



Крашмалев Олег Николаевич

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

**Научный консультант:** **Благовещенский Иван Германович** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника пищевых производств» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

**Официальные оппоненты:** **Никитина Марина Александровна** доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий» ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

**Шкапов Павел Михайлович** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

**Кайченев Александр Вячеславович** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Кафедра автоматике и вычислительной техники» ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет».

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА – Российский технологический университет».

Защита состоится 28 декабря 2023г. в 13 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02) на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» и на сайте: <http://www.mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11.

Автореферат разослан \_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02), кандидат технических наук \_\_\_\_\_ Мокрушин С. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Робототехнические системы представляют собой комплексы оборудования, предназначенного для автоматизации технологических процессов в различных производственных отраслях. В состав оборудования современных робототехнических комплексов входят: промышленные роботы, технологическое оборудование, вспомогательное оборудование и системы управления. Системы управления промышленными роботами должны быть интегрированы в автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП).

Промышленные роботы (ПР) выполняют различные технологические операции, связанные с манипулированием соответствующим инструментом, деталями и заготовками. ПР позволяют повысить эффективность производств и качество выпускаемой продукции. До сих пор лидирующей отраслью по использованию ПР является машиностроение, однако в последнее время заметно интенсифицировалось их внедрение в сельском хозяйстве и в пищевых производствах.

Управление ПР строится на математическом обеспечении, в основе которого используются математические модели (ММ), учитывающие технические особенности ПР. Методы составления ММ для управления манипуляционными ПР основываются на хорошо изученных, к настоящему времени, фундаментальных методах теоретической механики и теории автоматического управления. Однако разработка методов математического моделирования и алгоритмов для АСУТП с применением ПР, ориентированных на возможности современных информационных технологий, является актуальной задачей.

При этом важно, чтобы разрабатываемые методы математического моделирования, во всём их прикладном многообразии, были объединены общим методологическим подходом. Это существенно упростит внедрение получаемых на основе этих методов алгоритмов в системы управления робототехнических комплексов и позволит успешно интегрировать их в современные АСУТП.

Кроме того, является важным то, чтобы разрабатываемые ММ и алгоритмы позволяли выполнять как параметрическую адаптацию систем управления к изменяющемуся возмущению, так и структурную адаптацию путём реконфигурации модели управления на основе анализа изменяющихся внешних условий и самодиагностики.

Разработка систем управления на основе реконфигурируемых моделей управления и функций самодиагностики решает актуальную задачу создания универсальных систем управления манипуляционными роботами с различными кинематическими схемами, а также закладывает основы для решения не менее актуальной и перспективной задачи управления роботами-трансформерами с произвольно (стохастически) изменяющейся кинематической структурой.

**Объект исследования** – манипуляционные ПР, рассматриваемые как манипуляционные системы (МС), представляющие собой многосвязные механизмы с разомкнутой кинематической цепью, в которой звенья соединены шарнирами, имеющими одну степень свободы, вращательную или поступательную. При рас-

смотрении задач кинематики звенья считаются безынерционными, а в задачах динамики учитывается распределение масс в каждом звене.

**Цель исследования** состоит в разработке теоретических основ и методов построения АСУТП для управления манипуляционными промышленными роботами на основе математического моделирования, позволяющих учитывать и анализировать влияние разного рода отклонений и возмущений и основывающихся на единой методологии и объектно-ориентированном подходе, раскрывающих возможности параллельных вычислений и синтеза модели управления, выполняемого путём её реконфигурации, с использованием процедур самодиагностики и оптимизации, построенной на основе генетического программирования.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. **Выработать единый подход – методологию моделирования** МС роботов и на её основе рассмотреть постановку и решение задач управления манипуляционными роботами.

2. **Разработать ММ**, позволяющие учитывать разного рода отклонения в конструкциях МС роботов, методы коррекции таких отклонений и методы оценки точности получаемых решений.

3. На основе выработанной методологии и объектно-ориентированного подхода **разработать формализм объектного описания ММ** МС роботов и их представления в виде объектных схем.

4. **Разработать методы самодиагностики** кинематических структур МС роботов.

5. **Раскрыть возможности и преимущества объектного моделирования** при составлении и модификации ММ МС роботов, разработке алгоритмов параллельных вычислений и синтезе оптимальных структур, выполняемых на основе генетического алгоритма.

6. **Составить алгоритмы и программы** для систем управления манипуляционными роботами на основе разработанных ММ и методов моделирования.

**Методы исследования.** Проведенные исследования основываются на принципах моделирования систем тел в теоретической механике, методах теории механизмов и машин и теории моделирования, методах моделирования систем управления, реализующих принципы компенсации и регулирования по отклонению, численных методах и методах технологии параллельных вычислений. В частности, для описания движения манипуляционных систем применялся метод Лагранжа-Эйлера с использованием матриц преобразования однородных координат. При проведении численных исследований применялся разработанный автором пакет прикладных программ и верифицированные программные комплексы для моделирования кинематики и динамики многозвенных механизмов.

**Научная новизна:**

– представлена методология математического объектного моделирования МС роботов, позволяющая путём выделения базовых классов в структуре данных и алгоритмов создавать на их основе сложные математические объекты и составлять из этих объектов ММ МС роботов, выполнять параллельные вычисления отдельных частей ММ, а также при автоматизации составления ММ реализовать

возможность их визуального программирования. Математическое объектное моделирование открывает возможности изменения ММ путём модификации объектных схем, соответствующих этим ММ. Это позволяет создавать универсальные системы управления для манипуляционных роботов различных моделей, а также роботов, конструкция которых может собираться из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции;

– предложен научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенных на основе объектного описания их ММ, путём декомпозиции соответствующих ММ объектных схем в результате применения генетического алгоритма. Описан метод структурных мутаций, позволяющий распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих ММ МС роботов. Метод позволяет проводить модификации объектных схем ММ путём замены выбранных частей схемы на альтернативные им объекты. Использование генетического алгоритма для поиска оптимальных структур составляет основу концепции генетического программирования. Предложенный подход к адаптации позволяет создавать реконфигурируемые системы управления, в которых учитываются и анализируются влияния не только разного рода отклонений и возмущений, но и структурные изменения в управляемой системе. В частности, этот подход открывает перспективы управления роботами-трансформерами и антропоморфными роботами со стохастически изменяющимися структурами;

– разработаны методы диагностики кинематических структур МС роботов, включающие методы калибровки по положению характерной точки их конечного звена и по ориентации этого звена, а также методы калибровки базы, содержащей описание рабочего пространства МС. Методы позволяют реализовать функции самодиагностики в системах управления манипуляционными роботами и на их основе осуществлять коррекцию возникающих в кинематических структурах роботов геометрических отклонений и реконфигурацию систем управления, в случае возникновения существенных изменений в их кинематических структурах;

– разработан метод параметризации номинальных геометрических моделей МС роботов, представляющих собой ММ, описывающие кинематические структуры МС, соответствующие их конструкторской документации, на основе первичных геометрических отклонений звеньев, вызванных неточностью изготовления и сборки деталей и узлов, составляющих звенья, а также отклонений позиционирования звеньев, возникающих в шарнирах. Метод отличается тем, что параметризация номинальных геометрических моделей МС роботов производится путём воздействия на них специальным модификатором, учитывающим такие геометрические отклонения;

– разработан численный метод коррекции интегральных отклонений движения МС роботов, учитывающий отклонения размеров и формы звеньев (первичные геометрические отклонения), а также отклонения позиционирования звеньев, вызванные, в том числе, упругой податливостью шарниров. Метод позволяет на основе движения, заданного для номинальной модели робота, соответствующей данным конструкторской документации (3D-модели), получить скорректирован-

ное движение конкретного образца с учётом его первичных геометрических отклонений, определяемых современными методами измерений;

- разработан метод моделирования МС с упругими шарнирами при малых деформациях, возникающих в направлении изменения основных обобщённых координат, отвечающих за программные движения манипуляционных роботов. Метод позволяет разделять вычисления медленно изменяющихся квазистатических упругих отклонений и высокочастотных упругих колебаний;

- разработаны методы моделирования линейных и угловых отклонений в динамике МС роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности, позволяющие определять как упругие, так и не упругие отклонения и проводить оценку точности выполняемого движения. На основе использования данных методов может быть получен прогноз, позволяющий адаптировать управление роботом путём выбора соответствующего диапазона регулирования управляемых координат;

- разработан алгоритм на основе параллельных вычислений динамической модели МС роботов, с использованием матричных алгоритмов, в котором параллеливание вычислений выполняется на нескольких уровнях, получаемых путём декомпозиции исходной динамической модели.

**Теоретическая значимость исследований** состоит в разработке теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области моделирования робототехнических систем в качестве объектов управления и расширения возможностей АСУТП, существующих в настоящее время.

**Практическая значимость** заключается в следующем:

1. Система управления манипуляционными роботами, реализуемая на основе объектных схем их ММ, позволит создавать универсальные системы управления манипуляционными роботами различных моделей, а также роботами, конструкция которых может собираться из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции.

2. Заложены принципы разработки перспективной системы управления, которая позволит выполнять адаптацию к существенно изменяющимся внешним условиям путём учёта не только возмущающих факторов, но и путём изменения структуры самой управляемой модели. При этом структурная адаптация будет осуществлять предварительную грубую настройку к изменившимся условиям, а последующая параметрическая адаптация - выполнять окончательную тонкую настройку. Такая система управления позволит обеспечить управление роботами-трансформерами, в которых изменение кинематической структуры может выполняться не только на основе заранее подготовленных вариантов, но и случайным образом. При этом должны быть выполнены процедуры самодиагностики и калибровки. Это позволит получить необходимые данные о новой структуре робота и с учётом этих данных модифицировать управляемую модель.

3. Разработанные в диссертации объектно-ориентированные методы моделирования могут обеспечить решение задачи синтеза оптимальных структур МС роботов на основе использования генетического алгоритма, представляющего собой стохастический метод оптимизации, реализованный по аналогии с эволюци-

онными процессами, протекающими в природе. В генетическом алгоритме, виртуально реализующем эволюционный процесс, изменения, происходящие в сотне поколений, протекают за доли секунд. Использование генетического алгоритма в адаптивной системе управления позволит определять кинематическую структуру МС робота, наиболее подходящую для выполнения конкретной задачи.

4. Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать кинематику и динамику манипуляционных роботов и решать на основе получаемых моделей различные прикладные задачи, например, определять разного рода отклонения и проводить оценку точности выполняемых движений.

5. Составлены динамические модели некоторых ПР. На основе этих моделей могут создаваться модели робототехнических комплексов, разрабатываться системы автоматического управления движением роботов и их совместным взаимодействием.

6. Разработанные модели и методы могут быть использованы в организации образовательных процессов при подготовке бакалавров и магистров по профильным направлениям, таким как, например, «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах» и «Мехатроника и робототехника».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методология математического объектного моделирования МС роботов, позволяющая – путём выделения базовых классов в структуре данных и алгоритмов – создавать на их основе сложные математические объекты и составлять из этих объектов ММ МС роботов, выполнять параллельные вычисления отдельных частей ММ, а также при автоматизации составления ММ реализовать возможность их визуального программирования. Математическое объектное моделирование открывает возможности изменения ММ путём модификации объектных схем, соответствующих этим ММ (*п. 2, 9, 15 и 19 паспорта специальности 2.3.3*).

2. Научно обоснованный подход к адаптации систем управления манипуляционными роботами, построенных на основе объектного описания их ММ, путём декомпозиции соответствующих ММ объектных схем в результате применения генетического алгоритма, и метод структурных мутаций, позволяющий распространить возможности генетического алгоритма на задачи модификации объектных схем, соответствующих ММ МС роботов. Использование генетического алгоритма для поиска оптимальных структур составляет основу концепции генетического программирования (*п. 3, 7 и 9 паспорта специальности 2.3.3*).

3. Методы диагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов, включающие методы калибровки по положению характерной точки их конечного звена и по ориентации этого звена, а также методы калибровки базы, содержащей описание рабочего пространства манипуляционных систем, реализующие функции самодиагностики в системах управления манипуляционными роботами, позволяющими осуществлять коррекцию возникающих в кинематических структурах роботов геометрических отклонений и реконфигурацию систем управления, в случае возникновения существенных изменений в их кинематических структурах (*п. 13 и 14 паспорта специальности 2.3.3*).

4. Метод параметризации номинальных геометрических моделей МС роботов, представляющих собой ММ, описывающие кинематические структуры МС, соответствующие их конструкторской документации, на основе первичных геометрических отклонений звеньев, вызванных неточностью изготовления и сборки деталей и узлов, составляющих звенья, а также отклонений позиционирования звеньев, возникающих в шарнирах. Метод отличается тем, что параметризация номинальных геометрических моделей МС роботов производится путём воздействия на них специальным модификатором, учитывающим такие геометрические отклонения (*п. 7 и 8 паспорта специальности 2.3.3*).

5. Численный метод коррекции интегральных отклонений движения МС роботов, учитывающий отклонения размеров и формы звеньев (первичные геометрические отклонения), а также отклонения позиционирования звеньев, вызванные, в том числе, упругой податливостью шарниров. Метод позволяет на основе движения, заданного для номинальной модели робота, соответствующей данным конструкторской документации (3D-модели), получить скорректированное движение конкретного образца с учётом его первичных геометрических отклонений, определяемых современными методами измерений (*п. 13 паспорта специальности 2.3.3*).

6. Метод моделирования МС с упругими шарнирами при малых деформациях, возникающих в направлении изменения основных обобщённых координат, отвечающих за программные движения манипуляционных роботов, позволяющий разделять вычисления медленно изменяющихся квазистатических упругих отклонений и высокочастотных упругих колебаний (*п. 13 паспорта специальности 2.3.3*).

7. Методы моделирования линейных и угловых отклонений в динамике МС роботов, в кинематической структуре которых могут быть использованы шарниры с различной степенью подвижности, позволяющие определять как упругие, так и не упругие отклонения и проводить оценку точности выполняемого движения. На основе использования данных методов может быть получен прогноз, позволяющий адаптировать управление роботом путём выбора соответствующего диапазона регулирования управляемых координат (*п. 13 паспорта специальности 2.3.3*).

8. Алгоритм выполнения параллельных вычислений динамической модели МС роботов, с использованием матричных алгоритмов, в котором распараллеливание вычислений выполняется на нескольких уровнях, получаемых путём декомпозиции исходной динамической модели (*п. 12 паспорта специальности 2.3.3*).

**Достоверность и апробация результатов.** Достоверность полученных в работе результатов обусловлена применением классических положений теоретической механики, теории механизмов и машин, теории автоматического управления, строгостью математической постановки задач и подтверждается сопоставлением результатов теоретических исследований с результатами моделирования на многочисленных тестовых примерах, а также с результатами, полученными на основе методов, разработанных другими авторами.

Материалы работы докладывались и обсуждались на семинарах «Теория управления и динамика систем» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН под руководством академика РАН Ф.Л. Черноушко, при участии чл.-корр. РАН Н.Н. Болотника, профессора В.Г. Градецкого (г. Москва, июнь 2011, октябрь 2013); на семинаре лаборатории машин-автоматов Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова под руководством профессора Б.И. Павлова, при участии Н.А. Серкова, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывеса (г. Москва, март 2013); на семинаре кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета под руководством профессора С.Ф. Яцуна (г. Курск, март 2011); на семинарах лаборатории прикладной механики Брянского государственного технического университета (БГТУ) под руководством профессора Д.Ю. Погорелова (г. Брянск, февраль 2011, январь 2013, февраль 2014), на заседаниях кафедры «Динамика и прочность машин» (БГТУ) под руководством профессора Б.Г. Кеглина и профессора А.П. Болдырева; на заседаниях кафедры «Автоматизированные технологические системы» (БГТУ) под руководством профессора Д.И. Петрешина; на областном семинаре-практикуме «Развитие техносферы образовательного учреждения. Применение основ робототехники в учебном процессе» (г. Брянск, 23 октября 2014); на заседании кафедры робототехники и мехатроники МГТУ «СТАНКИН» под руководством профессора Ю.В. Подураева (г. Москва, 23 мая 2017); на заседании кафедры РК6 САПР МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора А.П. Карпенко (г. Москва, октябрь 2018); на семинарии ДАДиМО Финансового университета при Правительстве РФ под руководством профессоров В.И. Соловьева и Д.И. Коровина (г. Москва, 15 сентября 2021); на заседании научно-технического совета отдела «Механика машин и управление машинами» и международного семинара по ТММ им. И.И. Артоболевского Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова под председательством профессора В.А. Глазунова (г. Москва, 12 октября 2021);

на конференциях:

- IV Международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях», 4–5 июня 2014, ЮЗГУ, г. Курск;
- VI Всероссийской молодёжной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии», 18 апреля 2014, ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл;
- Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития науки», 14 февраля 2014, БашГУ, г. Уфа;
- VII Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения», 21–23 сентября 2015, г. Брянск;
- Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие подъёмно-транспортной техники», 28–30 сентября 2015, г. Брянск;
- III Международной заочной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование в машиностроении», 11 ноября 2015, г. Новокузнецк;

- IX Международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения», 1–4 декабря 2015, г. Томск.
- VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект», 25 ноября 2016, г. Железнодорожск;
- Региональной научно-технической конференции молодых ученых «Мехатроника и робототехника» МиР-2017, 19 апреля 2017, г. Орел;
- IV Международной школы-конференции молодых ученых «Нелинейная динамика машин» SCHOOL-NDM 2017, 18–21 апреля 2017, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, г. Москва;
- Всероссийской научно-методической конференции «Проектирование машин, роботов и мехатронных систем», 19–20 октября 2017, ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел;
- XIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения 2018», ГУАП, 18–21 апреля 2018, г. Санкт-Петербург;
- 29-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, 7–8 июня 2018, г. Санкт-Петербург;
- XIV Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения 2019», 17–20 апреля 2019, ЮЗГУ, г. Курск;
- IV Международная специализированная конференция-выставка «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям и роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности», 26 апреля 2023, РОСБИОТЕХ, г. Москва.

**Личное участие автора.** Представленные в диссертации результаты являются обобщением научных исследований, проведенных лично автором в период с 2014 по 2022 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в том числе учебное пособие, 4 монографии, 12 статей, индексируемых в Scopus и WoS, 16 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.3, зарегистрировано 3 электронных ресурса и 2 компьютерные программы.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 148 наименований, имеются приложения. Общий объём диссертации составляет 323 страницы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, задачи и методы исследования, дано краткое описание исследуемой области. Определена новизна и результаты, выносимые на защиту, обоснована практическая значимость работы и её апробация.

**В первой главе** последовательно рассмотрены основные задачи и методы моделирования и кинематического и динамического управления манипуляционными роботами. Результаты, полученные на основе решения этих задач, соответ-

ствуют номинальным (идеальным) МС роботов, в конструкции которых отсутствуют дефекты, а звенья собраны из неупругих деталей, моделируемых абсолютно твёрдыми телами. Такие решения называют программными, так как на их основе задаются траектории движения и определяются, обеспечивающие заданное (программное) движение законы управления шарнирными (обобщёнными) координатами и усилиями, развиваемыми приводами.

Описание геометрии МС роботов построено на основе сформулированного понятия – геометрической модели, которая отличается от традиционно используемого в теории моделирования сложных систем одноимённого понятия тем, что вместо простого геометрического подобия объекта-заместителя (чертёж, рисунок, фотография) даёт его математическое описание, содержащее преобразования координат как внутри самого объекта, так и в окружающем его пространстве, и позволяющее аналитическим способом создавать геометрические образы как самого объекта, так и его окружения.

Геометрическая модель МС как ММ представляет собой множество матриц  $(4 \times 4)$  преобразования однородных координат, определяемых выражениями

$$A_{(i-1),i} = A_{(i-1),(i-1)*} A_{(i-1)*,i}, \quad (1)$$

$$A_{0,k} = \prod_{i=1}^k A_{(i-1),i}, \quad (2)$$

где матрица  $A_{(i-1),(i-1)*}$ , выполняет отображение координат системы  $S_{(i-1)*}$  ( $X_{(i-1)*}$ ,  $Y_{(i-1)*}$ ,  $Z_{(i-1)*}$ ) в систему координат  $S_{(i-1)}$  ( $X_{(i-1)}$ ,  $Y_{(i-1)}$ ,  $Z_{(i-1)}$ ), связанных с  $i$ -м звеном, т.е.  $A_{(i-1),(i-1)*} : S_{(i-1)*} \rightarrow S_{(i-1)}$ . Аналогично,  $A_{(i-1)*,i} : S_i \rightarrow S_{(i-1)*}$  и  $A_{(i-1),i} : S_i \rightarrow S_{(i-1)}$ ,  $A_{0,k} : S_k \rightarrow S_0$ ,  $S_k$  – система координат, связанная с  $k$ -м звеном,  $S_0$  – инерциальная система координат, связанная с неподвижным основанием (рис. 1).

В характерной точке выходного звена  $O_n^*$  (TCP – Tool Center Point) поместим начало системы координат  $S_n^*$  ( $X_n^*$ ,  $Y_n^*$ ,  $Z_n^*$ ) ( $n$  – число звеньев манипуляционной системы). Ось  $X_n^*$  расположим в продольном направлении по оси симметрии звена, а ось  $Z_n^*$  – в его плоскости симметрии. Орты этой системы координат определяют ориентацию конечного звена в пространстве (рис. 2).

Разработанная методика позволяет определить соответствие между введенными системами координат и системами координат, традиционно используемыми в робототехнике, такими как BASE, WORLD, FLANGE и TOOL (рис. 3).

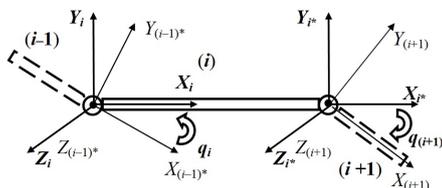


Рис. 1. Системы координат  $S_{(i-1)}$  и  $S_{(i-1)*}$

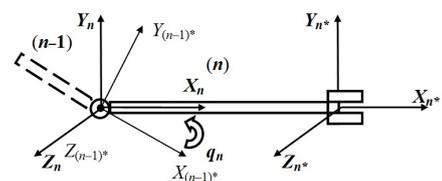


Рис. 2. Система координат  $S_n^*$

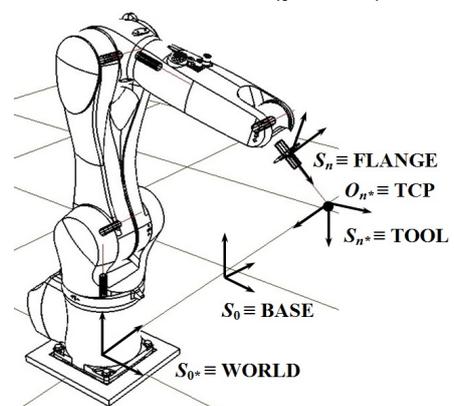


Рис. 3. Системы координат: BASE, WORLD, FLANGE и TOOL

На основе геометрической модели могут быть составлены алгоритмы решения основных задач кинематики, прямой задачи и обратной

$$r^{(0)} = A_{0,k}(q)r^{(k)}, \quad (3)$$

где  $r^{(k)} = [x^{(k)} \ y^{(k)} \ z^{(k)} \ 1]^T$  – радиус-вектор, определяющий локальные координаты точки, заданные в системе координат  $S_k$ , связанной с  $k$ -м звеном;  $r^{(0)} = [x^{(0)} \ y^{(0)} \ z^{(0)} \ 1]^T = [\{X\}^T \ 1]^T$  – радиус-вектор, определяющий инерциальные координаты точки, заданные в неподвижной системе координат  $S_0$ . Уравнение (3) называют функцией положения точки, а решение этого уравнения при заданном векторе обобщённых координат  $q$  – решением прямой задачи кинематики.

Продифференцируем функцию положения, составленную для ТСР:

$$\frac{dr^{(0)}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial A_{0,n}}{\partial q_i} r^{(n)} \frac{dq_i}{dt} \quad \text{или} \quad [J]\{\dot{q}\} = \{\dot{X}\} \rightarrow \{\dot{q}\} = [J]^{-1}\{\dot{X}\}, \quad (4)$$

где  $[J]$  – матрицы Якоби ( $3 \times n$ ). Уравнение (4) представляет собой постановку обратной задачи кинематики по скоростям.

Обобщение рассмотренного подхода позволяет сформулировать концепцию построения кинематического управления манипуляционными роботами, которая может быть проиллюстрирована последовательностью: **объект управления – манипуляционный робот**  $\rightarrow$  **геометрическая модель**  $\rightarrow$  **моделирование кинематики**  $\rightarrow$  **K-управление**.

Алгоритм кинематического K-управления строится на основе двухпараметрической функции, задающей закон регулирования:

$$\{\dot{\tilde{X}}\} = [K_0] \int_0^t (\{X^0\} - \{X\}) dt - [K_1]\{X\}, \quad \{\dot{\tilde{q}}\} = [J]^{-1}\{\dot{\tilde{X}}\}, \quad \{\tilde{q}\} = \int_0^t \{\dot{\tilde{q}}\} dt, \quad (5)$$

где  $[K_0] = \text{diag}\{k_{0s}\}$ ,  $[K_1] = \text{diag}\{k_{1s}\}$  – диагональные матрицы коэффициентов  $k_{0s}$ ,  $k_{1s}$ ,  $s=1, \dots, n$ ,  $\{X^0\}$  – координаты заданной точки. Структурная схема алгоритма управления (5) представлена на рис. 4. Предполагается, что управление приводами замкнуто по положению.

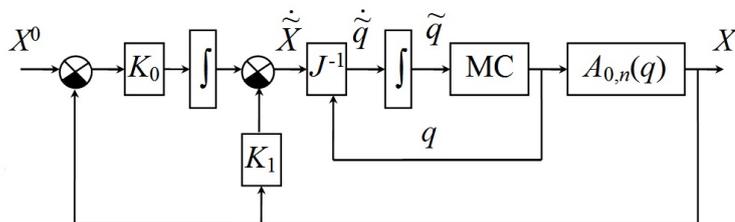


Рис. 4. Структурная схема K-управления

Структура алгоритма управления (5) получена из условия устранения рассогласования по положению МС, выполняемого в соответствии с решением обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка. Для этого необходимо подобрать соответствующие значения коэффициентов усиления  $k_{0s}$ ,  $k_{1s}$ ,  $s=1, \dots, n$ , путём моделирования кинематики МС, выполняемого на основе её геометрической модели.

Моделирование динамики МС роботов в данной работе основывается на методе Лагранжа-Эйлера, который позволяет составить уравнения движения МС, рассматриваемых как системы тел с наложенными на них связями:

$$[M_s]\{\ddot{q}\} + \{\dot{q}\}^T [C_s]\{\dot{q}\} = Q_s, \quad s=(1, \dots, n), \quad (6)$$

$$[M_s(q)] = [m_j^s], \quad m_j^s = \sum_{k=1}^n m_j^{sk}, \quad m_j^s = m_s^s = \sum_{k=1}^n m_j^{sk} + J_s i_s^2, \quad m_j^{sk} = tr \left( \frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_s} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_j} \right);$$

$$[C_s(q)] = \sum_{k=1}^n [c_{ij}^{sk}], \quad c_{ij}^{sk} = tr \left( \frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_s} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_j} \right), \quad i, j=(1, \dots, n),$$

где  $\{\dot{q}\}$ ,  $\{\ddot{q}\}$  – векторы  $(n \times 1)$  первых и вторых производных обобщённых (шарнирных) координат,  $H_k$  – матрица  $(4 \times 4)$  инерции  $k$ -го звена,  $k=(1, \dots, n)$ ,  $J_s$  – момент инерции ротора и редуктора  $s$ -го звена, приведенные к оси  $s$ -й кинематической пары,  $i_s$  – передаточное отношение редуктора  $s$ -го звена.

Путём декомпозиции каждое звено МС может быть представлено в виде совокупности простых или заранее определённых геометрических тел с равномерно распределённой массой (рис. 5).

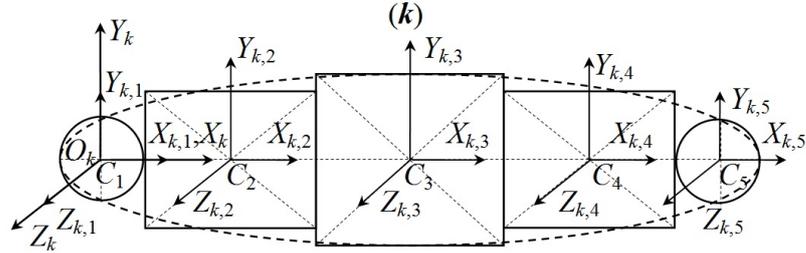


Рис. 5. Моделирование  $k$ -го звена геометрическими телами

Используемые для моделирования геометрические тела (детали) предварительно помещаются в банк (реляционную базу данных). Предложенная структура банка допускает его дальнейшее расширение включением новых моделей, как простейших геометрических форм, так и сложных, составленных из других моделей.

Объединение матриц инерции звеньев, составляющих манипуляционную систему, формирует множество, которое позволяет ввести в рассмотрение новое понятие – инерционную модель

$$H_{k,j} = A c_{k,j} H c_{k,j}^T A c_{k,j}^T, \quad H_k = \sum_{j=1}^{n_k} H_{k,j}, \quad (7)$$

где  $H_{k,j}$  матрица инерции  $j$ -го тела, в системе координат  $S_k=(O_k, X_k, Y_k, Z_k)$ , связанной с моделируемым звеном,  $H c_{k,j}$  матрица инерции  $j$ -го тела в центральной системе координат тела  $S^{(k)}_j=(C_j, X_{k,j}, Y_{k,j}, Z_{k,j})$ ,  $C_j$  – центр масс  $j$ -го тела,  $A c_{k,j}: S^{(k)}_j \rightarrow S_k$ ,  $n_k$  – число тел, моделирующих  $k$ -е звено.

Для завершения динамической модели необходимо сформировать правую часть полученных уравнений движения. Для этого была разработана методика моделирования сил, действующих на звенья МС, с приведением этих сил к обобщённому виду. Например, ММ внешних сил, действующих на звенья МС, приведенных к главному вектору и главному моменту, имеет вид

$$Q_{Fs} = \sum_{k=s}^n \text{tr} \left( F_{Rk} \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_s} + F_{Mk,s} A_{0,s}^T \right), \quad (8)$$

где  $F_{Rk}$  и  $F_{Mk,s}$  – соответственно матрицы внешних сил и моментов, заданных своими главными векторами.

Результирующая величина обобщённой силы определяется суммированием обобщённых сил, соответствующих всем силам и моментам, действующим на звенья МС роботов:

$$Q_s = Q_{Fs} + Q_{Gs} + Q_{Ds}, \quad (9)$$

где  $Q_{Gs}$  – обобщённые силы от сил тяжести звеньев,  $Q_{Ds}$  – усилия, развиваемые приводами.

Полная динамическая модель манипуляционного робота, помимо уравнений движения (6) должна включать динамические модели приводов, обеспечивающих движение звеньев МС, и передаточные функции их редукторов:

$$\tau \dot{D}_s + D_s = f_s(\omega_s, u_s) \rightarrow D_s(\tau_s p + 1) = f_s, \quad \bar{f}_s = \rho_s u_s - \beta_s \omega_s, \quad (10)$$

$$Q_{Ds} = i_s D_s, \quad \omega_s = i_s q_s, \quad s = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где  $D_s$  – момент на валу двигателя,  $\omega_s$  – угловая скорость вращения вала двигателя,  $u_s$  – электрическое напряжение, управляющий параметр,  $\tau_s$  – электромагнитная постоянная двигателя,  $p$  – оператор дифференцирования,  $f_s$  – статическая характеристика электродвигателя,  $\rho_s$ ,  $\beta_s$  – коэффициенты линеаризованной модели,  $i_s$  – передаточное отношение редуктора.

Методы моделирования динамики могут быть положены в основу построения алгоритмов динамического управления. Разработанный подход можно представить последовательностью: **объект управления – манипуляционный робот** → **геометрическая модель + инерционная модель + модель внешней нагрузки + динамические модели приводов = полная динамическая модель** → **моделирование динамики** → **Д-управление**.

Алгоритм динамического Д-управления может быть построен на основе закона регулирования заданного положения МС по ускорению (рис. 6)

$$\{u\} = [\rho]^{-1} \left( [\tau][K] \left( \{\ddot{q}\} - \{\ddot{q}\} \right) + [\beta] \{\dot{q}\} + \{\tilde{D}\} \right), \quad \{\ddot{q}\} = [\Gamma_0] \left( \{q^0\} - \{q\} \right) - [\Gamma_1] \{\dot{q}\}, \quad (12)$$

$$\{\tilde{D}\} = [K] \int_0^t \left( \{\ddot{q}\} - \{\ddot{q}\} \right) dt,$$

где  $[K] = [k_{ij}]$  – матрица  $(n \times n)$  коэффициентов,  $[\tau] = \text{diag}\{\tau_s\}$ ,  $[\rho] = \text{diag}\{\rho_s\}$ ,  $[\beta] = \text{diag}\{\beta_s\}$  – диагональные матрицы постоянных времени и коэффициентов линейных моделей приводов,  $[\Gamma_0] = \text{diag}\{\gamma_{0s}\}$ ,  $[\Gamma_1] = \text{diag}\{\gamma_{1s}\}$  – диагональные матрицы коэффициентов  $\gamma_{0s}$ ,  $\gamma_{1s}$ ,  $s = 1, \dots, n$ .

Силовое взаимодействие звеньев МС учитывается в алгоритме управления (12) через подбор коэффициентов усиления контуров ускорения, составляющих элементы матрицы  $[K]=[k_{ij}]$ . Значения этих коэффициентов определяются на основе анализа полной динамической модели МС (6) – (11).

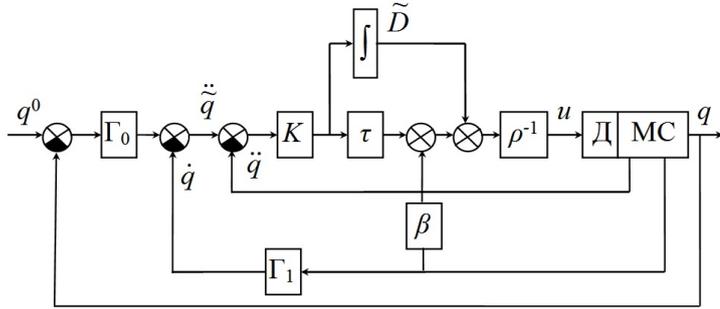


Рис. 6. Структурная схема Д-управления

Поскольку в алгоритме (12) используется следящий контур по ускорению, то возможен переход к диагональному виду матрицы  $[K]=\text{diag}\{k_s\}$ . В таком случае параметры алгоритма управления положением МС могут быть определены независимо для каждого канала  $s=1, \dots, n$  на основе рассмотрения так называемой сепаратной динамической модели, для которой должны быть назначены длительности переходных процессов и допустимое перегулирование.

Определение параметров алгоритмов управления осуществляется путём моделирования динамики МС, выполняемого на основе её полной динамической модели (рис.7).

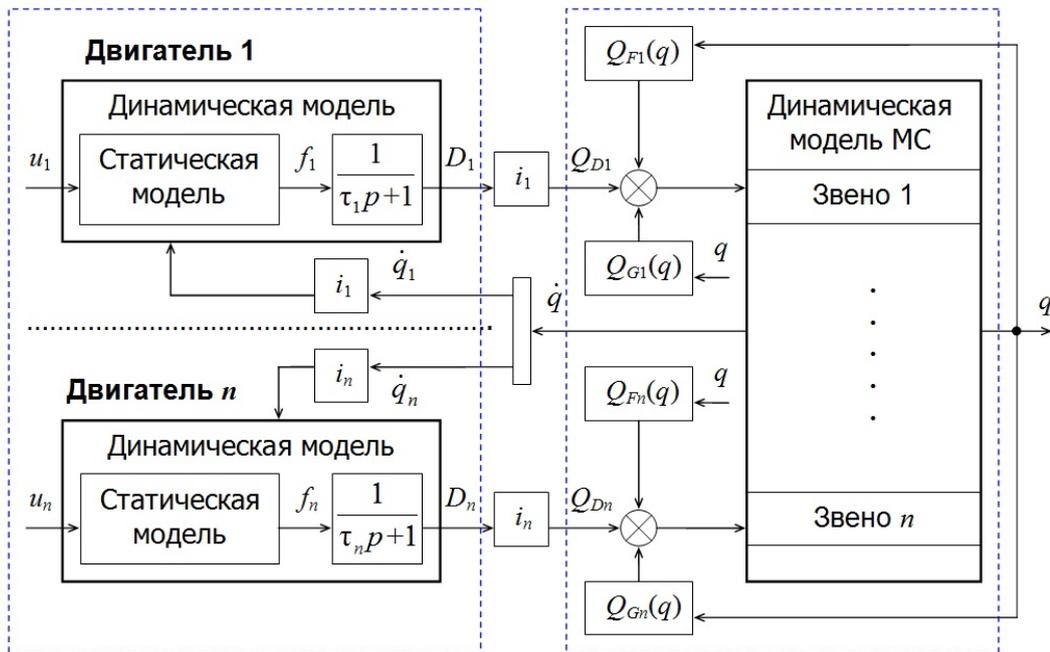


Рис. 7. Структурная схема управления приводами манипуляционного робота

Обобщение рассмотренного подхода позволяет представить концептуальную схему построения управления манипуляционными роботами (рис. 8). На схеме указаны основные составные части моделей управления, позволяющих составлять алгоритмы кинематического К-управления и динамического Д-управления.

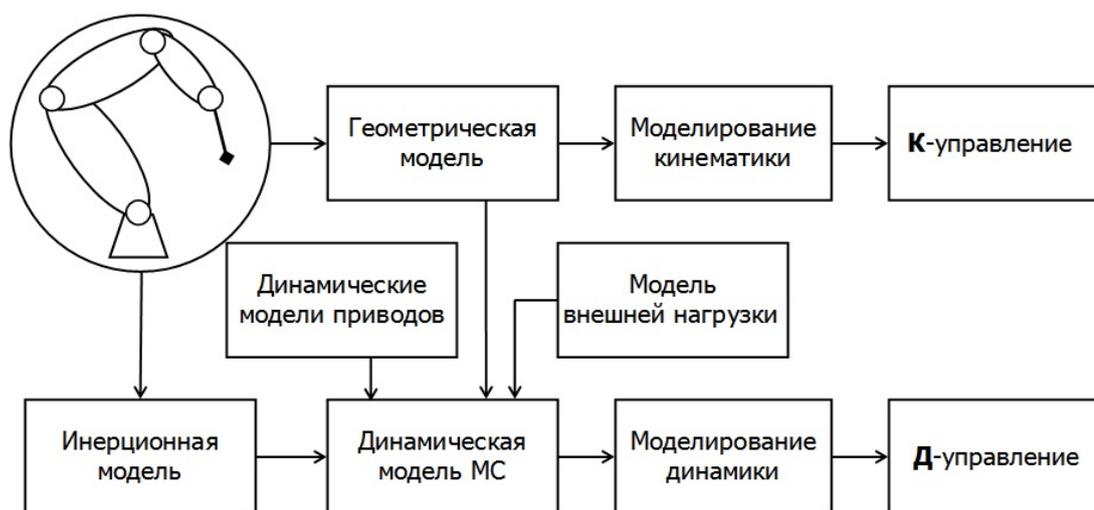


Рис. 8. Концептуальная схема построения управления

**Вторая глава** посвящена моделированию отклонений движения МС роботов. Анализ факторов, влияющих на точность движения манипуляционных роботов, позволил выделить основные из них. К ним относятся геометрические отклонения размеров звеньев МС и так называемые отклонения позиционирования.

Геометрические отклонения размеров звеньев можно разделить на несколько групп. К первой группе можно отнести первичные геометрические (линейные и угловые) отклонения звеньев, возникающие при их изготовлении и сборке. Также к этой группе можно отнести геометрические отклонения звеньев, возникающие при эксплуатации МС, связанные с их износом и повреждением. Такие отклонения могут быть определены метрологическим путём с использованием специальных средств измерения. Ко второй группе можно отнести изменения геометрических размеров звеньев, зависящие от изменения температуры окружающей среды.

При необходимости могут быть учтены геометрические отклонения звеньев, возникающие из-за их упругой податливости, эти отклонения можно отнести к третьей группе. Однако к конструкции звеньев большинства манипуляционных роботов закладываются высокие требования по их жёсткости, поэтому возникающие в них упругие деформации не вносят существенный вклад в измеряемые геометрические отклонения звеньев.

Отклонения позиционирования представляют собой отклонения обобщённых (шарнирных) координат. Как было отмечено, отклонения позиционирования могут иметь различную природу. Ощутимый вклад в эти отклонения вносят зазоры в шарнирах и передаточных механизмах, а также упругая податливость некоторых элементов этих механизмов. В некоторых случаях необходимо учитывать процессы, протекающие в двигателях приводов и связанные с преобразованием того или иного вида энергии в механическую работу.

Для учёта первичных геометрических отклонений (рис. 9) разработано несколько способов модификации геометрических моделей МС. Предложены варианты ММ, соответствующих параметризованной геометрической модели (рис. 10), а также модифицированной и альтернативной геометрическим моделям (рис. 11):

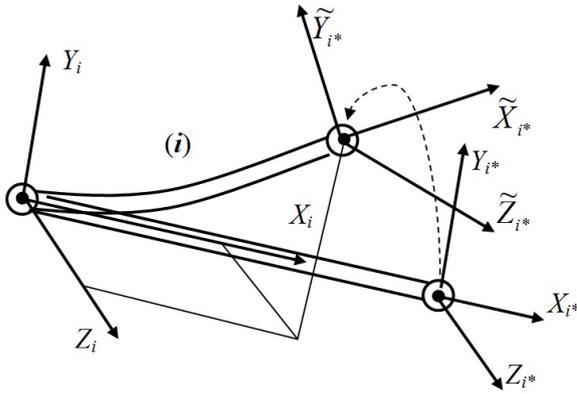


Рис. 9. Первичные отклонения звена

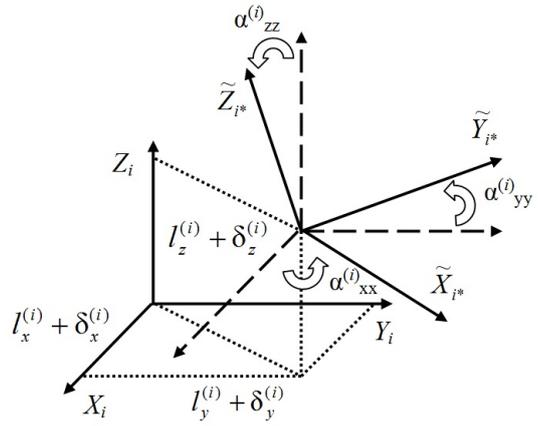


Рис. 10. Линейные и угловые отклонения в параметризованной модели

$$\tilde{A}_{i,i^*} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{xx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{xz}^{(i)}) & l_x^{(i)} + \delta_x^{(i)} \\ \cos(\alpha_{yx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{yz}^{(i)}) & l_y^{(i)} + \delta_y^{(i)} \\ \cos(\alpha_{zx}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zy}^{(i)}) & \cos(\alpha_{zz}^{(i)}) & l_z^{(i)} + \delta_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (3 \times 3) & (3 \times 1) \\ \tilde{R}_i & \tilde{L}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где  $\tilde{A}_{i,i^*}$  – параметризованная геометрическая модель,  $\delta_x^{(i)}, \delta_y^{(i)}, \delta_z^{(i)}$  – линейные отклонения по соответствующим осям координат,  $\alpha_{xx}^{(i)}, \alpha_{xy}^{(i)}, \alpha_{xz}^{(i)}, \alpha_{yx}^{(i)}, \alpha_{yy}^{(i)}, \alpha_{yz}^{(i)}, \alpha_{zx}^{(i)}, \alpha_{zy}^{(i)}, \alpha_{zz}^{(i)}$  – угловые отклонения между соответствующими осями координат.

Модифицировав модель первичных отклонений (13), можно получить альтернативную модель, в которой будут разделены параметры, соответствующие номинальной и реальной моделям (рис. 11). Важным обстоятельством является то, что альтернативная геометрическая модель может быть получена из номинальной геометрической модели путём воздействия на неё специального модификатора, содержащего измеряемые геометрические (линейные и угловые) отклонения

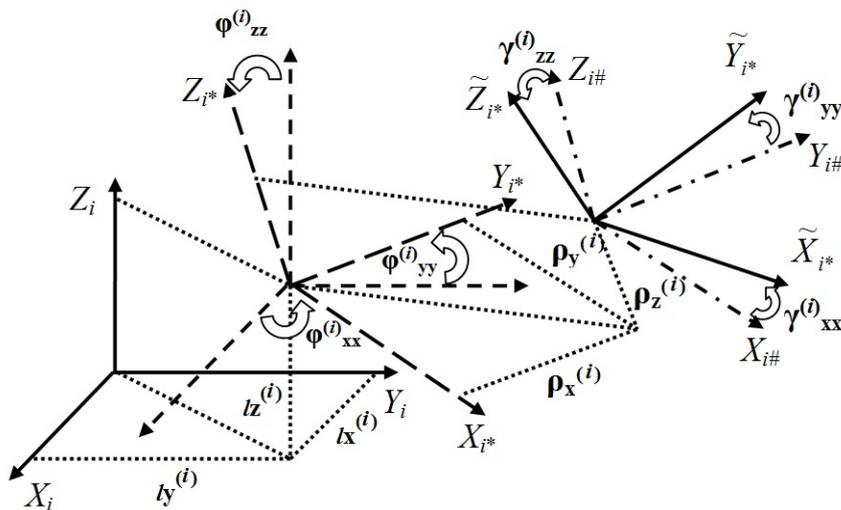


Рис. 11. Линейные и угловые отклонения в альтернативной модели

$$\tilde{A}_{i,i^*} = A_{i,i^*}(\varphi, l) A_{i^*,i^*}(\gamma, \rho), \quad (14)$$

$$\tilde{A}_{i,j^*} = \begin{bmatrix} R_i(\varphi) & L_i(l) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i(\gamma) & L_i(\rho) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\tilde{A}_{i,j^*} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{xx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{xy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{xz}^{(i)}) & l_x^{(i)} \\ \cos(\varphi_{yx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{yy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{yz}^{(i)}) & l_y^{(i)} \\ \cos(\varphi_{zx}^{(i)}) & \cos(\varphi_{zy}^{(i)}) & \cos(\varphi_{zz}^{(i)}) & l_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{xx}^{(i)}) & \cos(\gamma_{xy}^{(i)}) & \cos(\gamma_{xz}^{(i)}) & \rho_x^{(i)} \\ \cos(\gamma_{yx}^{(i)}) & \cos(\gamma_{yy}^{(i)}) & \cos(\gamma_{yz}^{(i)}) & \rho_y^{(i)} \\ \cos(\gamma_{zx}^{(i)}) & \cos(\gamma_{zy}^{(i)}) & \cos(\gamma_{zz}^{(i)}) & \rho_z^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $\varphi^{(i)}$  – углы, определяемые исходным положением МС,  $\gamma^{(i)}$  – углы, образуемые первичными отклонениями формы звеньев и перекосами в шарнирах,  $\rho^{(i)}$  – линейные отклонения, которые могут быть выражены через отклонения  $\delta_x^{(i)}, \delta_y^{(i)}, \delta_z^{(i)}$ .

Сформулированная ранее концепция моделирования кинематического управления манипуляционными роботами может быть расширена на основе разработанных методов модификации геометрических моделей, позволяющих учитывать в этих моделях измеряемые геометрические отклонения звеньев. Расширенная таким образом концепция может быть проиллюстрирована понятийной последовательностью: **объект управления МС** → **номинальная геометрическая модель** × **модификатор геометрических отклонений** = **параметризованная геометрическая модель** → **моделирование кинематики** → **К-управление**.

Важной задачей, связанной с кинематическим управлением манипуляционных роботов, является коррекция возникающих при их движении интегральных отклонений. Интегральные отклонения МС роботов представляют собой отклонения траекторий движения характерных точек звеньев и отклонения ориентации самих звеньев от заданной (программной) траектории движения, вызванные наличием геометрических отклонений звеньев и отклонений позиционирования. Интегральные отклонения могут быть компенсированы, если для построения программных траекторий использовать параметризованные геометрические модели, уточнённые измеренными значениями геометрических отклонений.

Однако на практике часто приходится использовать законы кинематического управления, полученные путём решения обратной задачи кинематики для номинальной МС и заданной программной траектории. Под номинальной МС следует понимать её геометрическую модель, составленную на основе данных конструкторской документации, например, на основе 3D-модели. Для таких случаев разработан метод коррекции интегральных отклонений, представленный в данной работе.

С учётом первичных геометрических отклонений интегральное отклонение траектории  $\Delta r(q)$  можно задать выражениями:

$$\Delta r = \tilde{r} - r, \quad \tilde{r} = \tilde{A}_{0,n} r_o, \quad \Delta r(q) = (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o = \left\{ \begin{array}{l} i_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ j_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \\ k_0^T (\tilde{A}_{0,n} - A_{0,n}) r_o \end{array} \right\}, \quad (17)$$

где  $i_0^T = [1\ 0\ 0\ 0]$ ,  $j_0^T = [0\ 1\ 0\ 0]$ ,  $k_0^T = [0\ 0\ 1\ 0]$  – орты,  $\tilde{r}$  – радиус-вектор текущих координат характерной точки,  $r_o$  – радиус-вектор, задающий программную траекторию.

Использование параметризованных геометрических моделей, уточнённых измеренными значениями *неизменяющихся* геометрических отклонений, тем не менее не всегда обеспечивает достаточную точность вычислений. Проблема состоит в том, что помимо неизменяющихся геометрических отклонений существенное влияние оказывают *изменяющиеся* в процессе движения МС геометрические отклонения. Основными причинами возникновения таких отклонений являются зазоры в шарнирах и упругая податливость элементов их конструкции.

Исследованы методы диагностики кинематического состояния МС роботов. Разработаны ММ для систем управления ПР, позволяющие выполнить калибровку инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота, и базовой системы координат перед вводом робота в эксплуатацию.

Калибровка инструмента выполняется в два этапа. Первый этап калибровки состоит в определении центра инструмента (ТСР). Второй этап включает действия по определению ориентации системы координат TOOL, связываемой с инструментом, начало которой помещается в ТСР. Для этого необходимо модифицировать геометрическую модель МС, описываемую матрицей  $A_{0n}$  (WORLD), путём умножения этой матрицы справа на матрицу  $A_{nn^*}$  (TOOL) (рис. 12):

$$A_{0n^*} = A_{0n} A_{nn^*}: S_0 \leftarrow S_n \leftarrow S_{n^*}.$$

База представляет собой единое пространство с системой координат BASE для ПР, технологического оборудования и объектов манипулирования (рис. 3). При калибровке базы должна быть сформирована геометрическая модель  $A_{Bn^*}$ , отражающая положение системы координат WORLD по отношению к системе координат BASE. Сформированная геометрическая модель дополнит существующую в системе управления математическую модель и позволит описывать программируемые перемещения объекта манипулирования в системе координат BASE (рис. 13) в виде

$$A_{Bn^*} = A_{B0} A_{0n^*}: S_B \leftarrow S_0 \leftarrow S_{n^*}.$$

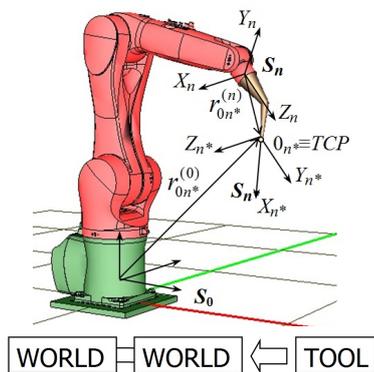


Рис. 12. Калибровка инструмента

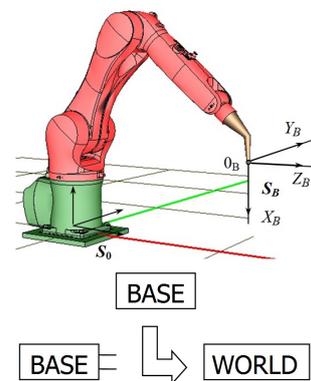


Рис. 13. Калибровка базы

Разработаны три способа калибровки центра инструмента (ТСР): прямой ввод координат ТСР, калибровка базовым инструментом, метод двух подходов. Для калибровки ориентации инструмента разработано два метода: метод параллельных осей и метод калибровки по трём точкам. Для калибровки базы разрабо-

тано три метода, это метод прямого ввода данных и методы калибровки по трём и по двум точкам. Методы калибровки были верифицированы на основе экспериментальных данных, полученных на основе промышленного робота KUKA KR6 AGILUS, оснащённого специальным захватным устройством (рис. 14 и 15).

При проведении натуральных экспериментов рассчитанные значения координат ТСП по ММ, полученным на основе разработанных методов калибровки, совпали с точками позиционирования заострённого наконечника, закреплённого в захватном устройстве промышленного робота, с точностью позиционирования, соответствующей паспортному значению данной модели робота.

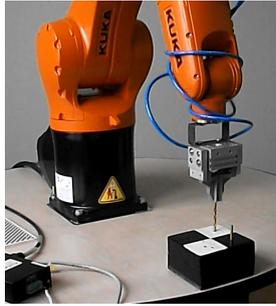


Рис. 14. Экспериментальная установка



Рис. 15. Натурный эксперимент

Для отражения влияния изменяющихся геометрических отклонений при моделировании МС разработаны динамические модели, учитывающие линейные отклонения, соответствующие смещению центров шарниров относительно их номинальных положений, и угловые отклонения, соответствующие перекосу (скручиванию) шарниров. Исключение в полученных динамических моделях элементов, тождественно равных нулю, позволило повысить их вычислительную эффективность в несколько раз.

Динамическая модель, разработанная для моделирования только линейных отклонений, соответствует МС, в которой звенья моделируются 4-степенными шарнирами, а динамическая модель для моделирования только угловых отклонений – 3-степенными шарнирами.

В динамической модели для моделирования как линейных, так и угловых отклонений используются уже 6-степенные шарниры. Отсутствие связей в таких шарнирах может быть компенсировано внешними силами и/или их моментами. Динамическая модель включает шесть уравнений, соответствующих различным значениям линейных и угловых смещений для каждой обобщённой координаты  $s_i$

$$\begin{aligned}
 & [M_i^{sx}] \{\ddot{x}\} + [M_i^{sy}] \{\ddot{y}\} + [M_i^{sz}] \{\ddot{z}\} + \\
 & + [M_i^{sa}] \{\ddot{\alpha}\} + [M_i^{sb}] \{\ddot{\beta}\} + [M_i^{sy}] \{\ddot{\gamma}\} + \\
 & + \{\dot{\alpha}\}^T [C_i^{saa}] \{\dot{\alpha}\} + \{\dot{\beta}\}^T [C_i^{sbb}] \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\gamma}\}^T [C_i^{syy}] \{\dot{\gamma}\} + \\
 & + 2\{\dot{\alpha}\}^T [C_i^{sab}] \{\dot{\beta}\} + \{\dot{\alpha}\}^T [C_i^{say}] \{\dot{\gamma}\} + \{\dot{\beta}\}^T [C_i^{sby}] \{\dot{\gamma}\} + \\
 & + 2\{\dot{x}\}^T [C_i^{sxa}] \{\dot{\alpha}\} + \{\dot{x}\}^T [C_i^{sxb}] \{\dot{\beta}\} + \{\dot{x}\}^T [C_i^{sxy}] \{\dot{\gamma}\} + \\
 & + 2\{\dot{y}\}^T [C_i^{sya}] \{\dot{\alpha}\} + \{\dot{y}\}^T [C_i^{syb}] \{\dot{\beta}\} + \{\dot{y}\}^T [C_i^{syy}] \{\dot{\gamma}\} + \\
 & + 2\{\dot{z}\}^T [C_i^{sza}] \{\dot{\alpha}\} + \{\dot{z}\}^T [C_i^{szb}] \{\dot{\beta}\} + \{\dot{z}\}^T [C_i^{szy}] \{\dot{\gamma}\} = Q_i^s.
 \end{aligned} \tag{18}$$

где  $s_i = (x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ ,  $i=(1, \dots, n)$  – обобщённые координаты:  $x_i, y_i, z_i$  – линейные;  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – угловые.

Правая часть уравнений (18) представляет собой обобщённые силы в  $i$ -м шарнире по соответствующей обобщённой координате. Если обобщённая координата соответствует линейному или угловому смещению в данном шарнире, вызванному упругими деформациями, то обобщённая сила может быть задана выражением

$$Q_i^s = -w_i^s s_i - b_i^s \dot{s}_i, \quad (19)$$

где  $w_i^s$  и  $b_i^s$  – коэффициенты жёсткости и вязкости  $i$ -го шарнира в направлении изменения  $s_i$ -й обобщённой координаты.

Для определения влияния отклонений позиционирования на движение МС разработана динамическая модель, учитывающая малые отклонения обобщённых (шарнирных) координат, соответствующих упругим деформациям, часто возникающим в передаточных механизмах приводов.

Исследуемые отклонения позиционирования предложено разложить на две компоненты

$$\Delta q_i = \Delta q_i^{ks} + \Delta q_i^d, \quad i=(1, \dots, n). \quad (20)$$

Одна компонента  $\Delta q_i^{ks}$  представляет собой квазистатическую составляющую отклонения, а вторая  $\Delta q_i^d$  динамическую (колебательную). Это позволило при моделировании разделить вычисление медленно и быстро протекающих процессов.

Динамическая модель, разработанная на основе метода малого параметра путём декомпозиции исходного уравнения движения, представляет собой систему трёх уравнений. Первое уравнение представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее программное движение МС. Второе уравнение, являющееся также дифференциальным, описывает малые упругие колебания около квазистатического положения равновесия, возникающие при движении МС. Третье уравнение является алгебраическим, оно позволяет определить квазистатические смещения МС от заданных (программных) траекторий движения

$$\begin{cases} [M_i(q)]\{\ddot{q}\} + \{\dot{q}\}^T [C_i(q)]\{\dot{q}\} = Q_{Di} + Q_{Gi} + Q_{Fi}, \\ [M_i(q)]\{\Delta \ddot{q}^d\} + 2\{\dot{q}\}^T [C_i(q)]\{\Delta \dot{q}^d\} = -w_i \Delta q_i^d - b_i \Delta \dot{q}_i^d, \\ Q_{Di} = -w_i \Delta q_i^{ks}, \quad i=(1, \dots, n). \end{cases} \quad (21)$$

Разработанные методики позволяют выполнять подготовку соответствующих моделей управления МС роботов.

**В третьей главе** представлена методология математического объектного моделирования МС, позволяющая на основе объектного представления ММ МС роботов выполнять их декомпозицию, и предложен научно обоснованный подход к структурной адаптации систем управления манипуляционными роботами. Предложенный подход дополняет рассмотренные ранее концепции кинематического и динамического управления манипуляционными роботами (рис. 4 и 6), реализующими параметрическую адаптацию, возможностью проведения структурной модификации ММ МС в тех частях, которые соответствуют её геометрической и инерционной моделям (рис. 8).

Объектное моделирование в рассматриваемой методологии реализуется путём выделения в структуре данных и алгоритмов базовых классов, на основе которых создаются другие более сложные классы, из которых уже непосредственно формируются ММ. В данном случае класс нужно рассматривать как форму структуры, являющейся общей для определённой группы объектов, отнесенных к данному классу.

Под объектами следует понимать определённые части ММ. Первоначально создаются базовые классы. Последующее определение классов, наследующих свойства базовых, позволяет использовать объектно-ориентированный подход при составлении ММ и программировании алгоритмов, реализующих эти модели.

Поскольку ММ МС представляют собой матричные уравнения, то в качестве базового класса для всех объектов, соответствующих структурным частям таких моделей, предложено использовать класс матриц (Matrix). На основе этого класса, наследуя его структуру, был создан класс матриц преобразования однородных координат (Homogeneous\_matrix). Далее на основе этого класса, в соответствии с разработанной методикой, создан класс Geometric\_model, содержащий массивы таких матриц, составляющих геометрическую модель МС (рис. 16).

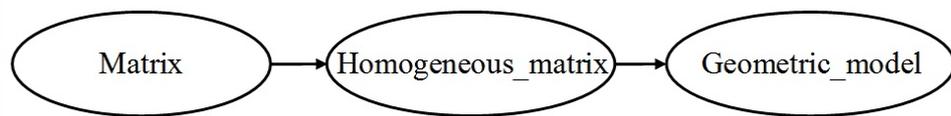


Рис. 16. Схема образования класса Geometric\_model

Таким образом, ММ могут быть представлены как совокупности взаимодействующих объектов, на уровне которых может быть выполнена их декомпозиция. Введение графического обозначения объектов позволило получить схематичное представление ММ, составленных из объектов, в виде их объектных схем.

Если объект, представляющий собой матричную структуру, изображать прямоугольником, то операцию умножения двух таких объектов можно будет представить приставлением изображения одного объекта к изображению другого объекта по одной из сторон (рис. 17), а операцию сложения и присваивания соответственно как на рис. 18 и 19.

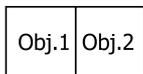


Рис. 17. Умножение

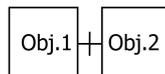


Рис. 18. Сложение

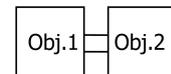


Рис. 19. Присваивание

Объектное представление (объектная схема) матричных выражений, определяемых формулами (1) и (2) как совокупности взаимодействующих объектов для  $i=(1-3)$ , будет иметь вид рис. 20–23.

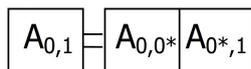


Рис. 20. Объектное представление

$$A_{0,1} = A_{0,0} * A_{0*,1}$$

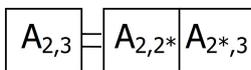


Рис. 22. Объектное представление

$$A_{2,3} = A_{2,2} * A_{2*,3}$$

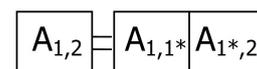


Рис. 21. Объектное представление

$$A_{1,2} = A_{1,1} * A_{1*,2}$$

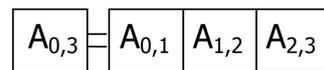


Рис. 23. Объектная схема математической модели трёхзвенной МС

На основе классов модифицированных геометрических моделей могут быть образованы объекты, которые позволят с большей точностью решать задачи управления реальными образцами роботов. Например, совместное использование объектов номинальной и модифицированной геометрических моделей (рис. 24) позволит решать задачу коррекции интегральных отклонений по методу (17).

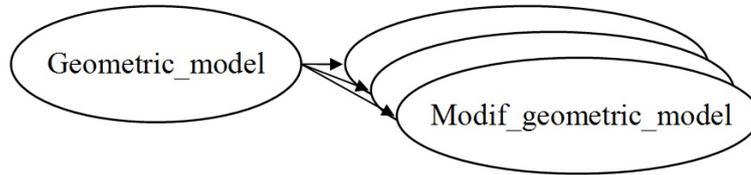


Рис. 24. Схема образования производных классов

При вычислении кинематических параметров выполняется операция дифференцирования матриц преобразования однородных координат, данная операция может быть выполнена с использованием специальных матриц (рис. 25–27).

$$D_2 A_{1,2} = \begin{bmatrix} A_{1,2} & D_2 \end{bmatrix}$$

Рис. 25. Модель  $\frac{\partial A_{1,2}}{\partial q_2} = A_{1,2} D_2$

$$D_2 A_{0,6} = \begin{bmatrix} A_{0,1} & A_{1,2} & D_2 & A_{2,6} \end{bmatrix}$$

Рис. 26. Модель  $\frac{\partial A_{0,6}}{\partial q_2} = A_{0,1} A_{1,2} D_2 A_{2,6}$

$$D_2 D_4 A_{0,6} = \begin{bmatrix} A_{0,2} & D_2 & A_{2,4} & D_6 & A_{2,4} \end{bmatrix}$$

Рис. 27. Модель  $\frac{\partial^2 A_{0,6}}{\partial q_2 \partial q_4} = A_{0,2} D_2 A_{2,4} D_4 A_{4,6}$

Объектная схема, представляющая выражение для вычисления скорости некоторой точки 3-го звена МС робота в неподвижной системе координат  $S_0$ , заданной своим радиус-вектором  $r^{(3)}$  в системе координат  $S_3$

$$V^{(0)} = \left( \frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_3} \dot{q}_3 \right) r^{(3)}, \quad (22)$$

будет иметь вид, представленный на рис. 28.

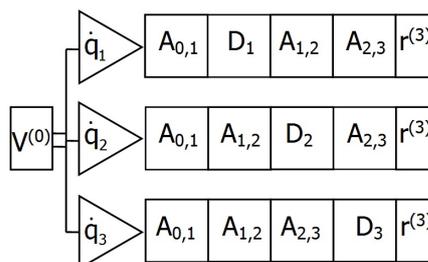


Рис. 28. Объектная схема ММ (22)

На объектной схеме (рис. 28) скалярные элементы изображены в форме треугольников.

По аналогии с классом `Geometric_model`, используя класс `Matrix`, сначала создаётся класс `Inertial_matrix`, содержащий структуру матриц инерции и методы, выполняющие их инициализацию и операции с ними, и на основе уже этого класса создаётся класс `Inertial_model` (рис. 29).

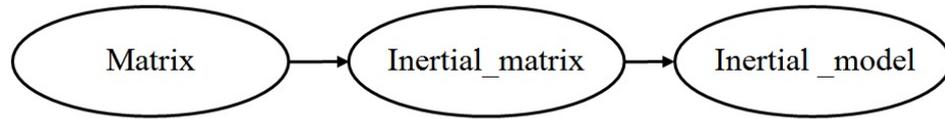


Рис. 29. Схема образования класса `Inertial_model`

Например, объектная схема инерционной модели (7) трёхзвенной манипуляционной системы, в которой первое звено моделируется одним телом, второе – двумя телами, а третье – тремя, будет иметь вид рис. 30.

На схеме рассматриваемой инерционной модели использовано обозначение операции транспонирования объекта класса `Homogeneous_matrix` с присвоением результата другому объекту этого же класса. Выполнение данной комбинированной операции проиллюстрировано на рис. 31.

Выполнение операций с объектами, представленными на объектных схемах, производится сверху вниз и справа налево.



Рис. 30. Схема объектного представления инерционной модели

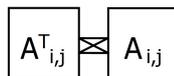


Рис. 31. Операция транспонирования

При объектном представлении ММ внешних сил, действующих на звенья манипуляционных систем (8), необходимо использовать объекты определённых ранее классов и объектов, соответствующих классам, которые необходимо создать для учёта влияния внешних сил. Для объектов, моделирующих матрицы  $F_{Rk}$  и  $F_{Mks}$ , отражающие влияние внешних сил и моментов, на основе класса `Matrix` могут быть созданы классы `External_force_matrix` и `External_moment_matrix` соответственно (рис. 32 и 33).

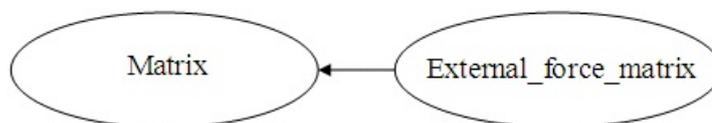


Рис. 32. Наследственная цепочка класса `External_force_matrix`

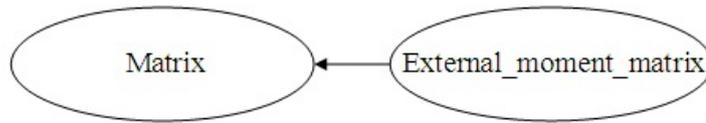


Рис. 33. Наследственная цепочка класса External\_moment\_matrix

Например, объектная схема модели внешних сил, действующих на звенья трёхзвенной МС, будет иметь вид рис. 34. В этой объектной схеме использована операция  $tr$  вычисления суммы диагональных элементов матрицы. Данная операция изображается треугольником, направленным противоположно изображению скалярной величины.

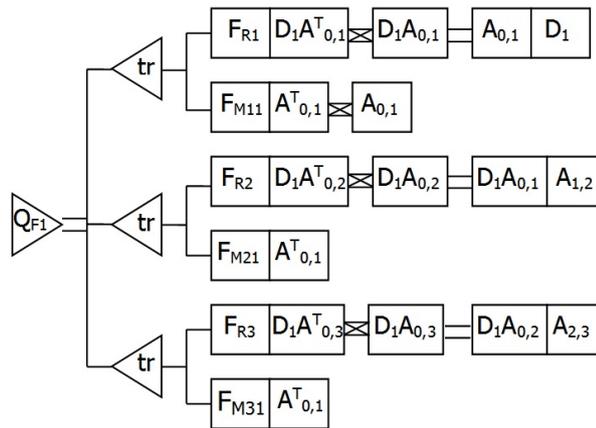


Рис. 34. Объектное представление модели внешних сил

В динамической модели МС (6) можно выделить две группы объектов. К первой группе можно отнести матричные коэффициенты  $M_s$ ,  $C_s$ , а ко второй векторы обобщённых координат, их скоростей и ускорений, а также вектор обобщённых сил, составляющий правую часть динамических моделей. Классы, определяющие структуру и свойства этих объектов, могут основываться на общем для них базовом классе Matrix.

Схема объектного представления динамической модели (6) будет иметь вид рис. 35.

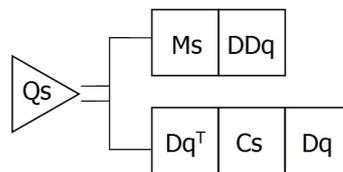


Рис. 35. Объектная схема динамической модели

Объекты  $M_s$  и  $C_s$ , представленные на схеме (рис. 35) и соответствующие матрицам  $M_s$  и  $C_s$ , сами являются вычисляемыми объектами. Например, элемент  $m_j^{sk}$  матрицы  $[m_j^{sk}]$  для случая  $j=1, s=2, k=3$  может быть вычислен на основе выражения

$$m_1^{23} = tr \left( \frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} H_3 \frac{\partial A_{0,3}^T}{\partial q_1} \right). \quad (23)$$

Схема, соответствующая объектному представлению матричного выражения (23), имеет вид (рис. 36).

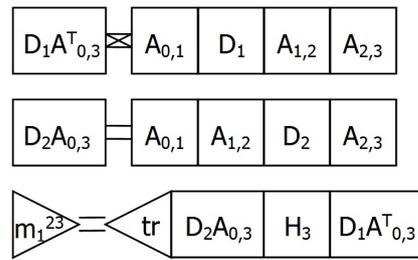


Рис. 36. Схема объектного представления элемента  $m_1^{23}$

Элемент  $c_{ij}^{sk}$  матрицы  $[c_{ij}^{sk}]$  для случая  $i=1, j=2, s=2, k=3$  может быть вычислен на основе выражения

$$c_{12}^{23} = tr \left( \frac{\partial A_{0,3}}{\partial q_2} H_3 \frac{\partial^2 A^T_{0,3}}{\partial q_1 \partial q_2} \right). \quad (24)$$

Схема, соответствующая объектному представлению матричного выражения (24), имеет вид (рис. 37).

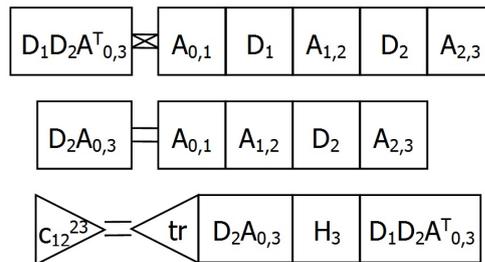


Рис. 37. Схема объектного представления элемента  $c_{12}^{23}$

Необходимо учитывать, что рассмотренные примеры позволяют вычислить элементы матриц слагаемых, в сумме составляющих соответствующие матричные коэффициенты  $M_s$  и  $C_s$  (3). Так, например, матрицы  $[c_{ij}^{sk}]$  входят в сумму, составляющую матричный коэффициент  $C_s$ , в соответствии с выражением

$$[C_s] = \sum_{k=1}^n [c_{ij}^{sk}]. \quad (25)$$

На основе рассмотренных объектных схем могут быть вычислены элементы всех матричных коэффициентов, составляющих динамическую модель (6).

**В четвёртой главе** отражены аспекты практического применения объектного моделирования МС роботов. Одним из которых является, собственно, сам процесс составления ММ.

Разработка ММ представляет собой многократно повторяющийся процесс математического моделирования, включающий в себя три последовательных этапа представленных на схеме (рис. 38).

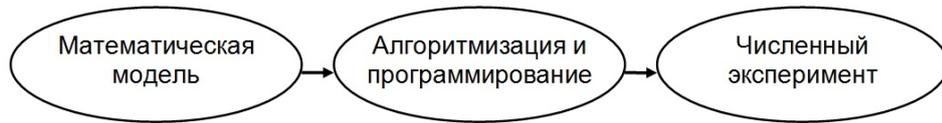


Рис. 38. Процесс математического моделирования

Разработанная методология предлагает не ограничиваться составлением ММ в форме систем уравнений, а создавать эквивалентные этим ММ объектные схемы (рис. 39). Для этого в уравнениях ММ выделяют части, которым ставят в соответствие объекты определённых классов. Это позволяет различные ММ составлять из отдельных, независимых друг от друга частей-объектов. Эти части в свою очередь также могут состоять из других более простых частей-объектов.

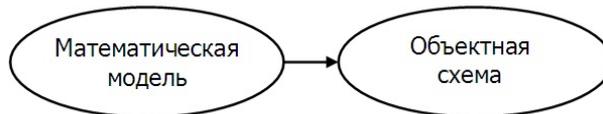


Рис. 39. Объектно-ориентированное моделирование

В результате ММ может быть представлена в виде сложной объектной схемы (комплекса), а выделяемые в структуре этой объектной схемы части могут рассматриваться как отдельные компоненты. Компоненты состояются из объектов, имеющих в свою очередь структуру классов, которые могут быть реализованы программно средствами объектно-ориентированных языков программирования.

Таким образом, объектные схемы ММ могут собираться из объектов различных классов как из набора деталей в конструкторе LEGO. Для реализации процесса сборки объектных схем разработан формализм, который определяет «механизм» взаимодействия соединяемых друг с другом объектов соответствующих классов, рассматриваемых как элементы конструктора ММ.

Основное правило, определяющее работу «механизма» сборки объектных схем ММ, может быть сформулировано так: объекты одного класса или разных классов, наследующих свойства другого общего (базового) для них класса, могут соединяться друг с другом. Необходимым условием является соблюдение непрерывности вычислений, генерируемых объектными схемами. В большинстве случаев для этого достаточно в процессе сборки объектных схем соблюдение формальных математических правил, а в процессе выполнения вычислений по ним контроля деления на ноль.

Обобщая изложенное о структуре объектных схем ММ, можно сказать, что объектные схемы представляют собой описание соответствующих ММ, выполненное по правилам некоторого языка объектно-ориентированного моделирования (именно моделирования, а не программирования).

Составление объектных схем удобно выполнять в среде специально разработанной компьютерной программы, автоматизирующей этот процесс на основе принципа визуального конструирования. Данный подход позволяет объединить первые два этапа разработки ММ. При этом для исследователя исключается стадия алгоритмизации и программирования, остаётся только проведение численного эксперимента и анализ его результатов (рис. 40).

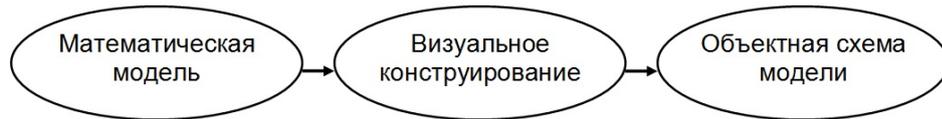


Рис. 40. Визуальное конструирование объектных схем

Для создания объектных схем в компьютерной среде, поддерживающей процесс их конструирования, могут быть использованы шаблоны. Шаблоны представляют собой заготовки схемных решений, наиболее часто используемых при создании объектных схем. В отличие от объектных схем при создании их шаблонов не формируются вычислительные алгоритмы. Шаблоны представляют собой каркасную основу для некоторых частей объектных схем, которую можно использовать для создания необходимой части-объекта при визуальном конструировании объектной схемы.

По существу, разработанный метод визуального конструирования объектных схем ММ является разновидностью методов визуального программирования, отличающийся от других в первую очередь своей прикладной направленностью и меньшим формально-математическим контролем конструируемой объектной схемы ММ.

В соответствии с разработанной методологией на основе декомпозиции ММ МС роботов было установлено, что в структуре составных частей этих ММ находятся объекты, соответствующие двум основным классам. Это объекты класса геометрических моделей *Geometric\_model* и класса инерционных моделей *Inertial\_model*. Причём при построении кинематических моделей используются только объекты класса *Geometric\_model*, а при построении динамических моделей эти объекты входят в сочетании с объектами *Inertial\_model*.

Разработанная методология объектно-ориентированного моделирования МС роботов позволяет повысить эффективность выполнения работ, связанных с составлением параллельных вычислительных алгоритмов. Это достигается на основе представления ММ в виде объектных схем, в которых каждый объект рассматривается как часть ММ, независимая от других частей-объектов, связанных с ним в общую схему.

Иерархическая структура алгоритма параллельных вычислений динамической модели (6), разбитого на несколько уровней и соответствующего объектной схеме (рис. 35) без моделирования внешней нагрузки может быть проиллюстрирована на рис. 41.

Дальнейшее распараллеливание вычислений, выполняемых на соответствующих уровнях рассмотренного алгоритма параллельных вычислений динамической модели МС роботов, может быть выполнено на основе алгоритмов параллельных вычислений матричных операций.

Умножение прямоугольных матриц ( $n \times m$ ) определяется соотношением

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^k a_{il} b_{lj}, i = \{1, \dots, n\}, j = \{1, \dots, m\}. \quad (26)$$

В случае умножения квадратных матриц размерности  $n \times n$  количество скалярных операций умножения и сложения пропорционально  $n^3$ , а для их оценки может быть использована величина

$$T_1 = 2n^3. \tag{27}$$

Последовательности выполняемых операций умножения отдельных строк первой матрицы на соответствующий столбец второй матрицы являются независимыми и могут быть выполнены параллельно. Алгоритм параллельного вычисления умножения матриц может быть построен на основе рассмотренного вычислительного алгоритма умножения матрицы на вектор. Соответственно необходимое количество процессоров для максимального распараллеливания вычислительного алгоритма будет определяться величиной

$$p = n^3. \tag{28}$$

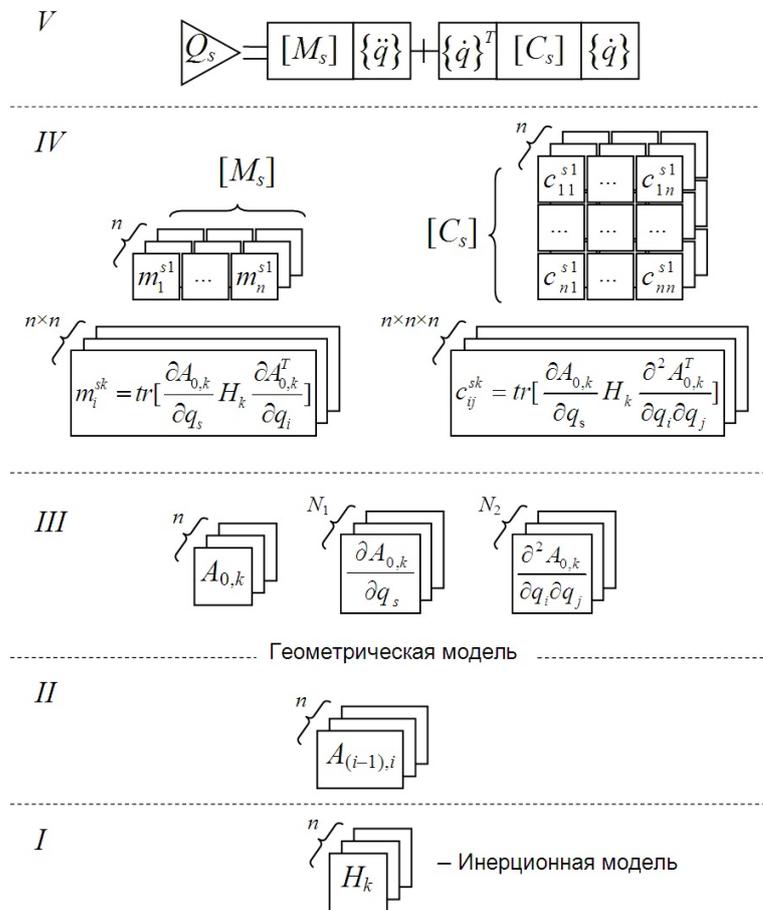


Рис. 41. Уровни алгоритма параллельных вычислений динамической модели

Время выполнения параллельного алгоритма, отнесенное ко времени выполнения одной скалярной операции, при использовании  $p$  процессоров определяется временем выполнения операции умножения и временем выполнения каскадного алгоритма суммирования

$$T_p = 1 + \log_2 n. \tag{29}$$

Показатели эффективности параллельного алгоритма соответственно

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} = \frac{2n^3}{1 + \log_2 n}, \quad (30)$$

где  $S_p$  – ускорение для  $p$  процессоров, получаемое при использовании параллельного алгоритма;

$$E_p = \frac{S_p}{p} = \frac{2}{1 + \log_2 n}. \quad (31)$$

где  $E_p$  – эффективность использования процессоров.

Информационный граф, соответствующий вычислительному процессу умножения матриц  $(4 \times 4)$ , построенный на основе 64 процессоров, представлен на рис. 42.

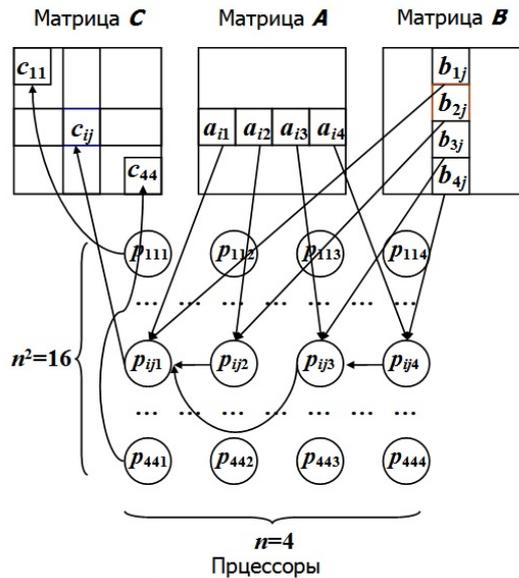


Рис. 42. Информационный граф вычислительного процесса умножения матриц  $(4 \times 4)$  на основе 64 процессоров

Снижение числа используемых процессоров потребует перестройки информационного графа (рис. 42), отражающего вычислительный процесс умножения матриц. Это повлечёт увеличение времени выполнения вычислений.

Алгоритм параллельных вычислений динамической модели имеет уровень инициализации данных и пять уровней распараллеливания (рис. 41).

На уровне I, следующем за уровнем инициализации данных, вычисляются объекты инерционной модели МС, соответствующие матрицам инерции звеньев  $H_k$ . Для их вычисления используются объекты, соответствующие матрицам инерции тел  $H_{Ck,i}$  и объекты, соответствующие матрицам преобразования однородных координат  $A_{Ck,i}$  см. (7). Количество тел  $m_k$ , используемых для моделирования, фиксируется для каждого звена.

Граф вычислительного процесса матрицы  $H_k$  для 6 тел, используемых для моделирования  $k$ -го звена, представлен на рис. 43.

Анализ данного графа показывает, что для его реализации необходимо одновременно выполнять умножение и транспонирование 6 матриц  $(4 \times 4)$ . Умножение таких матриц требует максимально применения 64 процессоров (рис. 42), а их транспонирование – 16.

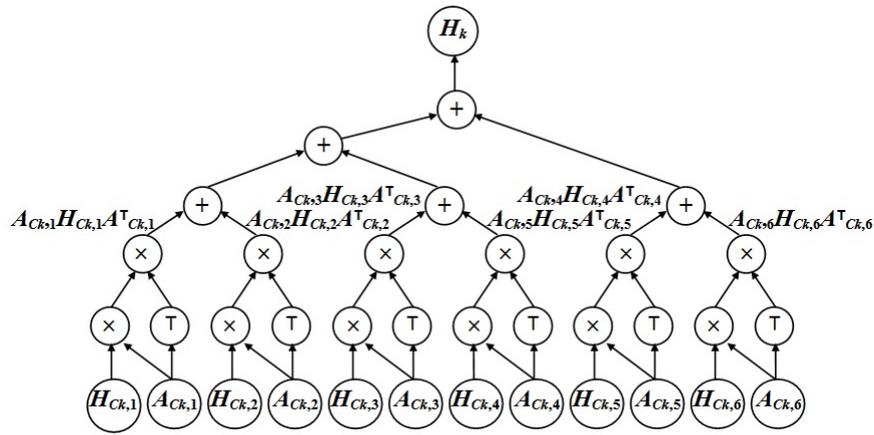


Рис. 43. Граф вычислительного процесса матрицы  $H_k$  для 6 тел

Аналогично строятся графы вычислительных процессов для всех остальных уровней алгоритма параллельных вычислений динамической модели.

Применение параллельных вычислительных алгоритмов в задачах моделирования требует от вычислительных систем наличия достаточного количества процессоров. Это требование может быть реализовано на основе многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем, созданных на основе применения программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Такие вычислительные системы могут адаптироваться под структуру решаемой задачи и обеспечить реализацию сложных многоуровневых параллельных алгоритмов.

Разработанные в диссертации объектно-ориентированные методы моделирования позволяют решать задачи синтеза оптимальных структур новых манипуляционных роботов на основе использования генетического алгоритма. Генетический алгоритм представляет собой стохастический метод оптимизации, реализованный по аналогии с эволюционными процессами, протекающими в природе, и позволяющий при его компьютерной реализации за доли секунды проследить генетические изменения в нескольких десятках поколений.

Генетический алгоритм может быть распараллелен и выполняться на многопроцессорных вычислительных системах (транспьютерах). Например, если популяция состоит из  $N$  особей, то вычислительная система, содержащая  $N/2$  процессоров, выполнит операцию рекомбинации над всеми особями популяции и сформирует новое поколение за несколько тактов работы одного процессора.

Изменения, происходящие с хромосомами особей внутри поколения, осуществляются с использованием генетических операторов. Основными операторами в генетическом алгоритме являются оператор выбора родителей, оператор скрещивания родительских хромосом (оператор рекомбинации), оператор мутации, оператор отбора особей в новую популяцию и др. Все генетические операторы реализуются с использованием случайных функций, поэтому генетические алгоритмы относятся к стохастическим методам.

Рассмотрим механизм выполнения операции мутации на примере модификации геометрической модели МС роботов. Например, рассмотрим объектную схему геометрической модели трёхзвенной МС (рис. 23). Данная объектная схема может быть целенаправленно подвержена модификации по методу структурных мутаций ММ, например, путём перестановки объектов в схеме местами (рис. 44),

или путём исключения (удаления) объектов из схемы (рис. 45). Также может быть выполнена замена объектов на объекты того же класса, но имеющие другие параметры, или иные объекты, внедрение которых в структуру объектной схемы не нарушает условия непрерывности вычислений, выполняемых по этой объектной схеме.

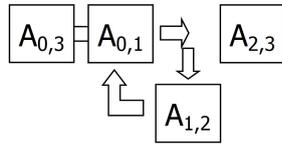


Рис. 44. Перестановка объектов  $A_{0,1}$  и  $A_{1,2}$

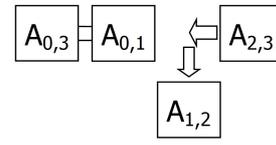


Рис. 45. Исключение объекта  $A_{1,2}$

На физическом уровне, выполненные модификации исходной ММ (рис. 23) приводят, в случае перестановки объектов, к рассмотрению трёхзвенной МС, у которой, в соответствии с рис. 44, переставлены местами первое и второе звенья, а исключение объекта, в соответствии с рис. 45, – к отсоединению второго звена и присоединению третьего звена к первому. Технически такие операции могут быть осуществлены на реальных манипуляционных роботах, конструкция которых выполнена на основе унифицированных модулей.

Рассмотрим применение метода структурных мутаций ММ на примере модификации динамических моделей МС роботов на примере динамической модели (18), учитывающей линейные и угловые отклонения в шарнирах.

Поскольку причины, вызывающие рассматриваемые отклонения, носят случайный характер, при моделировании движения реального манипуляционного робота с использованием данной динамической модели возникает проблема, связанная с определением последовательности угловых отклонений (перекосов), возникающих в каждом шарнире МС. Это связано с тем, что при составлении уравнений следует учитывать некоммутативность введенных угловых отклонений.

Обеспечить необходимую адекватность синтезируемой динамической модели реальному манипуляционному роботу можно на основе совместного перебора сочетаний (комбинаций) всех возможных угловых отклонений для всех шарниров. При этом для каждого такого сочетания необходимо сформировать динамическую модель и сопоставить получаемые на её основе результаты с движением реального робота. Метод структурных мутаций ММ позволяет автоматизировать данную процедуру.

По аналогии с рассмотренным ранее примером модификации геометрической модели трёхзвенной МС, путём перестановки и замены её звеньев, в данном случае моделируются варианты, описывающие последовательности возникающих отклонений (перекосов) в шарнирах МС. Внесенные в объектную схему изменения путём перестановки соответствующих объектов (рис. 46–48), автоматически учитываются в динамической модели. Необходимо также отметить, что изменения в объектных схемах могут затрагивать не только геометрическую модель МС робота, но и её инерционную модель.

В данном случае отдельные гены и составленные из них хромосомы представляют собой части компьютерных программ (программный код), которые в результате применения генетических операторов могут изменяться или заменяться на другой код.

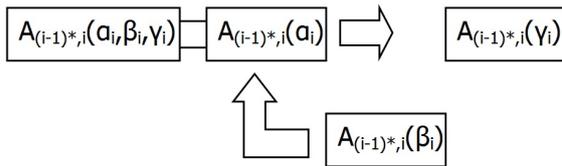


Рис. 46. Рокировка объектов

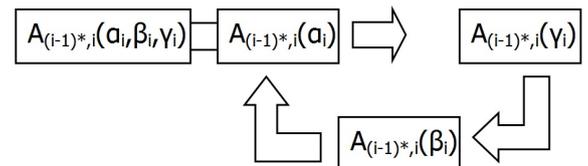


Рис. 47. Круговая перестановка объектов

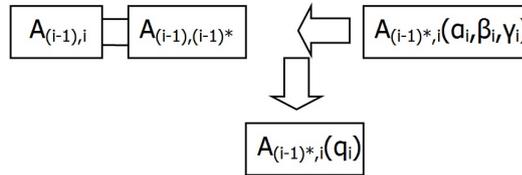


Рис. 48. Замещение объекта

Исходя из имеющейся аналогии в создании и модификации компьютерных программ и объектных схем, предлагается распространить технологию генетического программирования на синтез и анализ объектных схем. В такой постановке задача генетического программирования может формулироваться как задача поиска оптимальной объектной схемы (ММ) на основе генетического алгоритма. Это позволяет сформулировать научно обоснованный подход к решению задачи синтеза оптимальных структур МС роботов, на основе объектного описания их математических моделей и последующей модификации получаемых объектных схем, в результате применения генетического алгоритма.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Выработан единый подход – методология моделирования МС роботов и на её основе рассмотрены постановка и решение задач кинематического и динамического управления манипуляционными роботами.

2. Разработано специальное математическое обеспечение, позволяющее учитывать разного рода отклонения в конструкциях МС роботов, методы коррекции таких отклонений и методы оценки точности получаемых решений.

3. Разработаны методы самодиагностики кинематических структур МС роботов, включающие три метода калибровки центра инструмента (ТСР), два метода калибровки ориентации инструмента и три метода калибровки базы. Методы калибровки были верифицированы на основе экспериментальных данных.

4. На основе выработанной методологии и объектно-ориентированного подхода разработан формализм объектного описания ММ МС роботов в виде объектных схем.

5. Составлены объектные схемы ММ методов моделирования МС роботов для решения функциональных задач управления манипуляционными роботами.

6. Раскрыты преимущества объектного моделирования при синтезе оптимальных структур МС роботов, на основе объектного описания их ММ и последующей модификации получаемых объектных схем, в результате применения генетического алгоритма. Разработан алгоритм параллельных вычислений динамической модели МС роботов.

Представленная в диссертации методология математического объектного моделирования МС роботов позволяет автоматизировать создание программного обеспечения для решения функциональных задач управления манипуляционными роботами с использованием т.н. Low-code технологий в режиме визуального или автоматического программирования.

Разработанные методы позволяют выполнять как параметрическую адаптацию системы управления к изменяющемуся возмущению, так и структурную адаптацию, путём реконфигурации модели управления на основе анализа изменяющихся внешних условий и самодиагностики.

В ходе теоретических исследований и компьютерного моделирования обосновано, что представленные в диссертации методы и алгоритмы могут быть использованы для разработки математического обеспечения систем управления манипуляционными роботами, обладают универсальностью при управлении роботами с различной кинематической структурой, а функции самодиагностики позволяют решить задачи управления также и роботами с изменяющейся кинематической структурой.

Полученные результаты подтверждают, что на основании выполненных исследований **разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение**, заключающееся в разработке ММ и методов моделирования манипуляционных роботов, позволяющих учитывать и анализировать влияние разного рода отклонений и возмущений и основывающихся на единой методологии и объектно-ориентированном подходе, составляющих основу специального математического обеспечения для решения функциональных задач управления манипуляционными роботами, позволяющего проводить параллельные вычисления и синтез управления путём реконфигурации модели управления на основе процедур самодиагностики и оптимизации.

### **Основное содержание диссертации опубликовано.**

#### *Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК:*

1. **Крахмалев, О.Н.** Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами / О.Н. Крахмалев, Л.И. Блейшмидт // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – №1. – С. 29–36.
2. **Крахмалев, О.Н.** Оптимизация законов движения при моделировании динамики манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев, Д.М. Медведев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 27–30.
3. **Крахмалев, О.Н.** Исследование рабочих зон манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №2. – С. 31–37.
4. **Крахмалев, О.Н.** Собственные частоты колебаний в манипуляционных системах с упругими звеньями / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №4 (306). – С. 59–65.
5. **Крахмалев, О.Н.** Анализ сил инерции, возникающих при движении двух связанных тел / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2014. – №2(29). – С. 81–87.
6. **Крахмалев, О.Н.** Моделирование движения промышленных роботов в программном комплексе «Универсальный механизм» на основе 3D-моделей / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №4. – С. 46–51.

7. **Крашмалев, О.Н.** Первичные отклонения геометрических параметров многозвенных механических систем промышленных роботов и станков с ЧПУ / О.Н. Крашмалев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – №4. – С. 52–57.
8. **Крашмалев, О.Н.** Исследование движения манипуляционных роботов на основе анализа параметров инерции / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №10. – С. 3–6.
9. **Крашмалев, О.Н.** Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №3. – С. 28–35.
10. **Крашмалев, О.Н.** Обеспечение точности многокоординатных станков и промышленных роботов методом коррекции геометрических отклонений / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // СТИН. – 2016. – №11. – С.7–11.
11. **Крашмалев, О.Н.** Объектно-ориентированное моделирование динамики манипуляционных систем на основе матриц преобразования однородных координат / О.Н. Крашмалев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2017. – №2(15). – С. 32–36.
12. **Крашмалев, О.Н.** Математические модели систем управления для калибровки базы промышленных роботов / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // СТИН. – 2017. – №6. – С. 23–29.
13. **Крашмалев, О.Н.** Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин, Г.Н. Крашмалев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – №10 (18). – С. 664–668.
14. **Крашмалев, О.Н.** Методы объектно-ориентированного моделирования манипуляционных систем роботов / О.Н. Крашмалев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – №1 (327). – С. 96–105.
15. **Крашмалев, О.Н.** Объектно-ориентированное моделирование манипуляционных систем роботов / О.Н. Крашмалев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – №4(21). – С. 41–47.
16. **Крашмалев, О.Н.** Алгоритмизация параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов/ О.Н. Крашмалев // Информационные технологии. – 2020. – №6. – Т. 26. – С. 354–359.
17. **Крашмалев, О. Н.** Объектное моделирование в кинематике манипуляционных роботов / О.Н. Крашмалев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2022. – №5. – С. 55–66. <https://doi.org/10.18127/j19998554-202205-06>
18. **Крашмалев, О.Н.** Генетическое программирование и объектное моделирование манипуляционных роботов // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 2. С. 22–31. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-2-22-31.

***Scopus u WoS:***

1. **Krakhmalev, O.N.** Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges / O.N. Krakhmalev, L.I. Bleyshmidt // Allerton Press, Inc., New York: Journal of Machinery Manufacture and Reliability. –2014. –Vol.43. –No. 1. – pp. 22–28.
2. **Krakhmalev, O.N.** Provision of Controlled Motion Accuracy of Industrial Robots and Multiaxis Machines by the Method of Integrated Deviations Correction / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, O.N. Fedonin // MEACS2015 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124. – 2016. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012067
3. **Krakhmalev, O.N.** Dynamic Models of Robots with Elastic Hinges / O.N. Krakhmalev // MEACS2015 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124. – 2016. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012068
4. **Krakhmalev O.N.,** Petreshin D.I., Fedonin O.N. Mathematical Models for Base Calibration in Industrial Robots/ Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37. – No. 11. – pp. 995–1000.
5. **Krakhmalev, O. N.** Improving the Precision of Multicoordinate Machine Tools and Industrial Robots / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, O.N. Fedonin // Allerton Press, Inc., New York:

- Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37. – No. 5. – pp. 434–437.
6. **Krakhmalev, O.N.** Methods of Calibrating the Orientation of the Industrial Robot Tool / O.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin, G.N. Krakhmalev // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 3–4 Oct. 2018, Publisher: IEEE Xplore. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602519 [Electronic resource] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602519/references#references> (accessed: 30.01.2019).
  7. **Krakhmalev, O.N.** Use of Structural Mutations in Object-Oriented Mathematical Models of Robot Manipulation Systems / O.N. Krakhmalev // Springer Nature Switzerland AG. Mathematical Models and Computer Simulations. – 2020. – Vol. 12. – No 1. – pp. 90–98.
  8. **Krakhmalev, O.** Designing Object Diagrams and the Method of Structural Mutations in Models of Robots' Manipulation Systems/ O. Krakhmalev // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer, Singapore. Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – pp. 209–221.
  9. **Krakhmalev, O.;** Krakhmalev, N.; Gataullin, S.; Makarenko, I.; Nikitin, P.; Serdechnyy, D.; Liang, K.; Korchagin, S. Mathematics Model for 6-DOF Joints Manipulation Robots// Mathematics. – 2021. – Vol 9, 2828. <https://doi.org/10.3390/math9212828>.
  10. **Krakhmalev, O.;** Korchagin, S.; Pleshakova, E.; Nikitin, P.; Tsibizova, O.; Sycheva, I.; Liang, K.; Serdechnyy, D.; Gataullin, S.; Krakhmalev, N. Parallel Computational Algorithm for Object Oriented Modeling of Manipulation Robots // Mathematics. – 2021. – Vol 9, 2886. <https://doi.org/10.3390/math9222886>.
  11. **Krakhmalev, O.;** Gataullin, S.; Boltachev, E.; Korchagin, S.; Blagoveshchensky, I.; Liang, K. Robotic Complex for Harvesting Apple Crops // Robotics. – 2022. – Vol 11, 77. <https://doi.org/10.3390/robotics11040077>
  12. Karabanov, G., Selyukov, A., **Krakhmalev, O.** (2022). Numerical Solution of the Inverse Kinematics Problem on the Example of a 6-DOF Robot. In: Ronzhin, A., Meshcheryakov, R., Xiantong, Z. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2022. Lecture Notes in Computer Science, vol 13719. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23609-9_14)

#### *Монографии:*

1. **Крахмалев, О.Н.** Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ. – 2012. –200 с.
2. **Крахмалев, О.Н.** Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ. – 2015.– 236 с.
3. Крахмалев, О.Н. Влияние параметров инерции на движение манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2014. – 57 с. ISBN 978-3-659-57477-1
4. **Крахмалев, О.Н.** Математическое обеспечение управления манипуляционными роботами: монография / О.Н. Крахмалев // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2016. –113 с. ISBN 978-3-659-53110-1

#### *Учебные пособия:*

1. **Крахмалев О.Н.** Моделирование манипуляционных систем роботов [Электронный ресурс]: учебное пособие / О. Н. Крахмалев. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа. – 2018. –165 с. ISBN 978-5-4486-0146-0

#### *Электронные ресурсы и компьютерные программы:*

1. **Крахмалев, О.Н.** Метод построения геометрических моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20898 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).
2. **Крахмалев, О.Н.** Методика параметризации геометрических (математических) моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20899 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).

3. **Крашмалев, О.Н.** Метод коррекции интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крашмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Свид. о рег. электронного ресурса № 20900 (зарегистрировано в ИУО РАО ОФЭРНиО 07.05.2015).
4. **Крашмалев, О.Н.** Геометрическая модель манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крашмалев // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2015661029 от 01.09.2015.
5. **Крашмалев, О.Н.** Вычисление кинематических параметров манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крашмалев // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2016617509 от 10.05.2016.