

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор РТУ МИРЭА
д.х.н., проф.  Н.И. Прокопов
«28» ноября 2023г.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет" на диссертационную работу Крахмалева Олега Николаевича на тему: «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Общая характеристика работы

Научная работа на тему «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования» выполнена в ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» Крахмалевым Олегом Николаевичем. Диссертация состоит из введения и четырех глав, заключения, списка литературы (148 источников) и 11-и приложений. Работа изложена на 323 страницах машинописного текста, содержащего формулы и рисунки. По формальным признакам работа соответствует требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям.

Автореферат также соответствует предъявляемым требованиям и достаточно полно отражает основные положения и научные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Актуальность темы исследования

Так как методы и способы построения динамических моделей сложных непрерывно-детерминированных систем, до настоящего времени, ориентировались на создание эффективных последовательно выполняемых алгоритмов, реализующих формирование и решение алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, то эффективность этих алгоритмов определялась, в основном, количеством совершаемых ими

арифметических операций, а их программирование выполнялось с использованием языков процедурного типа. При организации моделирования на основе параллельных вычислительных алгоритмов эффективность вычислений уже обеспечивается не только снижением объёма вычислений, а в большей мере степенью параллелизма вычислительных алгоритмов. Поэтому разработка параллельных вычислительных алгоритмов является актуальной задачей.

Управление манипуляционными роботами строится на основе программно-математического обеспечения, в основе которого используются математические модели. Применение объектно-ориентированного подхода позволяет представить структуру математических моделей в виде объектных схем, отражающих объекты, составляющие математические модели, и связи между ними. Использование элементов компьютерной графики при создании объектных схем позволяет реализовать визуальное программирование математических моделей, что является актуальной задачей, так как обеспечивает автоматизацию процесса разработки программно-математического обеспечения.

При разработке математических моделей важно, чтобы используемые при этом методы и получаемые на их основе алгоритмы были бы объединены общим методологическим подходом. Это существенно упрощает внедрение получаемого программно-математического обеспечения в системы управления манипуляционными роботами и позволяет успешно интегрировать их в современные АСУТП.

Разработка систем управления на основе реконфигурируемых моделей управления с использованием функций самодиагностики позволяет решать актуальную задачу создания универсальных систем управления манипуляционными роботами с различными кинематическими схемами.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы состоит в разработке теоретических основ и методов построения АСУТП для управления манипуляционными 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.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Выработать единый подход – методологию моделирования манипуляционных систем роботов и на её основе рассмотреть постановку и решение задач управления манипуляционными роботами.
2. Разработать математические модели, позволяющие учитывать разного рода отклонения в конструкциях манипуляционных систем роботов, методы коррекции таких отклонений и методы оценки точности получаемых решений.
3. На основе выработанной методологии и объектно-ориентированного подхода разработать формализм объектного описания математические модели манипуляционных систем роботов и их представления в виде объектных схем.
4. Разработать методы самодиагностики кинематических структур манипуляционных систем роботов.
5. Раскрыть возможности и преимущества объектного моделирования при составлении и модификации математические модели манипуляционных систем роботов, разработке алгоритмов параллельных вычислений и синтезе оптимальных структур, выполняемом на основе генетического алгоритма.
6. Составить алгоритмы и программы для систем управления манипуляционными роботами на основе разработанных математические модели и методов моделирования.

Указанная в диссертационной работе тема, а также сформулированная в рамках этой темы цель и определённые для ее достижения задачи являются актуальными.

Структура и содержание работы

Как уже отмечалось диссертация состоит из введения и четырех глав, заключения, списка литературы и 11-и приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель, определены задачи, выбраны методы исследования, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обусловлена степень достоверности полученных в работе результатов и описаны способы их апробации.

В первой главе дано описание геометрии манипуляционных роботов, построенное на основе сформулированного понятия – геометрическая модель, содержащего множество матриц преобразования однородных координат, позволяющих аналитическим способом создавать геометрические образы как самого робота, так и его окружения. Предложенный подход позволяет сформулировать концепцию построения кинематического управления манипуляционными роботами, которая может быть проиллюстрирована последовательностью: объект управления – манипуляционный робот → геометрическая модель → моделирование кинематики → К-управление.

Моделирование динамики манипуляционных роботов в данной работе основывается на методе Лагранжа-Эйлера, который позволяет составить

уравнения движения манипуляционных систем, рассматриваемых как системы тел с наложенными на них связями. При вычислении кинетической энергии таких систем было предложено использовать матрицы инерции тел, моделирующих звенья манипуляционных систем. Множество всех матриц инерции звеньев, составляющих манипуляционную систему, предложено рассматривать как инерционную модель.

Полная динамическая модель манипуляционного робота, помимо уравнений движения должна включать динамические модели приводов, обеспечивающих движение звеньев манипуляционной системы, и передаточные функции их редукторов.

Предложенные методы моделирования динамики были положены в основу построения алгоритмов динамического управления который можно представить последовательностью: объект управления – манипуляционный робот → геометрическая модель + инерционная модель + модель внешней нагрузки + динамические модели приводов = полная динамическая модель → моделирование динамики → Д-управление.

Во второй главе рассмотрено моделирование отклонений возникающих при движении манипуляционных роботов.

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

Для учёта геометрических отклонений было разработано несколько способов модификации геометрических моделей номинальных манипуляционных систем, составленных на основе данных конструкторской документации. Предложены варианты описания математических моделей, соответствующих геометрической модели, параметризованной такими отклонениями. На основе параметризованных геометрических моделей рассмотрен метод компенсации интегральных отклонений, возникающих при движении реальных манипуляционных роботов.

Отдельно были рассмотрены отклонения позиционирования, представляющие собой отклонения обобщённых (шарнирных) координат, которые могут иметь различную природу. Было отмечено, что ощутимый вклад в эти отклонения вносят зазоры в шарнирах и передаточных механизмах, а также упругая податливость некоторых элементов этих механизмов.

Сформулированная ранее концепция моделирования кинематического управления манипуляционными роботами была 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 манипуляционных систем \rightarrow номинальная геометрическая модель \times модификатор геометрических отклонений = параметризованная геометрическая модель \rightarrow моделирование кинематики \rightarrow К-управление.

Были исследованы методы диагностики кинематического состояния манипуляционных систем роботов. Разработаны математические модели для систем управления манипуляционными роботами, позволяющие выполнить калибровку систем координат базы и инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота, и перед вводом робота в эксплуатацию.

Калибровка инструмента выполнялась в два этапа. Первый этап калибровки состоял в определении центра инструмента. Второй этап включал действия по определению ориентации системы координат, связываемой с инструментом. В результате калибровки выполнялась модификация геометрической модели манипуляционной системы.

Корректность математических моделей, полученных на основе разработанных методов калибровки, была подтверждена проведением натурных экспериментов, при которых рассчитанные значения координат центра инструмента совпали с точками позиционирования заострённого наконечника, закреплённого в захватном устройстве промышленного робота, с точностью позиционирования, соответствующей паспортному значению данной модели робота.

Для отражения влияния изменяющихся геометрических отклонений при моделировании манипуляционных систем 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.

В третьей главе представлена методология математического объектного моделирования манипуляционных систем, позволяющая на основе объектного представления математических моделей манипуляционных систем 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, реализующими параметрическую адаптацию, возможностью проведения структурной модификации математических моделей манипуляционных систем в тех частях, которые соответствуют её геометрической и инерционной моделям.

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

В четвёртой главе отражены аспекты практического применения объектного моделирования манипуляционных систем роботов.

Разработанная методология предлагает не ограничиваться составлением математических моделей в форме систем уравнений, а создавать эквивалентные этим математическим моделям объектные схемы. При этом в уравнениях математических моделей выделяют части, которым ставят в соответствие объекты определённых классов. Это позволяет различные математические модели составлять из отдельных, независимых друг от друга частей-объектов. Эти части в свою очередь также могут состоять из других более простых частей-объектов.

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

Таким образом, объектные схемы математических моделей 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 математических моделей.

Составление объектных схем было предложено выполнять в специально разработанной компьютерной среде, автоматизирующей этот процесс на основе принципа визуального программирования. При этом для исследователя исключается стадия алгоритмизации и программирования, остаётся только проведение численного эксперимента и анализ его результатов

Предложена иерархическая структура алгоритма параллельных вычислений динамической модели манипуляционных систем роботов, разбитого на несколько уровней и соответствующего объектной схеме используемой динамической модели.

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

Разработанные в диссертации объектно-ориентированные методы моделирования позволяют решать задачи синтеза оптимальных структур

новых манипуляционных роботов на основе использования генетического алгоритма, представляющего собой стохастический метод оптимизации.

Рассмотрен пример модификации геометрической модели трёхзвенной манипуляционной системы, путём перестановки и замены её звеньев, моделирующих варианты, описывающие последовательности возникающих отклонений (перекосов) в шарнирах манипуляционной системы. Внесенные в объектную схему изменения путём перестановки соответствующих объектов, могут автоматически учитываются в динамической модели. Необходимо отметить, что изменения в объектных схемах динамических моделей могут затрагивать не только геометрическую модель манипуляционной системы робота, но и её инерционную модель.

В конце каждой главы приводятся выводы по полученным результатам. В заключении диссертации дано краткое описание полученных результатов, отражающих решение сформулированных по теме диссертационной работы задач и сделаны выводы, подтверждающие достижение поставленной в работе цели.

В приложениях представлены свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ и электронных ресурсов, реализующих разработанные автором методы и алгоритмы. Представлены достижения, отмеченные дипломами и благодарностями. Имеется подтверждение профильной организации в заинтересованности внедрения полученных автором теоретических результатов в перспективных разработках.

Научная новизна диссертационной работы:

– 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 скорректированное 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 распараллеливание вычислений выполняется на нескольких уровнях, получаемых путём декомпозиции исходной динамической модели.

Практическая значимость работы:

– На основе разработанной методологии объектного моделирования может быть реализована универсальная система управления манипуляционными роботами различных моделей, а также роботами, конструкция которых может собираться из различных модулей, в зависимости от выполнения той или иной технологической операции.

– 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.

– 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 эволюционными 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.

– 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.

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

– 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».

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность результатов исследований подтверждается адекватностью и непротиворечивостью полученных математических моделей, проведенным анализом, получаемой на основе этих моделей точности вычислений. Проведенные исследования основывались 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.

Апробация работы

На различных этапах выполнения исследовательской работы полученные результаты докладывались и обсуждались на семинарах «Теория управления и динамика систем» Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН под руководством академика РАН Ф.Л. Черноусько, 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 семинаре Департамента анализа данных и машинного обучения 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). Представлен список, содержащий 15 профильных всероссийских и международных конференций, на которых автором были доложены результаты его исследований.

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.

Подтверждение личного вклада соискателя в разработку научной проблемы

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

При общей положительной оценке выполненной работы необходимо сделать следующие **замечания** по материалам диссертации:

1. В диссертационном исследовании недостаточно явно прописана роль полученных результатов в структуре АСУТП.
2. Объем экспериментальных данных, подтверждающих теоретические выводы, представляется недостаточным.
3. В работе слабо обоснована экономическая эффективность внедрения результатов диссертационного исследования.
4. В первой главе в п. 1.1.1.1 для получения матриц преобразования однородных координат предложен метод двух связываемых систем координат. Традиционно в робототехнике для этих целей используют метод Денавита-Хартенберга, было бы полезно сравнить эти методы.
5. В п. 1.1.1.3 представлена методика построения геометрических моделей манипуляционных систем роботов, из которой до конца непонятна целесообразность введения этого нового понятия.
6. В п. 1.1.3 представлено несколько методов решения обратной задачи кинематики манипуляционных систем, но не проведен их сравнительный анализ.
7. В п. 1.2.1 рассмотрены методы составления уравнений движения манипуляционных систем, ограничивающиеся только энергетическим подходом.
8. Во второй главе в п. 2.1 представлены параметризованные геометрическими ошибками математические модели, однако не представлены способы определения таких отклонений в реальных условиях.
9. В п. 2.2 описаны методы диагностирования кинематической структуры манипуляционных систем роботов, ограничивающиеся только положением и ориентацией инструмента, закрепляемого на конечном звене, но не указано как распространить эти методы для диагностирования всей кинематической структуры.
10. В п. 2.3.3 для полученной динамической модели не дано исчерпывающего объяснения, каким образом могут быть компенсированы недостающие связи при использовании многостепенных шарниров.
11. В третьей главе в п. 3.2.1.1 описывается класс `Geometric_model` который наследует, строго говоря, массивы матриц однородных преобразований координат, а не сами матрицы.
12. В четвертой главе в п. 4.2.1.2 описан метод структурных мутаций для реализации соответствующего оператора в генетическом алгоритме, но не описаны способы реализации других операторов этого алгоритма, таких как операторы рекомбинации и отбора особей.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

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 решать задачи управления роботами с изменяющейся кинематической структурой.

Завершенность и качество оформления диссертации

Диссертационная работа является завершенной, грамотно оформленной, содержит необходимые иллюстрации и в полной мере отражает полученные автором результаты исследований. По каждому разделу диссертации представлены краткие выводы. Содержание диссертационной работы соответствует поставленной цели и задачам исследований. Диссертация и автореферат написаны техническим языком, а структура и содержание автореферата отражает содержание диссертации.

Результаты научной работы опубликованы в профильных журналах, сборниках научных конференций, оформлены в виде зарегистрированных программ для ЭВМ. Разработанные методы прошли апробацию и подтверждены экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях. Представлено подтверждение заинтересованности полученных автором результатов профильными организациями, имеются акты внедрения.

В диссертации автор продемонстрировал глубокие знания в области теоретической механики, математического моделирования, вычислительной техники и программирования.

Заключение по диссертационной работе

Оценивая работу в целом, считаем, что работа Крахмалева О.Н. является законченным научным исследованием, в котором разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение имеющее теоретическое значение и практическую ценность, соответствует научно-техническим задачам специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Отмеченные замечания не снижают ценность выполненной работы.

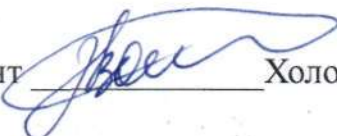
В целом по уровню научной новизны, теоретической и практической значимости, выводов и предложений, диссертационная работа «Методология построения автоматизированных систем управления манипуляционными роботами на основе математического объектного моделирования», отвечает

критериям, изложенным в п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (редакция 11.09.2021), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Крахмалев Олег Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на диссертационную работу Крахмалева Олега Николаевича рассмотрен и одобрен на заседании кафедры промышленной информатики Института искусственного интеллекта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет".

Протокол № 5 от «27» ноября 2023 г.

Заведующий кафедрой

промышленной информатики к.т.н., доцент  Холопов В.А.