моделирования показали, что описанный выше метод управления электроприводами МР и конвейера за счет релейного закона управления позволил обеспечить точность доставки рабочего органа МР к объектам в пределах 0.1 мм, что в 7.6 раз лучше точности известной системы, обеспечивающей подстройку частоты входного сигнала по амплитудно-

частотным характеристикам. При этом быстродействие новой системы увеличилось на 46%.

**В третьей главе** описан новый метод [3] синтеза систем автоматического формирования предельно высоких программных скоростей движения РИ МР по пространственным траекториям с учетом реальных ограничений на входные напряжения их электроприводов и взаимовлияний между всеми степенями подвижности этих МР. Необходимость разработки этого метода объясняется тем, что представленный во второй главе диссертации метод может быть использован только для позиционного управления электроприводами и не способен обеспечивать согласованное предельно скоростное движение всех электроприводов МР при произвольном контурном управлении его РИ.

Этот метод разрабатывался для МР с кинематической схемой типа РУМА, но общность решаемой задачи сохраняется и для МР с любыми кинематическими схемами. Влиянием ориентирующих степеней подвижности, расположенных вблизи РИ, пренебрегалось, так как их силовое и моментное воздействие на переносные степени пренебрежимо мало. В качестве исполнительных элементов также использовались электроприводы постоянного тока. Индуктивности их якорных цепей и моменты сухого трения (1) полагались малыми, но при этом учитывались эффекты взаимовлияний между степенями подвижности. Уравнения этих электроприводов представлены в виде

$$R_i(H_i + J_{Ei}i_{pi}^2)\ddot{q}_i + (R_i h_i + K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^2)\dot{q}_i + R_i M_{\text{вн}i} = K_{Mi}K_{\gamma i}i_{pi}U_i, \quad (3)$$

где  $i = \overline{1,3}$  – номер  $i$ -ой переносной степени подвижности МР;  $q_i$ ,  $\dot{q}_i$ ,  $\ddot{q}_i$  – значения обобщенных координат, скоростей и ускорений МР;  $H_i$  – компонента, характеризующая инерционные свойства  $i$ -ой степени подвижности;  $h_i$  – составляющая момента, пропорциональная  $\dot{q}_i$ ;  $M_{\text{вн}i}$  – моментное воздействие на  $i$ -й сустав МР, учитывающее гравитационные силы и оставшиеся неучтенными взаимовлияния его степеней подвижности при движении.

Для решения поставленной задачи с учетом кинематики МР и текущего положения его РИ на траектории, задаваемой параметрическими сплайнами третьего порядка, было предложено перейти от уравнения (3), описывающего зависимости  $\dot{q}_i$  и  $\ddot{q}_i$  от  $U_i$  при текущих значениях  $H_i$ ,  $h_i$ ,  $M_{\text{вн}i}$ , к новому уравнению, описывающему зависимость скорости  $v$  и ускорения  $\dot{v}$  движения РИ от  $U_i$ , а затем переписать его относительно близких им программных значений  $v^*$  и  $\dot{v}^*$ . В итоге для  $i$ -ой степени подвижности получено уравнение

$$\tilde{a}_i \dot{v}^* + \tilde{b}_i v^{*2} + \tilde{c}_i v^* + \tilde{d}_i = 0, \quad (4)$$

где  $\tilde{a}_i = [R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)\mathbf{g}_i \mathbf{n} + \sum_{j=1}^3 (s_{j+4,i} \mathbf{g}_j \mathbf{n}))]$ ,  $\tilde{b}_i = [R_i((H_i^* + J_{Ei}i_{pi}^2)(\mathbf{n}^T \mathbf{G}_i \mathbf{n} + \mathbf{g}_i \tilde{\mathbf{n}}) + \sum_{j=1}^3 ((s_{j,i} \mathbf{g}_j \mathbf{n}) \mathbf{g}_i \mathbf{n} + s_{j+4,i} (\mathbf{n}^T \mathbf{G}_j \mathbf{n} + \mathbf{g}_j \tilde{\mathbf{n}}) + s_{j+7,i} (\mathbf{g}_j \mathbf{n})^2))]$ ,  $\tilde{c}_i = K_{Mi}K_{\omega i}i_{pi}^2 \mathbf{g}_i \mathbf{n}$ ,

$\tilde{d}_i = R_i s_{4,i} - K_{Mi} K_{yi} i_{pi} U_i$ ,  $i \neq j$ ;  $j = \overline{1,3}$ ;  $H_i^*$  – программное значение  $H_i$ ;  $s_{j,i}$  – функции программных координат, рассчитываемые с учетом решения обратной задачи динамики МР;  $\mathbf{n}$  и  $\tilde{\mathbf{n}}$  – соответственно, векторы, содержащие информацию, о направлениях векторов программных скорости  $\bar{v}^*$  и ускорения  $\dot{v}^*$ ;  $\mathbf{g}_i$  и  $\mathbf{G}_i$  – соответственно, векторы первых и матрицы вторых частных производных, содержащие информацию о кинематических соотношениях, связывающих  $v^*$  и  $\dot{v}^*$  с программными значениями  $\dot{q}_i^*$  и  $\ddot{q}_i^*$ .

Перемещение рабочей точки инструмента (РТИ) по программной траектории начинается после расчета значения начальной скорости  $v^*(\Delta t)$ , где  $\Delta t > 0$  – шаг дискретизации системы. Для расчета  $v^*(\Delta t)$  с начальным условием  $v^*(0) = 0$  для всех трех степеней подвижности МР формируются три пары уравнений (4), в которые в  $\tilde{d}_i$  вместо  $U_i$  подставляются их предельно допустимые значения с противоположными знаками. Все эти уравнения решаются на шаг  $\Delta t$  и определяют соответствующие им шесть значений скорости  $v^*(\Delta t)$ . Из них выбирается то, которое в своей паре (для  $i$ -го электропривода) является максимальным, но не превышающим наибольшего значения в других парах, при котором хотя бы один электропривод находится в преднасыщенном состоянии, а остальные – в отдалении от насыщения. Именно это выбранное значение  $v^*(\Delta t)$  используется для расчета следующего положения РТИ и координат  $q_i^*(\Delta t)$ . При этом величина  $v^*$  не должна превышать предельно допустимого значения для конкретного вида работы.

Впоследствии во время движения МР только на входе выбранного электропривода будет формироваться предельное значение  $U_i$ , а входные напряжения других электроприводов будут определяться их регуляторами, обеспечивая согласованное и точное движение всех степеней подвижности МР.

Расчет значений  $v^*$  для следующих дискретных моментов времени осуществляется аналогично. Но шесть уравнений (4) будут формироваться уже с учетом текущей конфигурации МР и значения  $v^*$  от предыдущего шага, используемого в качестве очередного начального условия. Эта процедура повторяется до начала торможения РИ в конце траектории.

Для определения точного момента времени начала торможения РИ все шесть уравнений (4) с некоторого участка траектории начинают постоянно решаться в обратном времени с конца этой траектории с нулевыми начальными условиями и с учетом того, что для предельно быстрого торможения на каждом шаге должно выбираться то решение, значение  $v^*$  которое в своей паре является минимальным, но не меньше минимального значения  $v^*$  в других парах. В результате определяется точка начала торможения РИ на траектории, в которой скорости  $v^*$ , рассчитываемые в прямом и обратном времени, совпадут или будут максимально близки. С этого момента для снижения  $v^*$  до нуля начинают использоваться только шесть уравнений, решаемых в обратном времени.

В результате в каждый дискретный момент времени  $t$  рассчитываются программные сигналы  $q_i^*(t)$ , которые после начала движения МР в реальном масштабе времени будут поступать на входы его следящих электроприводов, обеспечивая предельно быстрое движение РИ, при котором все электроприводы МР будут работать в линейной зоне усиления без входа в насыщения.

Исследование разработанной на основе предложенного метода системы задания программной скорости проводилось для движения РИ трехстепенного МР по траектории, описываемой уравнениями  $y = 0.25\sin(7.4x - 1.6) + 0.4$  и  $z = 0.25\sin(7.4x - 1.6) + 0.5$ ,  $x \in [-0.2; 0.65]$ . Длины звеньев МР  $l_1 = l_2 = l_3 = 0.5$  м, их массы  $m_1 = 25$  кг,  $m_2 = m_3 = 15$  кг, масса закрепленного в рабочем органе МР груза  $m_g = 5$  кг. Электроприводы управлялись типовыми ПИД-регуляторами. Предельные значения сигналов  $U_i$ , вводимых в уравнения (4), равны  $\pm 20$  В.

На рис. 1 и 2 показаны законы изменения  $q_i^*$ ,  $v^*$ , а также отклонения  $D$  РТИ МР от заданной траектории и  $U_i$  при работе созданной системы.

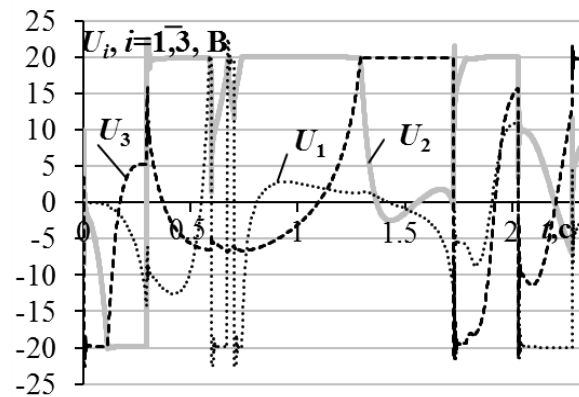
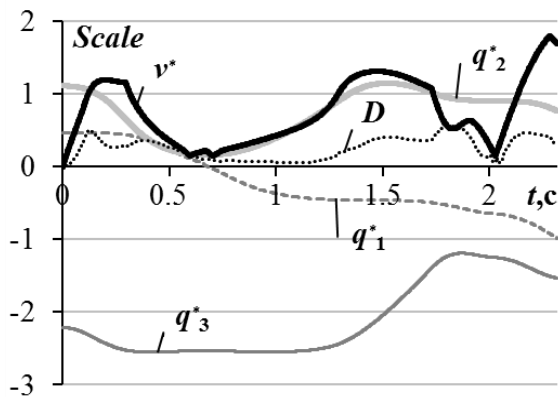


Рисунок 1 – Законы изменения  $q_i^*$ ,  $v^*$  и  $D$  (scale  $q_i^* = 1$  рад;  $v^* = 1$  м/с;  $D = 1$  мм)

Рисунок 2 – Законы изменения  $U_i$ ,  $i = \overline{1,3}$

Из показанных графиков видно, что программная скорость  $v^*$  непрерывно настраивалась, обеспечивая поочередную работу одного из электроприводов (см. рис. 2) в преднасыщенном состоянии. При этом увеличение  $v^*$  неизменно происходило на участках траектории движения РИ с малой кривизной. Отклонения  $D$  РИ от траектории (см. рис. 1) не превышали 0.6 мм. При этом быстродействие созданной системы при обеспечении одинаковой точности работы возрастало до 40% в зависимости от вида траектории и параметров МР.

**В четвертой главе** рассмотрено создание и исследование метода [1, 4, 5] построения систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР. Этот метод за счет смещения основания МР по избыточным степеням подвижности автоматически расширяет границы рабочей области МР, сохраняет точность выполнения рабочих операций, полностью исключая непредсказуемое появление реверсов его электроприводов, возникающих при движении РИ по траекториям и подходе МР к

своим особым положениям, а также к ограничениям степеней подвижности.

Для реализации этого способа в формируемую СУ было предложено ввести специальные функции-индикаторы  $J$ , значения которых могут изменяться в диапазоне от 0 до 1, указывая на приближение МР к его особым (критическим) положениям. До начала работы МР с использованием указанных индикаторов определяется исходная конфигурация МР, при которой все его особые положения исключаются. Затем при движении РИ по вновь формируемым траекториям, непрерывно определяются значения этих функций-индикаторов, и, если наибольший из них начинает превышать заранее заданное пороговое значение  $J_{th} \in [0, 1)$ , то автоматически выполняется смещение основания МР для уменьшения этого индикатора и обхода особых положений.

На рис. 3 показана обобщенная схема системы, реализующей описанный выше метод на примере шестистепенного МР с кинематической схемой PUMA, имеющей одну избыточную степень подвижности его основания.

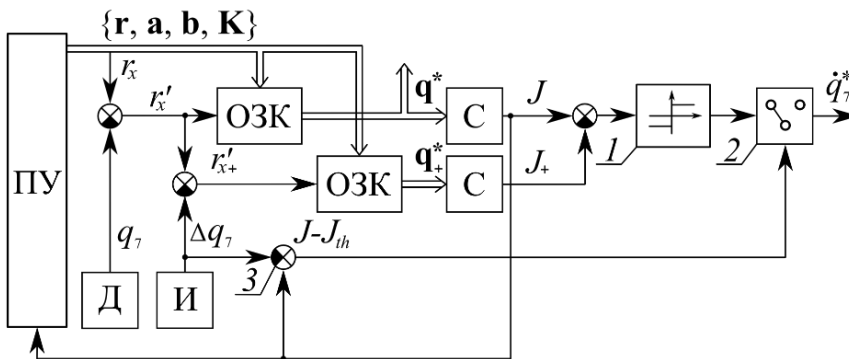


Рисунок 3 – Обобщенная схема устройства формирования программных сигналов для степеней подвижности МР

На этой схеме введены обозначения: ПУ – программное устройство для координат вектора  $\mathbf{r} = [r_x \ r_y \ r_z]^T$  РТИ, а также элементов векторов  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ , определяющих ориентацию РИ, в абсолютной системе координат (СК)  $Oxyz$ , и  $\mathbf{K}$ , определяющих текущую конфигурацию МР;

Д – датчик  $q_7$  (смещение СК  $O'x'y'z'$ , связанной с основанием МР, вдоль оси  $Ox$ ); И – источник постоянного сигнала  $\Delta q_7 > 0$ ;  $r'_x = r_x - q_7$ ;  $r'_{x+} = r_x - (q_7 + \Delta q_7)$ ; ОЗК – блоки решения ОЗК МР и расчета векторов обобщенных координат  $\mathbf{q}^*$  и  $\mathbf{q}^*_+$  для двух положений МР:  $q_7$  и  $q_7 + \Delta q_7$ ; С – контроллеры, рассчитывающие значения наибольших функций-индикаторов  $J$  и  $J_+$  для двух положений основания МР –  $q_7$  и  $q_7 + \Delta q_7$ ; 1 – релейный элемент, определяющий величину и знак скорости  $\dot{q}_7^*$ ; 2 – ключ для подключения выхода блока 1 ко входу электропривода координаты  $q_7$ ; 3 – сумматор, формирующий сигнал  $J - J_{th}$  (вход от блока И с коэффициентом усиления  $J_{th}/\Delta q_7$ ).

Система (см. рис. 3) работает следующим образом. Вначале с учетом сформированных на выходе ПУ программных значений элементов векторов  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{K}$ , соответствующих исходному положению РИ на траектории, и полученных в диссертации аналитических выражений на выходе ОЗК формируется вектор  $\mathbf{q}^*$ , а на выходе С – соответствующий ему сигнал  $J$ , сигнализирующий о приближении МР ко всем нежелательным положениям. Величина  $J$  рассчитывается для всех (восьми) различных возможных конфигураций МР, задавае-

мых вектором  $\mathbf{K}$ . Затем в ПУ производится выбор наиболее благоприятной начальной конфигурации, для которой величина  $J$  является наименьшей, и на входы шести следящих электроприводов МР поступают сигналы  $\mathbf{q}^*$ , обеспечивая выход РИ в начало программной траектории. Затем начинается движение РИ МР по траектории. Для этого на выходе ПУ изменяются значения элементов векторов  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ . Это приводит к изменению сигналов  $\mathbf{q}^*$  и  $J$  на выходах блоков ОЗК и С, соответственно. Если выполняется условие  $J \leq J_{th}$ , то сигнал  $\dot{q}_7^*$  остается нулевым, величина  $q_7$  не меняется и основание МР неподвижно. Если же начинает выполняться неравенство  $J > J_{th}$ , то МР перемещается по координате  $q_7$ . Для задания направления этого перемещения на выходах вторых блоков ОЗК и С формируются сигналы  $\mathbf{q}_+^*$  и  $J_+$ , соответствующие сигналу  $r'_{x+}$  и значению проекции РТИ  $r'$  на ось  $Ox'$  для МР, основание которого сдвинуто по оси  $Ox$  на расстояние  $q_7 + \Delta q_7$ . С учетом значений  $J$  и  $J_+$  на выходе ключа 2 формируется постоянный сигнал  $\dot{q}_7^*$ , знак которого совпадает со знаком разности  $J - J_+$  (или равен 0, если  $J = J_+$ ). Сигналы  $\mathbf{q}^*$  и  $\dot{q}_7^*$  обрабатываются соответствующими следящими электроприводами, перемещая РИ по траектории и одновременно не допуская приближения МР ко всем нежелательным положениям. Если же в процессе работы системы начинает выполняться условие  $J > J_{cr}$ , где  $J_{cr} \in [J_{th}, 1]$  – критическое пороговое значение наибольшего из индикаторов, проверяемое в ПУ, то РИ останавливается и работа МР прекращается. При этом сигналы  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  на выходе ПУ фиксируются во избежание аварий.

Исследование системы (см. рис. 3) было проведено для типового шести-степенного МР, перемещающего РТИ по сложной траектории, сформированной с помощью параметрических сплайнов третьего порядка, со скоростью 1 м/с. На рис. 4 представлены результаты моделирования движения этого МР.

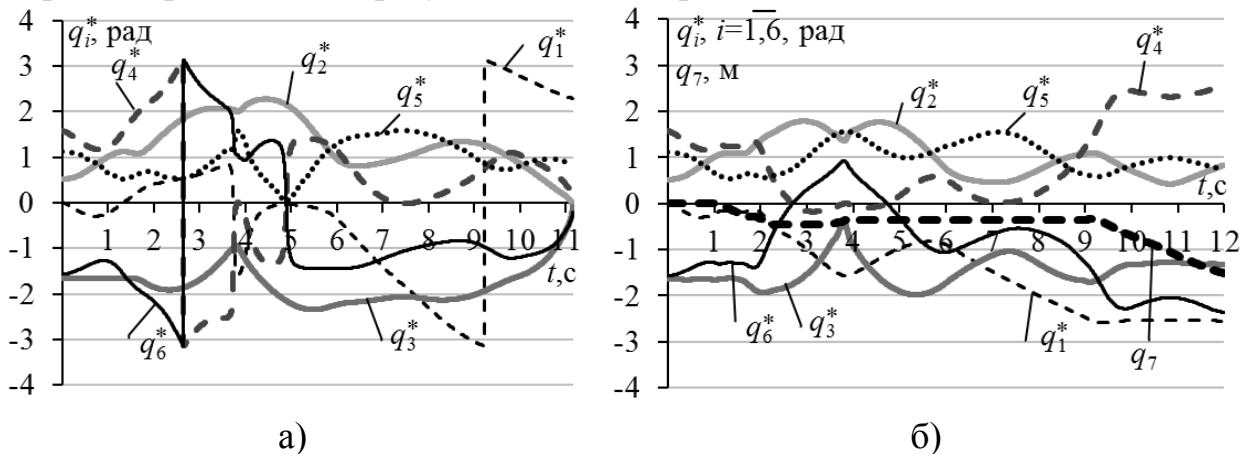


Рисунок 4 – Законы изменения  $q_i^*$ ,  $i = \overline{1,6}$ , и  $q_7$  при а) неподвижном;

б) подвижном основании МР

Вид программной траектории МР и ориентация его РИ были такими, что при неподвижном основании его степени подвижности входили в ограничения и в два особых положения. Поэтому в соответствующих степенях подвижности наблюдались реверсы электроприводов (см. моменты времени 2.6 с, 3.7 с, 4.9 с

и 9.2 с на рис. 4а). Кроме того, РИ выходил на границу рабочей области (см. 11.2 с на рис. 4а) и МР экстренно останавливался, не достигая последней точки траектории. Во время реверсов отклонения РТИ от программной траектории были недопустимо большими и доходили до 1.5 м.

При введении устройства формирования программных сигналов (см. рис. 3), перемещающего основание МР по координате  $q_7$  со скоростью  $\dot{q}_7^* = 0.5$  м/с при его приближении к особым положениям, когда наибольший из индикаторов  $J$  превышал значение  $J_{th} = 0.8$ , все указанные негативные явления исключались (см. рис. 4б), а движение РИ завершалось точно в конце траектории. При этом отклонение РТИ от траектории не превысило 0.65 мм.

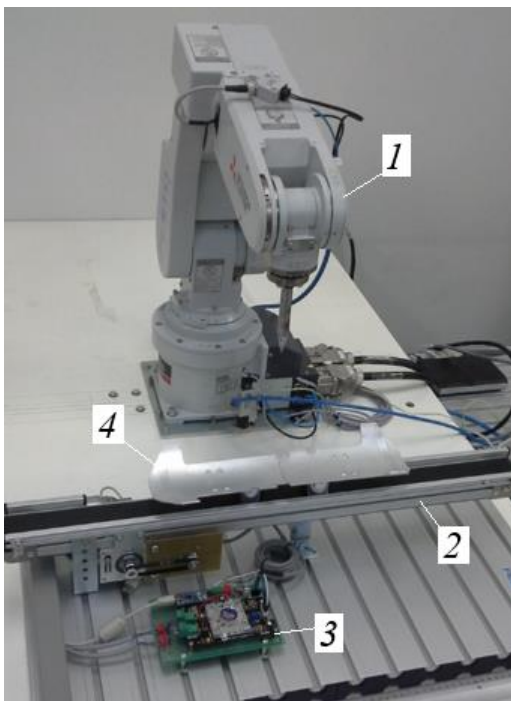


Рисунок 5 – Общий вид стенда

В этой же главе были проведены и натурные исследования предложенной системы с использованием стенда, показанного на рис. 5 и включающего шестистепенной манипулятор 1 Mitsubishi RV-2FB-D с конвейером 2 FESTO, управляемым платой 3 и перемещающим деталь 4. В эксперименте вместо смещения МР по координате  $q_7$  использовалось противоположное движение ленты конвейера, которое по эффекту было аналогично смещению основания МР. Из результатов эксперимента (см. рис. 6а) видно, что при неподвижном конвейере степень подвижности  $q_4$  МР в моменты времени 110–140 с и 265–290 с входила в ограничение (рис. 6а), МР – в особое положение на 290 с, а РИ выходил на границу рабочей области, что приводило к

ранней остановке МР. При этом динамическая ошибка была равна 2.5–5.5 мм.

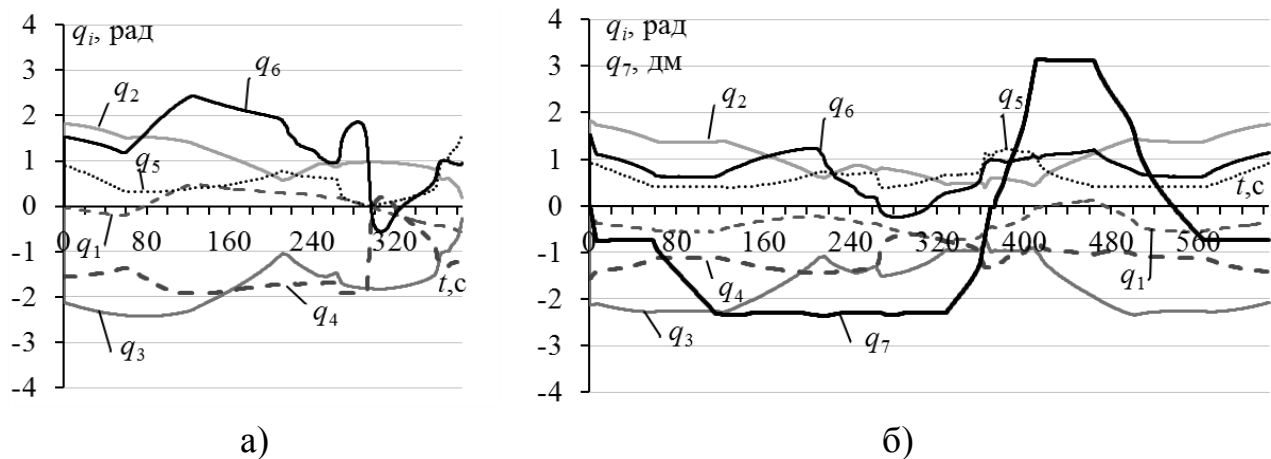


Рисунок 6 – Законы изменения  $q_i, i = \overline{1,6}$ , и  $q_7$  при а) неподвижной; б) перемещаемой конвейером обрабатываемой детали

При перемещении деталей конвейером перечисленные особые ситуации полностью исключались (см. рис. 6б), а динамическая ошибка от траектории не превышала 0.32 мм. Таким образом, и результаты натурных экспериментов показали, что применение предложенного метода позволяет полностью сохранить высокую точность управления МР и расширить его рабочую область.

**В заключении** описаны основные результаты работы. В приложении к диссертации представлены акты внедрения ПАО “Дальприбор” и ДВФУ.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан метод синтеза систем автоматического управления электроприводами МР, которые обеспечивают их движение на предельно высоких скоростях с автоматическим учетом реальных ограничений на управляющие сигналы и изменений параметров нагрузки этих приводов.

2. Разработан метод синтеза систем автоматического формирования предельно высоких скоростей движения РИ МР по пространственным траекториям, обеспечивающих сохранение динамической точности управления с учетом взаимовлияний между всеми их степенями подвижности и ограничений на входные напряжения электроприводов.

3. Разработан метод синтеза систем формирования программных сигналов для всех степеней подвижности кинематически избыточных МР, которые обеспечивают сохранение требуемой динамической точности управления с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности, особых случаев расположения звеньев МР и их различных возможных конфигураций.

4. Результаты моделирования и проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и высокую эффективность созданных на основе предлагаемых методов систем управления манипуляционными роботами.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК*

1. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В., Коноплин А.Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. – 2018. – Т. 25. – №1. – С. 30-37.

2. Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Метод высокоскоростного управления движением одностепенного манипулятора // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – №4. – С. 62-68.

3. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21. – № 12. – С. 696-705.



4. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – № 1. – С. 23-30.

5. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть II. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23. – № 2. – С. 88-96.

*Патенты на изобретения*

6. Патент РФ № 2577204. Самонастраивающийся электропривод манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 7, 2016.

7. Патент РФ № 2626437. Устройство формирования программных сигналов управления / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Бюл. № 21, 2017.

8. Патент РФ № 2722556. Способ перемещения конвейером объектов / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 16, 2020.

9. Патент РФ № 2731741. Устройство формирования программных сигналов управления / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Бюл. № 25, 2020.

10. Патент РФ № 2771456. Способ управления рабочим органом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. Бюл. № 13, 2022.

*Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ*

11. Свидетельство № 2016661915 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для адаптивного управления электроприводом многозвенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 25.10.2016 г.

12. Свидетельство № 2016661919 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для адаптивного управления электроприводом манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 26.10.2016 г.

13. Свидетельство № 2016661920 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для адаптивного управления электроприводом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 26.10.2016 г.

14. Свидетельство № 2016663179 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для адаптивного управления электроприводом многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 29.10.2016 г.

15. Свидетельство № 2016663383 о государственной регистрации

программы для ЭВМ. Программа формирования максимальной скорости перемещения рабочего инструмента многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 06.12.2016 г.

16. Свидетельство № 2017611291 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа «FOREZH» для формирования режимов движения рабочих инструментов промышленных роботов / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 01.02.2017 г.

17. Свидетельство № 2017613664 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа «SADUP» для обеспечения заданной динамической точности движения рабочего инструмента промышленного робота / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 24.03.2017 г.

18. Свидетельство № 2018615856 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль для формирования законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по гладким пространственным траекториям / Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 17.05.2018 г.

19. Свидетельство № 2019619439 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модуль формирования программных значений обобщенных координат для манипулятора / Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 17.07.2019 г.

20. Свидетельство № 2020666739 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемыми скоростью и пространственной ориентацией по траекториям, заданным В-сплайнами / Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 16.12.2020 г.

21. Свидетельство № 2020667068 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемыми скоростью и пространственной ориентацией по траекториям, заданным сплайнами Безье / Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 21.12.2020 г.

22. Свидетельство № 2020667323 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль для формирования желаемых перемещений мехатронных объектов с требуемой скоростью по траекториям, заданным В-сплайнами / Губанков А.С., Горностаев И.В. – Зарегистр. 22.12.2020 г.

23. Свидетельство № 2021619276 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для формирования требуемой скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С. – Зарегистр. 08.06.2021 г.

24. Свидетельство № 2021619536 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для формирования обобщенных координат

для шестистепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С. – Зарегистр. 10.06.2021 г.

25. Свидетельство № 2021619543 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для управления робототехническим комплексом / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В. – Зарегистр. 11.06.2021 г.

26. Свидетельство № 2021619739 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для формирования обобщенных координат для избыточного семистепенного манипулятора / Филаретов В.Ф., Горностаев И.В., Губанков А.С. – Зарегистр. 16.06.2021 г.

*Статьи в трудах всероссийских и международных конференций*

27. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed // Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications. Jakarta, Indonesia. – 2016. – P. 93-96.

28. Gubankov A., Gornostaev I. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility // Proc. of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 1-4.

29. Filaretov V., Gornostaev I. Method of High Speed Control of Movement of the 1 DoF Manipulator // Proc. of the Int. multi-conf. on industrial engineering and modern technologies. Vladivostok, Russia. – 2019. – P. 1-5.

30. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the Int. Russian Automation Conf. Sochi, Russia. – 2019. – P. 1-6.

31. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Movement Speed of Working Tool of Multilink Manipulator // Proc. of the 5th Int. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. St. Petersburg, Russia. – 2020. – P. 89-98.

32. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. Method of Formation of Reference Control Signals for Redundant Manipulators // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2096. – № 012110. – P. 1-6.

33. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода синтеза систем формирования скорости динамических объектов // Материалы VII всероссийской научно-технической конференции «Робототехника и искусственный интеллект». Железногорск, Россия. – 2015. – С. 13-18.

34. Горностаев И.В. Синтез системы формирования скорости движения подводных аппаратов по пространственным траекториям // Материалы всероссийской конференции «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, Россия. – 2017. – С. 336-340.

35. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программных сигналов для всех степеней подвижности многозвенных подводных манипуляторов // Материалы всероссийской конференции «Робототехника и искусственный интеллект», Железногорск, Россия. – 2017. – С. 26–31.

36. Горностаев И.В. Формирование законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по траекториям, заданным параметрическими В-сплайнами // Международная научно-техническая Интернет-конференция молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2017. – С. 79-83.

37. Горностаев И.В., Губанков А.С. Разработка метода формирования законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по гладким пространственным траекториям // Материалы III всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника». Севастополь, Россия. – 2017. – С. 83-86.

38. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В. Особенности формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов промышленных роботов с избыточными степенями подвижности // Материалы VIII международной научно-технической конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2018. – С. 114-118.

39. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора // Материалы IX международной научно-технической конференции молодых ученых «Автоматизация, мехатроника, информационные технологии». Омск, Россия. – 2019. – С. 73-77.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Работы [34, 36] выполнены автором самостоятельно. В работах [1–33, 35, 37–39] руководителем поставлены задачи, а соискателем получены основные научные результаты.

### **Горностаев Игорь Вячеславович**

Разработка методов синтеза систем высокоскоростного управления манипуляционными роботами с учетом особенностей их конструкций

#### Автореферат

Подписано к печати \_\_.\_\_.202\_\_  
Формат 60×84/16

Усл. п. л. 1.0  
Тираж 100 экз.

Уч.-изд. л. \_\_  
Заказ №\_\_

Издано ИАПУ ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, Радио, 5.  
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток, Радио, 5.