

БАЛТАБАЙ ДЭУРЕН ҚУАНЫШБЕКҰЛЫ

Исследование распределённых динамических нагрузок, вызванных собственной массой звеньев манипулятора и их визуализация на интерактивных 3D компьютерных моделях

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по образовательной программе
8D07117 – «Робототехнические системы»

Актуальность темы исследования. Одним из ключевых аспектов проектирования манипуляторов является обеспечение прочности и жесткости их звеньев на протяжении всего рабочего процесса. Анализ напряженно-деформированного состояния звеньев усложняется тем, что манипулятор находится в движении, что приводит к возникновению распределенных динамических нагрузок сложного характера, обусловленных массой звеньев в каждом их сечении. Эти нагрузки изменяют свою величину и направление, завися от кинематических характеристик звеньев.

Чтобы более корректно анализировать характер напряженно-деформируемого состояния для полного рабочего цикла пространственных манипуляторов необходимо учитывать кроме приложенных к системе сосредоточенных сил и распределенные динамические нагрузки, которые меняют свои значения и направления в зависимости от физических, геометрических и кинематических характеристик звеньев. Следовательно, необходимо, в первую очередь, установить закономерности распределения динамических распределенных нагрузок.

Поэтому разработка аналитической методики динамических расчетов пространственных манипуляторов с учетом распределенных динамических нагрузок является актуальной. Преимущество аналитического метода в точности и скорости расчета. Исследование динамических нагрузок на манипуляторы играет ключевую роль в разработке более надежных и эффективных роботизированных систем.

Цель данной диссертационной работы заключается в исследовании распределённых динамических нагрузок, обусловленных собственной массой звеньев робота-манипулятора, с последующей разработкой алгоритмов и программ для их визуализации в виде интерактивных 3D компьютерных моделей, что создаёт основу для повышения точности, надёжности и эффективности анализа и проектирования робототехнических систем.

Объектом исследования являются пространственные манипуляторы с несколькими степенями свободы.

Предмет исследования – распределенные динамические нагрузки пространственных манипуляторов.

В соответствии с поставленной целью определяются следующие **задачи исследования:**

- Выполнить обзор современных теоретических и прикладных исследований по созданию интерактивных 3D-моделей и анализу кинематики, распределенных динамических нагрузок пространственных манипуляторов.
- Разработать алгоритм и программный код для создания полностью визуализированных интерактивных 3D-моделей пространственных манипуляторов, включая звенья, кинематические пары, захваты и т. д., в рамках программной среды Maple, управляемых обобщенными координатам.
- Разработать алгоритм и программный код, определяющие кинематические характеристики звеньев манипулятора, касающиеся как базы, так и систем координат, связанных со звеньями, а также линейных и угловых ускорений.
- Разработать методику аналитического определения закономерностей распределения вдоль осей звеньев динамических нагрузок, возникающих из-за собственных масс при ускоренном перемещении звеньев в пространственных манипуляторах.
- Разработать алгоритм и программный код для построения визуальных диаграмм распределенных динамических нагрузок во взаимно перпендикулярных плоскостях, образованных главными осями и продольной осью звеньев в интерактивных 3D-моделях пространственных манипуляторов.

Методы исследования: современные аналитические методы решения задач механики машин.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм и код программ, создающие трехмерные модели хорошо обозреваемых со всех сторон трехмерного пространства манипуляторов и их движение, управляемое обобщенными координатами в программной среде Maple.

2. Установлены закономерности распределения динамических нагрузок: двух распределенных поперечных динамических нагрузок, лежащих во взаимно-перпендикулярных плоскостях, совпадающих с главными осями сечений звеньев и с продольной осью звеньев; продольных распределенных динамических нагрузок действующих вдоль оси звеньев и распределенных крутящих моментов, возникающих от собственных масс звеньев с постоянными сечениями при их движениях в пространстве.

3. Разработан алгоритм и программный код, создающие визуальные эпюры вышеуказанных динамических нагрузок вдоль осей звеньев, интерактивных трехмерных моделей манипуляторов.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Разработанную методику можно использовать для проведения дальнейшего теоретического исследования напряженно-деформируемого состояния элементов пространственных манипуляторов и автоматизации этого исследования с помощью современных компьютерных программ. Практическая значимость исследования состоит в применении разработанной методики при проектировании новых инновационных роботов манипуляторов, решающих новые научные и производственные задачи, которые повлияют на социально-экономическое и научно-техническое развитие Республики Казахстан

Научные положения, выносимые на защиту:

– Разработан алгоритм и программный код, создающие трехмерные модели хорошо обзораемых со всех сторон трехмерного пространства манипуляторов и их движение, управляемое обобщенными координатами в программной среде Maple.

– Разработан алгоритм и программный код, определяющий кинематические характеристики манипуляторов относительно базовой и связанной со звеньями, систем координат, в которых использованы методы Денавита-Хартенберга и Ньютона-Эйлера.

– Установлены закономерности распределения динамических нагрузок: двух распределенных поперечных динамических нагрузок, лежащих во взаимно-перпендикулярных плоскостях, совпадающих с главными осями сечений звеньев и с продольной осью звеньев; продольных распределенных динамических нагрузок действующих вдоль оси звеньев и распределенных крутящих моментов, возникающих от собственных масс звеньев с постоянными сечениями при их движениях в пространстве.

– Разработан алгоритм и программный код для построения визуальных диаграмм распределенных динамических нагрузок во взаимно перпендикулярных плоскостях, образованных главными осями и продольной осью звеньев в интерактивных 3D-моделях пространственных манипуляторов.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации. Основные расчетные уравнения, использованные в диссертационной работе, получены с корректным использованием основных положений теоретической механики, математического анализа, высшей алгебры, дифференциальных уравнений, основ робототехники, теории машин и механизмов и механики деформируемого твердого тела.

Надежность теоретических результатов подтверждается строгостью математических моделей и правильностью полученных результатов решения поставленных задач.

Пространственное положение и направления звеньев манипулятора RRRRT можно увидеть в визуализированной компьютерной 3D-модели, созданной с использованием разработанного алгоритма и программного кода в среде Maple. Проверка осуществляется путем сравнения положений и направлений этих моделей с извлеченными числовыми значениями. Кинематические параметры манипулятора, необходимые для определения динамических нагрузок, рассчитывались по рекуррентным формулам Ньютона-Эйлера и проверялись с использованием однородных матриц преобразования. Диаграммы динамических нагрузок по звеньям соответствуют законам распределения найденных нагрузок.

Связь диссертационной работы с другими научно-исследовательскими работами. Данная диссертационная работа выполнялась в рамках научного проекта грантового финансирования МОН РК «Жас Ғалым» на тему «Разработка аналитической методики определения динамических нагрузок пространственных манипуляторов» (2024-2026 гг., AP22686476).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Международная научно-практическая конференция «Приоритеты механики и теории автоматического управления в развитии космической техники и технологии» посвящённая 75-летию юбилею профессора, академика НАН РК и НИА РК Молдабекова Мейрбека (Алматы, 14 сентября 2022 года);
- Международная научная конференция «IFTToMM Asian Mechanisms and Machine Science Conference 2024 (Алматы, 28-30 август 2024 год);
- Международная научная конференция European Meeting on Applied Science and Engineering на тему: «Transforming Innovations into Reality for a Better Future in Science and Engineering» (Берлин, Германия, 14–15 апреля 2025 год);
- научные семинары кафедры механики КазНУ им. аль-Фараби.

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 7 работ, в том числе 1 публикации в научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus и Web of Science:

- Utenov, M.; Sobh, T.; Temirbekov, Y.; Zhilkibayeva, S.; Patel, S.; Baltabay, D.; Zhumasheva, Z. Analysis of Distributed Dynamic Loads Induced by the Own Mass of Manipulator Links and Their Visualization on Interactive 3D Computer Models. *Robotics*, 2025, 14, 46. (квартиль Q1, 84%)
<https://doi.org/10.3390/robotics14040046>

2 публикации в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности:

- Утенов М.У., Балтабай Д.К. Прямая позиционная задача кинематики RRRRT манипулятора в программной среде maple // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. Рубрика Информационно-коммуникационные технологии. – Алматы, 2023. - №4 (90). – С. 138-147.
<https://doi.org/10.47533/2023.1606-146X.41>
- Утенов М.У., Балтабай Д.К., Батырбек С. Ж. Компьютерное 3d моделирование манипуляторов в программной среде Maple // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. Рубрика Информационно-коммуникационные технологии. – Алматы, 2022. - №4 (86). – С. 109-115. <https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.201>

2 публикации в сборниках международных конференций индексируемых базой данных Scopus (4-квартиль, 15%).

2 публикации в сборниках международных отечественных конференций.

Личный вклад автора состоит в:

- участии на всех этапах процесса разработки методов и алгоритмов моделирования, анализа распределённых динамических нагрузок, действующих на звенья пространственных манипуляторов, вызванных их собственной массой и визуализация динамических нагрузок в интерактивных 3D компьютерных моделях конкретных манипуляторов, управляемых обобщенными координатами;
- непосредственном участии соискателя в выполнении обзора современных теоретических и прикладных исследований по созданию интерактивных 3D-моделей и анализу кинематики, распределённых динамических нагрузок пространственных манипуляторов, разработке алгоритмов и программ,

позволяющих производить интерактивных 3D-моделей пространственных манипуляторов, а также определяющие кинематические характеристики, скоростей и ускорений звеньев манипулятора и с автоматическим построением на звеньях эпюр распределенных динамических нагрузок;

- личном участии в апробации результатов исследования;
- подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает титульный лист, содержание, введение, четыре раздела, заключение и список использованных источников, состоящий из 109 наименований. Общий объем диссертации составляет 79 страниц, включая 37 иллюстраций, 2 таблиц.

Основное содержание диссертации. Введение включает анализ современного состояния исследуемой проблемы с обзором существующих работ, обоснование актуальности темы диссертационного исследования, цель работы, объект, предмет, задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимости, основные положения, выносимые на защиту, сведения об опубликованных работах по теме диссертации и степень ее разработанности.

Первый раздел диссертации посвящен современному представлению и исследовательским подходам к созданию интерактивных 3D моделей, анализу кинематики, распределенных динамических нагрузок пространственных манипуляторов.

Второй раздел диссертации посвящен алгоритму по 3D моделированию пространственных манипуляторов. Разработан алгоритм и программа создающие интерактивные 3D модели пространственных манипуляторов в программной среде Maple.

Третий раздел диссертации посвящен кинематическому анализу пространственных манипуляторов. Разработаны алгоритм и программный код по определению кинематических параметров пространственных манипуляторов. Результаты кинематического анализа исследуемого пространственного манипулятора представлены в виде 3D графиков.

В четвертом разделе диссертации определен закон распределения динамических нагрузок на звенья пространственных манипуляторов. Разработаны алгоритм и компьютерные программы, позволяющие производить автоматическое построение на звеньях пространственных манипуляторов эпюр продольных и поперечных распределенных динамических нагрузок и изгибающих моментов.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационного исследования, оценка полноты решения поставленных задач, рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов, оценка технико-экономической эффективности внедрения, оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.