

На правах рукописи

ВОЛКОВ Андрей Николаевич

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕХАТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ ТЕАТРАЛЬНОЙ МАШИНЕРИИ**

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника
и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Дьяченко Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Игнатъев Михаил Борисович,
доктор технических наук, профессор Кулаков Феликс Михайлович,
доктор технических наук, профессор Тисенко Виктор Николаевич.

Ведущая организация: ЗАО «Научно-технический центр «Ровер»
им. А.Л. Кемурджиана», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 13 ноября 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_____» октября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12

кандидат технических наук, профессор _____ Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Постановки опер и балетов, обустройство и оснащение сцены в ведущих театрах мира всегда базировались на передовых технических достижениях. В настоящее время процесс создания декораций и проведения спектакля характеризуется глубокой взаимной интеграцией художественного и технического начал.

Перед постановщиками спектаклей обычно стоят три фундаментальные проблемы. Во-первых, это создание выразительных динамичных сцен с движущимися или летающими чудовищами, подвижными антропоморфными и зооморфными роботами, стилизованными под мифологические и фантастические персонажи, с разрушающимися стенами, обрушающимися потолочными сводами, качающимися и разбивающимися о скалы или разламывающимися на волнах кораблями, и т.п. Во-вторых, это реализация переходов от одной картины к другой со значительными изменениями обстановки сцены в кратковременных паузах и в антрактах, что позволяет увеличить количество декораций спектакля и повысить динамичность театрального действия. В-третьих, это обеспечение коротких сроков монтажа-демонтажа декораций в современном репертуарном театре, когда утром и вечером проводятся разные спектакли, и смена оформления сцены должна осуществляться в короткие интервалы времени.

Обозначенные технологические проблемы трансформируются в комплекс научно-технических проблем:

- разработка принципов и конкретных приемов построения структурно-гибких сценических робототехнических и мехатронных комплексов для реализации требуемого постановщику синхронизированного взаимодействия подвижных фрагментов декорационного оформления, светового оборудования, оркестрантов, актеров и технического персонала;

- разработка научных основ проектирования структурно-гибких робототехнических и мехатронных сценических комплексов и их компонентов.

Основной тенденцией развития театральной машинерии является увеличение плотности заполнения сценического пространства современными техническими системами, имеющими многочисленные подвижные части со встроенными механизмами и приводами, а также многоуровневые системы автоматизированного управления.

При существующей системе производства и эксплуатации не автоматизированной театральной машинерии уже сейчас практически в каждом спектакле возникают «накладки», а коллективы, осуществляющие обслуживание сценической техники, работают на пределе физических

возможностей. Известно, что многие интересные художественные замыслы в оснащении сцены не воплощены в театрах из-за отсутствия научно обоснованного подхода к проектированию, производству и эксплуатации сценической техники.

Анализ тематики театральной машинерии в целом и изучение накопленного опыта ее создания и эксплуатации указывают на необходимость опережающей разработки новых принципиальных, схемных и конструктивных решений как самой сцены, так и сценических робототехнических и мехатронных систем. Они должны вытекать из обобщения достижений передовой мировой театральной техники, соответствовать конкретным потребностям технического оснащения и стилистике тех театральных представлений, на которые ориентированы. Важной составляющей здесь является создание структурно-гибких роботизированных комплексов, обеспечивающих высокий уровень адаптации техники к разнообразным сценическим задачам. Этому должна предшествовать глубокая научная теоретическая проработка рассматриваемой тематики с использованием методов теоретической и аналитической механики, теории упругости и мехатроники на соответствующих математических моделях. До сих пор механика, мехатроника и робототехника театральной сцены не были объектом комплексных научных исследований.

Обозначенные фундаментальные проблемы должны решаться путем создания единого демонстрационного пространства на базе структурно-гибких модульных робототехнических и мехатронных систем.

На основании разработанных автором теоретических положений в диссертации изложены научно обоснованные технические решения по расчету и проектированию робототехнических и мехатронных систем, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие театральной культуры страны и выведение ее на передовые рубежи мирового искусства.

Целью диссертации является разработка и развитие научных основ теории и методологии проектирования сценических мехатронных и роботизированных систем переменной структуры, и их применение к созданию новых театральных сцен и постановок в ведущих оперно-балетных театрах России.

Задачи исследования:

1. Систематизация опыта создания и эксплуатации театральной машинерии.

2. Анализ принципов организации пространства сцены современного театра, механизмов, систем приводов, несущих конструкций декораций и различных подвижных объектов наиболее распространенных типов.

3. Определение перспективных направлений и принципов развития робототехнических и мехатронных систем для сцены театра, разработка комплексных требований к их проектированию.

4. Разработка и исследование на математических моделях сценических роботов с параллельными кинематическими цепями, анализ конфигураций и размеров их рабочих зон.

5. Создание теории сценических роботов с параллельными кинематическими цепями, приводимыми в движение программно управляемыми лебедками, и решение задач статического и квазистатического равновесия выходного звена с учетом требований неотрицательности натяжения канатов.

6. Разработка научных основ и методологии комплексного проектирования роботов, робототехнических комплексов и мехатронного сценического оборудования для современного театра.

7. Многоаспектная систематизация задач имитации эпизодов разрушений и катастроф, построение математических моделей и выработка рекомендаций по созданию соответствующих мехатронных модулей на базе электромеханических приводов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Структурно-гибкие робототехнические и мехатронные системы должны являться фундаментальной основной современной театральной машинерии.

2. Создание технического оснащения современной сцены и обеспечение его функционирования должны базироваться на соответствующем теоретическом обосновании, системном подходе к проектированию и обобщении опыта построения как современной театральной машинерии, так и лучших аналогов технического назначения.

3. Применение принципов автоматизированного и супер-визорного управления структурно-гибкими робототехническими и мехатронными комплексами обеспечивает решение проблемы синхронизации взаимодействия технических средств, актеров, оркестра и операторов во время спектакля.

4. Сценические робототехнические системы с параллельными кинематическими цепями и с различным числом степеней подвижности - от одной до шести - являются наиболее перспективными для автоматизации

перемещения декораций или их элементов по пространственным траекториям в пределах от 0,2 до 1,5 м.

5. Робототехнические системы, реализованные по схеме подвесной платформы, параметры движения которой задаются автоматизированными канатными лебедками, расположенными на большом удалении от сцены, целесообразно применять для реализации сложных пространственных траекторий в пределах от 1,5 до 12,0 м.

6. Сцены катастроф и разрушений целесообразно воспроизводить на базе мехатронных модулей для имитации пластических деформаций и правдоподобного фрагментирования конструкций с предварительным моделированием движения фрагментов в режиме анимации.

7. Антропоморфные и зооморфные демонстрационные роботы с параллельно-последовательными кинематическими цепями обеспечивают правдоподобную подвижность частей тела, реализацию различных сценических поз и перемещений в пространстве.

Методы исследования. Геометрические, кинематические, силовые и динамические характеристики объектов технического оснащения сцены - специальных робототехнических и мехатронных систем - исследовались методами аналитической геометрии, теории механизмов и машин, теоретической и аналитической механики. При решении задач динамики использовались численные методы решения дифференциальных уравнений, а также языки программирования «*Borland C++ Builder*», при составлении программ использованы пакеты математических вычислений «*Maple*» и «*MathCad*».

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны многоаспектные классификации технического оборудования сцены как сценических робототехнических и мехатронных систем, определены основные задачи их исследования.

2. Обобщены комплексные требования к сценическим робототехническим и мехатронным системам, определены основные особенности построения сценического пространства, сформулированы формализованные ограничения на параметры движения объектов декорационного оформления.

3. Предложена концепция структурно-гибкой робототехнической системы для современного театра, обеспечивающая автоматизированное размещение мехатронного оборудования в пределах сценической коробки в зависимости от сценографии спектакля.

4. Сформулированы принципы многоуровневого управления современным спектаклем в театре как в человеко-машинной робототехнической системе.

5. Предложен способ построения параллельных и параллельно-последовательных кинематических цепей модульных манипуляторов роботов, основанный на замене приводных звеньев переменной длины звеньями постоянной длины.

6. Показано, что замена классической плоской шестистепенной платформы Стюарта манипуляторами, у которых выходное звено представляет собой твердое тело, а шарниры приводных звеньев расположены в пространстве, а не в плоскости, значительно расширяет возможности задания перемещений.

7. Разработаны научные основы и методология анализа области возможных положений для сценических роботов с параллельными кинематическими цепями с различным числом степеней подвижности.

8. Предложены научно обоснованные принципы построения сценических роботов с гибкими параллельными кинематическими цепями на базе автоматизированных канатных театральных лебедок; разработана методика решения статической задачи о распределении усилий по канатам и предложен метод определения границ области возможных положений выходного звена в шестимерном пространстве исходя из условий поочередного обращения в нуль усилий в канатах.

9. Разработан метод определения допустимых в динамике перемещений подвижной шестистепенной платформы и оценены изменения области возможных положений.

10. Предложены принципы имитации сцен катастроф и разрушения применительно к условиям современного театра; сформулированы и решены модельные задачи процессов разрушения типовых элементов конструкций.

11. Разработана методология проектирования антропоморфных и зооморфных демонстрационных роботов, включая выбор кинематических схем и способа задания движений с помощью автоматических приводов.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались на Международном конгрессе МТ 04 в Варне (Болгария), на III международной конференции по проблемам механики современных машин в Улан-Удэ (2006), на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике в Нижнем Новгороде (2006), на Всероссийской научно-технической конференции по мехатро-

нике, автоматизации и управлению во Владимире (2004), на Всероссийских и международных научных конференциях и семинарах в СПбГПУ и ЦНИИ РТК (СПб), на секции технической кибернетики Дома ученых им.М.Горького (СПб). По результатам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, из них одна монография и 6 - в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что на основании обобщения опыта создания сценической машинерии и разработанных научных и методологических основ проектирования средств театральной мехатроники и робототехники осуществлены проекты новых современных театральных сцен и технического оснащения спектаклей ведущих театров страны.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и приложений. Объем диссертации составляет 348 страниц текста, в который входит 84 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой аналитический обзор принципов построения и оборудования театральной машинерии. Констатируется малочисленность фундаментальных трудов по технике сцены, которые интегрировали бы знания в этой области, хотя научно-технические достижения здесь в отдельные эпохи не уступали военной технике. На русском языке по технике сцены имеются обобщающие труды только одного автора: В.В.Базанова «Техника изготовления театральных декораций» (1959), «Сцена, техника, спектакль» (1963), «Техника и технология сцены» (1976), «Технология сцены» (2005). К сожалению, наиболее сложные явления в театральной машинерии в этих монографиях лишь названы, конструктивные схемы приведены только некоторых типовых технических устройств, а научная и даже просто расчетная проблематика полностью отсутствует.

В последнее годы при создании декораций применяются автоматические и автоматизированные устройства, комплектные автоматизированные управляемые электроприводы и гидроприводы. Машинерия сцены определяется техническими и финансовыми возможностями, вкусами эпохи, характером сценического действия, стилистикой постановки, време-

нем, выделенным на создание спектакля и, в наибольшей степени, замыслом постановщиков.

В механизации и автоматизации планшета сцены следует выделить три направления создания и совершенствования подвижных оснований декораций и их фрагментов: подъемно-опускные устройства, вращающиеся круги и кольца, накатные площадки. Основной особенностью оперно-балетных театров является наличие перед сценой оркестровой ямы, оснащенной одной или несколькими подъемно-опускными площадками. Такие же площадки встраивают и в планшет сцены. Они покрывают площадь до 250 м². Грузоподъемность площадок достигает 2,5 кН/м², величина хода - 6 м, скорость движения – 0,2 м/с, а погрешность позиционирования – 1...5 мм.

Поворотный круг определяет важное направление механизации сцены. Часто на сцене реализуются системы нескольких поворотных кругов разных размеров. Малые поворотные круги размещаются на неподвижном планшете или большом поворотном круге. Иногда на сцене в дополнение к кругу устанавливается концентрично с ним поворотное кольцо. Диаметры современных театральных кругов достигают 16 м (при этом часто круг выполняется модульным с возможностью изменения диаметра), несущая способность – 5,0 кН/м², скорости на периферии - 1 м/с, погрешности позиционирования по наружному периметру – 5 мм.

Фуры прямоугольной формы в составе сценического оборудования часто перемещаются по направляющим. Их размеры достигают 16 х 4 м, грузоподъемность – 320 кН, скорости – 0,1 м/с, а точность позиционирования – 2...4 мм. Кроме того, фуры используются как принадлежность конкретных спектаклей при имитации движущихся объектов (кораблей, автомобилей и пр.), для изменения композиции декораций на сцене или при монтаже (демонтаже) спектакля. Фуры обычно выполняют на мягком колесном ходу и в отдельных случаях оснащают автономным электроприводом и дистанционным управлением. В таком исполнении их следует классифицировать как локомотивные роботы. Размеры таких роботов могут достигать 12 х 4 м, грузоподъемность – 40 кН, скорость – 0,4 м/с, а погрешность позиционирования 100 мм.

Некоторые подвижные декорации со встроенными механизмами, оснащенными современными приводами и системами управления, новых спектаклей ведущих театров России с полным основанием могут быть классифицированы как сценические демонстрационные роботы, антропоморфные, зооморфные или локомотивные. Максимальный габаритный

размер таких роботов может достигать в длину 12 м, масса – 600 кг, количество встроенных механизмов с приводами – 16, точность позиционирования – 50 мм.

Горизонтальная поверхность планшета приемлема не для всех постановок. Традиционным для театра является формирование рельефа сцены с помощью временно устанавливаемых станков – стационарных конструкций с художественной облицовкой. С начала XX века ставились задачи трансформирования поверхности сцены с помощью приводов. До сих пор идеи управляемого формирования рельефа сцены (в том числе и на глазах зрителей) реализованы лишь в небольшой степени. На основании обобщения большого эмпирического материала в диссертации разработана многоаспектная классификация технических устройств для автоматизированного изменения рельефа сцены. Концептуально проработан принцип построения сценических конструкций изменяемой геометрии, состоящих из автоматизированного привода и шарнирно соединенных плоских щитов, позволяющих создавать многогранную поверхность с изменяющимся наклоном плоских участков.

В начале XXI века в театрах получило широкое распространение подвижное и трансформируемое крупномасштабное оборудование, устанавливаемое на сцене. К числу таких устройств относятся: большие ворота с раскрывающимися и закрывающимися створками; сборно-разборные конструкции, фрагменты которых подобны ящикам; раскладные конструкции типа ширмы. Исполнительные механизмы таких технических средств, оснащенные приводами и программируемыми системами управления, следует классифицировать как сценические роботы-трансформеры.

О масштабах современных демонстрационных комплексов можно судить, например, по техническому проекту новой сцены Мариинского театра, который предусматривает оснащение сцены 654 механизмами с электроприводами и многоуровневой системой управления. Мощность каждого из приводов будет составлять от 0.75 до 50 кВт, а их суммарное энергопотребление – 4114 кВт. Общая масса, которая может подниматься и перемещаться в сценической коробке этим комплексом, составит 657000 кг. В это же время в специализированном демонстрационном робототехническом комплексе тетралогии Р.Вагнера «Кольцо нибелунга» Государственного Академического Мариинского театра (постановка Г.Ципина, 2003 г.) используется 168 механизмов с электроприводом суммарной потребляемой мощностью 42 кВт и общей массой 11000 кг.

Совокупность робототехнического сценического комплекса, помощника режиссера (главный координатор по ведению спектакля), дирижера, оркестрантов, артистов и техников-операторов в диссертации рассматривается как сценическая человеко-машинная система. На рис.1 представлена схема взаимодействия элементов такой системы. Элементы и взаимодействия, определяющиеся понятием «человеческого фактора», обозначены тонкими линиями.

На основании анализа известного театрального оснащения сформулированы новые научно-технические проблемы в области развития театральной машинерии.

Вторая глава посвящена анализу сценического пространства и постановке задач построения структурно-гибкого демонстрационного робототехнического комплекса театра. В качестве примера на рис.2 представлен продольный разрез новой сцены Государственного Академического Мариинского театра. Зрительный зал справа. Объем видимой из зала зоны обслуживания сценической демонстрационной робототехнической системы (открытое сверху пространство сцены за занавесом) составляет 12000 м³. Он в семь с половиной раз меньше объема, занятого оборудованием робототехнического комплекса (рабочая зона, значительная часть которой занята системами подвешивания), составляющего 91500 м³. Структура сценического робототехнического комплекса представлена на рис.3. Основные трудности создания и функционирования оборудования сцены связаны с обеспечением требуемой подвижности сценических объектов. Наиболее ответственным во всех отношениях является верхнее оборудование сцены, построенное как система подвешивания объектов декорационного оформления над планшетом сцены. Для декораций основной и наиболее эффективной является система подвешивания с помощью канатов, на штанкетных подъемах или на тельферах индивидуальных подъемов; в настоящее время они обычно оснащены приводами с программным управлением. Размещение электромеханических лебедок на потолочных балках, на галереях и на стенах при использовании канатных передач предоставляет достаточно широкие возможности смены положений и перемещения различных объектов на сцене. Однако на положение точек подвеса декораций накладываются ограничения, обусловленные расположением несущих конструкций здания театра, поскольку именно на них монтируются лебедки, тельферы или отводные блоки. Так, например, в Государственном Академическом Мариинском театре расстояния между поперечными несущими конструкциями перекрытия составляет 4 м и это оз-

начает, что по ширине сцены несущие канаты могут располагаться с таким же шагом. Проблема обеспечения необходимой конфигурации системы подвешивания должна решаться путем установки дополнительных несущих конструкций или траверс. На основе этого традиционного для театра способа взаимодействия приводов с подвижными объектами в главе 5 предложено новое для сцены многостепенное устройство на канатном подвесе и разработана его теория. Сложная организация пространства сцены и динамичная сменяемость состава робототехнических комплексов современного большого театра требует единообразного, четкого,

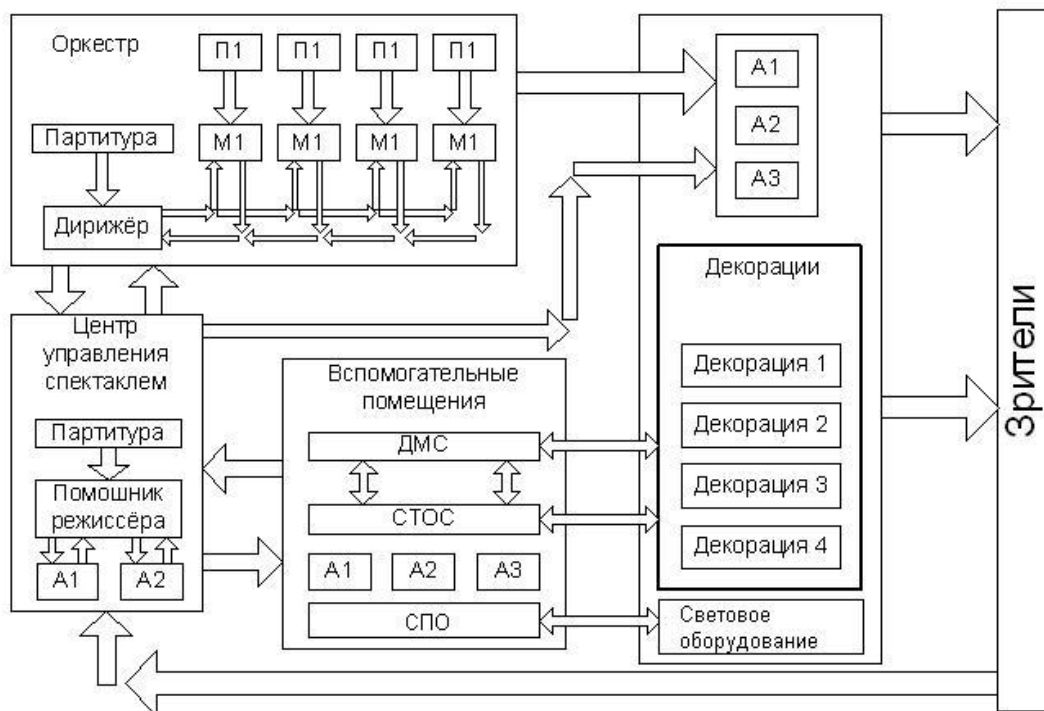


Рис.1.

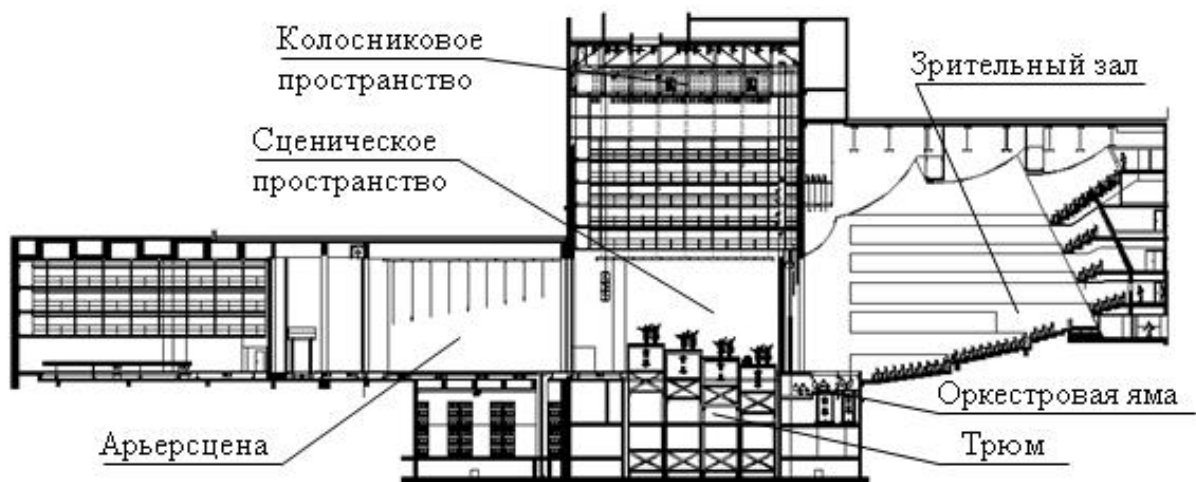


Рис.2.

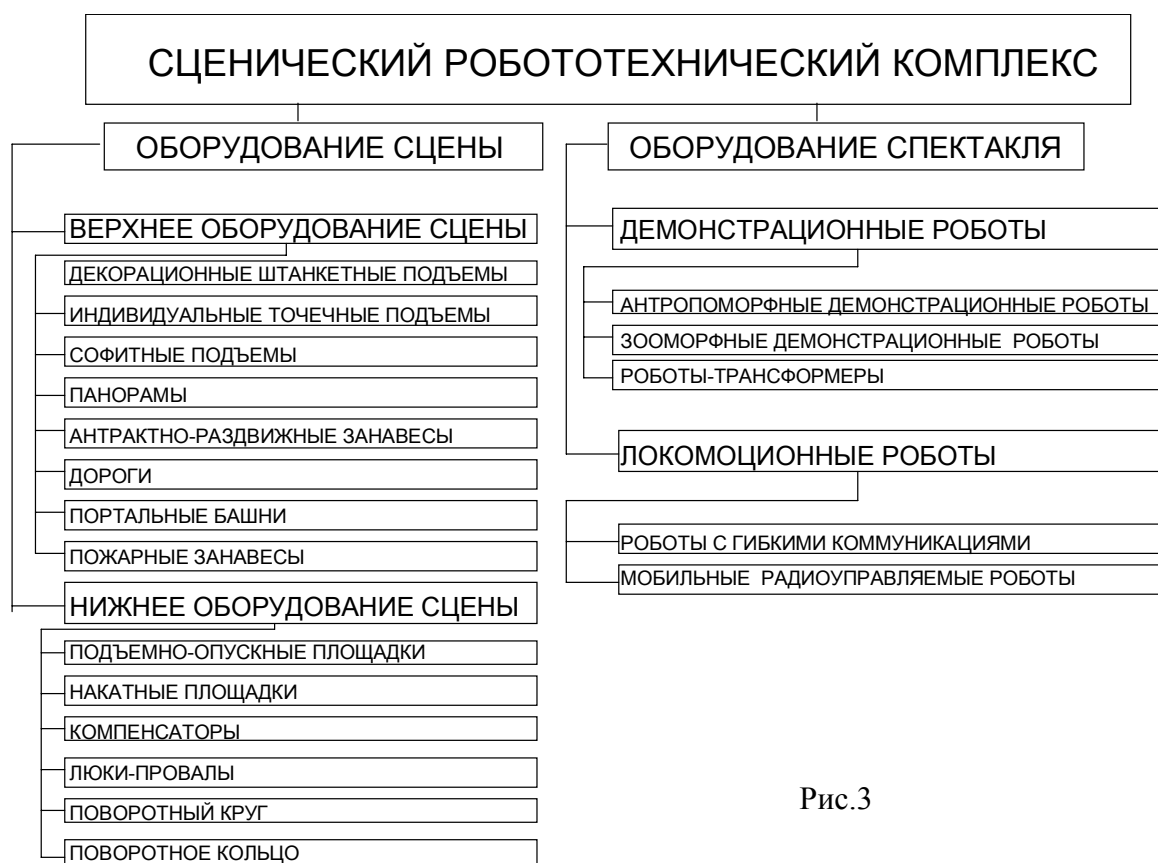


Рис.3

формализованого геометрического описания. Оно необходимо для разработки сценического демонстрационного роботизированного комплекса, для компьютеризации управления движением объектов на сцене, для оптимальной организации сборочно-монтажных и наладочных работ при подготовке спектакля и перемене декораций. В результате проведенного анализа выявлены следующие специфические особенности организации сцены театра, рассматриваемой как общее рабочее пространство для функционирования демонстрационных роботов и робототехнических комплексов:

- в пространстве сцены и прилегающих помещений характерна высокая концентрация сменных, движущихся объектов;
- для предотвращения конфликтных компоновочных ситуаций подвижные декораций и их фрагменты следует размещать в плоскостях, параллельных порталу сцены;
- при проектировании сценической машинерии предпочтение отдается устройствам вертикального перемещения декораций;
- приводы, расположенные в удалении, требуют использования передач с гибкими связями;

- применительно к процессам, происходящим на сцене, актуальной стала задачи повышения быстродействия оборудования;

- современная сценическая машинерия требует контурного программного управления подвижными декорациями с обеспечением его адаптации в режиме on-Line к перемещениям и к музыкальному сопровождению;

- человеко-машинный комплекс, построенный на базе робототехнической и мехатронной систем, должен обеспечивать безусловную безопасность актеров и оркестрантов, являющихся его неотъемлемой компонентой.

С учетом перечисленных особенностей применительно к конкретным постановкам сформулированы принципы построения алгоритмов управления.

В третьей главе рассмотрены научные и технические проблемы автоматизированного формирования рельефа сцены в робототехнических сценических комплексах и предлагается классификация его видов. Рельеф может быть как стационарным, так и динамически меняющимся в процессе сценического действия. Стационарный рельеф тоже целесообразно выполнять трансформируемым, поскольку обычно окончательная концепция оформления сцены формируется после нескольких репетиций и окончательное решение может отличаться от первоначального художественного замысла.

Предложены следующие способы автоматизированного формирования рельефа:

- «вытягивание» рельефа из плоской выкройки;
- «вытягивание» рельефа из плоской выкройки, выполненной из эластичного материала;
- создание рельефа из объемных, перемещающихся в горизонтальной плоскости станков с пространственной конфигурацией;
- создание рельефа из объемных многоярусных станков (ярусы имеют возможность смещаться один относительно другого);
- формирование рельефа путем раздвижения телескопических конструкций;
- поворот плоских щитов относительно произвольно ориентированной оси.

Конструкция, образующая поверхность рельефа сцены, в совокупности с автоматизированным приводом или приводами и соответствующей системой управления рассматривается как мехатронная система.

В работе предложены различные варианты реализации привода таких систем на базе стационарного оборудования сцены (штанкетных декорационных подъемов и стационарных подъемно-опускных площадок), мобильного оборудования сцены (мобильных индивидуальных подъемов и подъемно-опускных площадок), специальных встраиваемых механизмов с электромагнитными двигателями и локомоционных роботов с программным или супервизорным управлением. В первом случае мехатронные модули обеспечивают взаимодействие между элементами, образующими рельеф (при этом допускается свободное скольжение или качение элементов по планшету). Во втором случае локомоционные роботы с установленными на них декорированными станками перемещаются по планшету, изменяя его рельеф. Предложены принципы построения кинематических схем и методика определения рациональных конструктивных параметров сценических локомоционных роботов. Для мехатронных модулей с электромагнитным приводом предложена научно обоснованная методика проектирования последнего по критерию быстродействия.

В заключении главы даны типовые принципиальные и кинематические схемы и решения по построению и управлению мехатронных систем для трансформирования рельефа сцены.

В четвертой главе решаются проблемы научно обоснованного выбора кинематических схем и разработки математических моделей роботов с параллельными кинематическими цепями, которые наилучшим образом подходят для театральной сцены, когда требуется задавать сложные линейные и комбинированные (линейные и угловые) пространственные перемещения различных объектов.

Разработаны различные способы задания положения звеньев таких роботов. Предпочтительным является задание угловой ориентации звеньев роботов матрицами направляющих косинусов. При этом имеет место избыточность переменных, но основное преимущество метода заключается в линейности исходных геометрических соотношений, которые дополняются квадратичными уравнениями связей. В главе констатируются недостатки распространенных методов составления исходных геометрических соотношений. Показано, метод l -координат, предложенный А. Ш. Колискором, целесообразно применять только для частных случаев, когда шарниры приводных звеньев подвижной платформы и неподвижного основания лежат в двух плоскостях.

В диссертации рассмотрен общий случай произвольного расположения в пространстве шарниров приводных звеньев робота с параллель-

ными кинематическими цепями. Предложен метод описания параметров положения и угловой ориентации платформы робота, основанный на использовании геометрических соотношений между координатами шарниров, вытекающий из неизменности взаимного положения всех точек выходного звена как жесткого тела. Рассматривается прямая задача геометрии: заданы параметры положения выходного звена робота и определяют длины звеньев. Исходным является векторное уравнение:

$$\mathbf{p} + \mathbf{r}_i = \mathbf{R}_i + \mathbf{l}_i, \quad (1)$$

где \mathbf{p} – радиус-вектор центра платформы, \mathbf{r}_i – радиус-вектор i -го шарнира на платформе, \mathbf{R}_i – радиус-вектор i -го шарнира на основании, \mathbf{l}_i – радиус-вектор i -го звена. В матричном виде это уравнение имеет вид:

$$\rho + \Gamma r_i = R_i + l_i, \quad (i=1, \dots, 6) \quad (2)$$

где Γ – квадратная матрица преобразования (направляющих косинусов γ_{ij} системы $OXYZ$ в системе $O_0X_0Y_0Z_0$, а $r_i = [x_i, y_i, z_i]^T$.

В проекциях на оси системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ получается система из 18 уравнений относительно 18 проекций векторов \mathbf{l}_i :

$$\begin{aligned} l_{ix0} &= x_0 - R_{ix0} + \gamma_{11} x_i + \gamma_{12} y_i + \gamma_{13} z_i; \\ l_{iy0} &= y_0 - R_{iy0} + \gamma_{21} x_i + \gamma_{22} y_i + \gamma_{23} z_i; \\ l_{iz0} &= z_0 - R_{iz0} + \gamma_{31} x_i + \gamma_{32} y_i + \gamma_{33} z_i. \quad (i=1, \dots, 6.) \end{aligned} \quad (3)$$

Проекция длин i -го звена определяется выражением:

$$l_i = (l_{ix0}^2 + l_{iy0}^2 + l_{iz0}^2)^{1/2}. \quad (4)$$

При положении выходного звена (платформы), заданном координатами центра и матрицей преобразования Γ , решение прямой задачи геометрии, т.е. определения длин звеньев, осуществляется при последовательном использовании уравнений (2), (3). По углам Крылова или по элементам кватерниона определяются все элементы матрицы Γ . По формулам (3) определяются все проекции l_{ix0} , l_{iy0} , l_{iz0} для шести звеньев, а потом по формулам (4) – сами длины l_i . Поскольку уравнения (3) линейны, то при отсутствии дополнительных ограничений решение прямой задачи существует и оно единственно. Полученное решение необходимо проверять по ограничениям на длины l_i , определяемым ходами приводов. Направляющие косинусы i -го звена с осями этой системы вычисляются по формулам:

$$\beta_{i1} = l_{ix0}/l_i; \quad \beta_{i2} = l_{iy0}/l_i; \quad \beta_{i3} = l_{iz0}/l_i. \quad (5)$$

Уравнения осей i -го приводного звена записываются в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ в параметрической форме следующим образом:

$$x_i = R_{ix0} + (l_{ix0}s)/l_i; \quad y_i = R_{iy0} + (l_{iy0}s)/l_i; \quad z_i = R_{iz0} + (l_{iz0}s)/l_i. \quad (6)$$

Применительно к общему случаю расположения шарниров как наиболее перспективному, предложен метод геометрического анализа, основанный на использовании в качестве переменных направляющих косинусов углов ориентации звеньев как основных параметров положения. При этом число переменных вдвое превышает число степеней подвижности, поэтому в общую систему включаются дополнительные уравнения связей переменных.

Предложен и второй способ решения задачи, основанный на использовании системы дополнительных неизвестных - параметров угловой ориентации (направляющих косинусов) для всех звеньев. При этом длины звеньев предполагаются заданными. Всего вводится 18 неизвестных, частично зависимых (через условия нормировки), поэтому независимыми являются только 12 из них. Координаты верхнего шарнира в неподвижной, базовой системе координат определяются формулами:

$$x_{i0} = R_{ix0} + l_i \beta_{i1} ; \quad y_{i0} = R_{iy0} + l_i \beta_{i2} ; \quad z_{i0} = R_{iz0} + l_i \beta_{i3} . \quad (7)$$

Здесь первый индекс – номер звена, второй – номер оси, относительно которой определяется ориентация. Из трех направляющих косинусов независимыми являются два, третий вычисляется через условие нормировки. Эти выражения записываются для верхних шарниров всех звеньев. С другой стороны, на координаты тех же точек налагаются условия (6) того, что верхние шарниры принадлежат подвижному звену робота. Эти условия инвариантны относительно системы координат и поэтому в неподвижной системе имеют вид:

$$b_{ij}^2 = (x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2 + (z_{i0} - z_{j0})^2 . \quad (8)$$

Из параметров b_{ij} независимыми являются 12. После подстановки (7) в (8) получается система из 12 уравнений (8) и шести уравнений нормирования относительно восемнадцати неизвестных – направляющих косинусов $\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}$ ($i = 1, \dots, 6$). В данном случае задача определения угловой ориентации приводных звеньев решалась без использования данных о положении робота, а только по задаваемым длинам этих звеньев. По исходной формулировке метод решения соответствует обратной задаче геометрии (длины звеньев считаются заданными), число уравнений и неизвестных здесь больше, чем при использовании первого метода. При малых приращениях Δl_i длин l_i относительно номинальных значений l_{i0} , зависимости могут быть линеаризованы.

Пример построения сечений области возможных положений (ОВП) для центра платформы робота при поступательных перемещениях (при

сохранении номинальной угловой ориентации) и при ограничениях на хода приводов приведен на рис.4 а, б, в. Разработанной метод построения ОВП применим при анализе роботов с параллельными кинематическими цепями и с числом степеней подвижности от двух до шести.

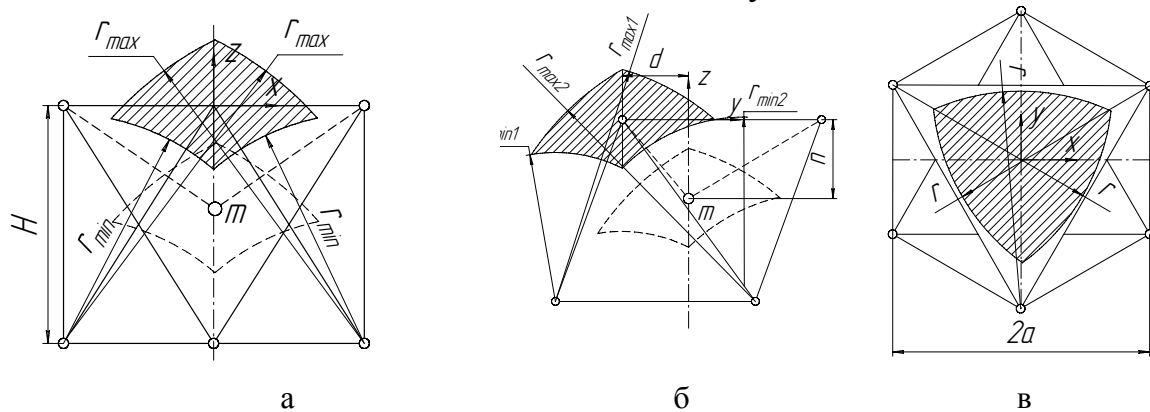


Рис.4.

Пятая глава посвящена исследованию роботов параллельной структуры с различным числом степеней подвижности, которые имеют перспективы применения в техническом оснащении сцены, в первую очередь, в специализированных демонстрационных робототехнических системах. Исследуются схемы с числом степеней подвижности от двух до шести. Во всех случаях анализируются ОВП и описывается их конфигурации, формулируются рекомендации по выбору основных геометрических параметров, т.е. координат точек расположения шарниров, длин звеньев, ходов приводов и пр. Примеры наиболее перспективных для театра схем механизмов манипуляторов с двумя и тремя степенями подвижности приведены на рис. 6 а, б, в и г. При синхронной работе приводов 5 и 6 робота (рис.6 а) осуществляется одновременный поворот выходного звена вокруг осей Z и Y , т.е. вектор его угловой скорости лежит в плоскости YZ .

В варианте б предложен другой принцип реализации траектории: приводное звено 6 только изменяет положение основной оси вращения, одна из точек которой фиксируется звеньями 1, 2 и 3, а приводное звено 5 задает повороты вокруг этой оси. Звено 4 постоянной длины предоставляет возможность приводному звену 6 задавать однозначно положение верхней правой точки платформы (т.е. основной оси вращения).

На основании анализа потребностей современной сценографии предложена схема трехстепенного робота (рис.6 в, г). Расположение неподвижной точки в углу прямоугольной платформы не принципиально,

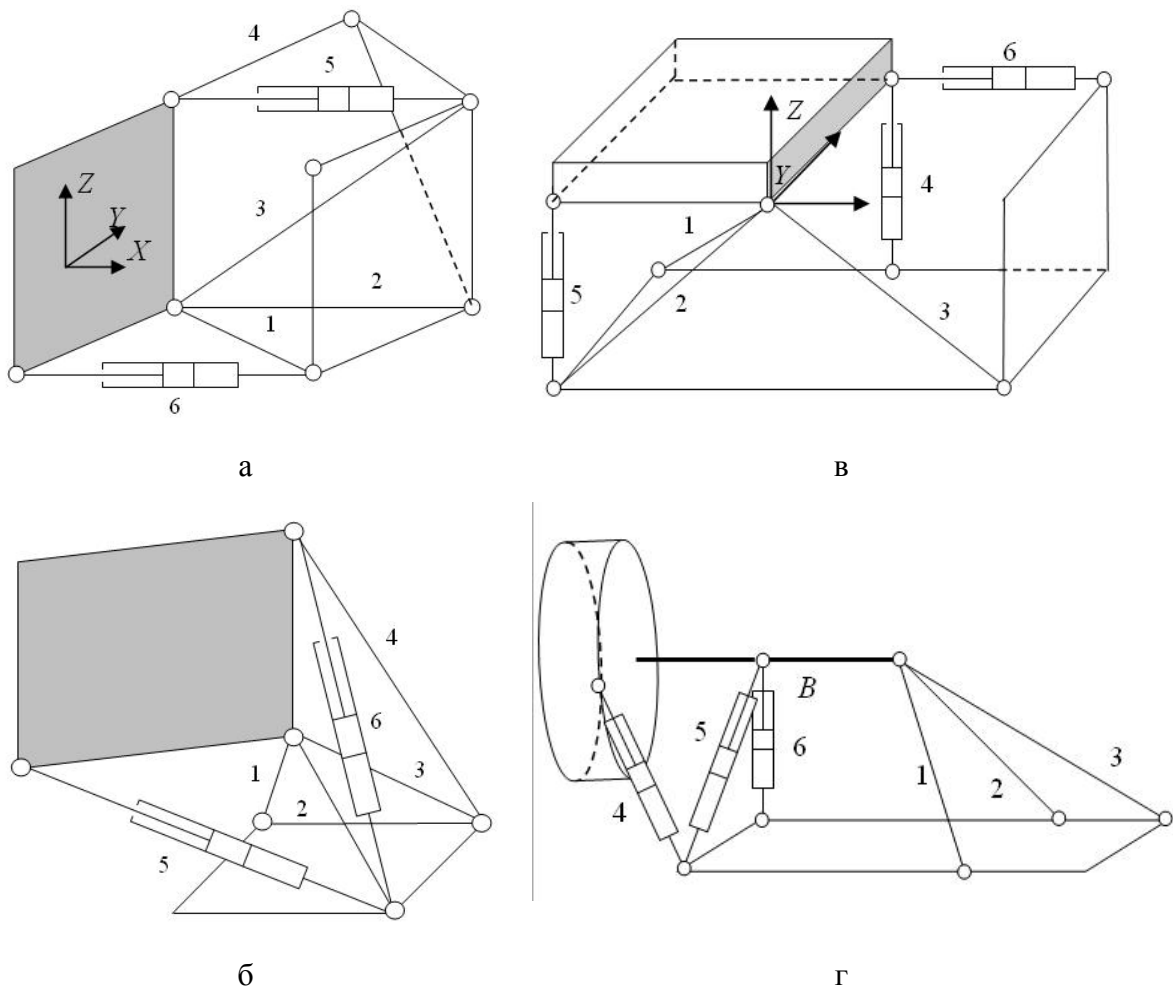


Рис.6

важно лишь то, чтобы шарниры приводных звеньев были на ортогональных осях, проходящих через эту точку. В диссертации показано, что матрица коэффициентов линеаризации относительно изображенного номинального положения диагональная. Поэтому вследствие условий приближенной ортогональности имеют место следующие уравнения связи малых углов поворота θ_x , θ_y , θ_z вокруг осей X , Y , Z и перемещений Δs_x , Δs_y , Δs_z , задаваемых приводными звеньями:

$$\theta_x = \Delta s_x / l_y; \quad \theta_y = \Delta s_y / l_x; \quad \theta_z = \Delta s_z / l_y. \quad (12)$$

Ось привода 5 не обязательно вертикальна. Ортогональность значительно упрощает управление приводами при задании угловой ориентации малыми углами Крылова.

Например, на сцене гигантская голова может кивать сверху вниз, наклоняться слева направо, а в знак отрицания - поворачиваться слева направо. В случае необходимости возможно неортогональное взаимное угловое ориентирование осей приводных звеньев.

Два приводных звена 4 и 5 задают положение оси вращения (в данном случае – оси симметрии), которую можно считать главной, а звено 6 – вращение вокруг этой оси (рис. 6 г). В этом случае существенные преимущества получаются при замене приводного звена (линейного привода) вращательным приводом. Как и в предыдущем случае, три пассивных звена 1, 2, 3 постоянной длины задают неподвижную точку платформы.

Основные геометрические соотношения для большого числа других кинематических схем определены по методике, разработанной в главе 4.

Шестая глава посвящена разработке теории сценических роботов с параллельными кинематическими цепями и гибкими звеньями. Выходное звено таких роботов – твердое тело, подвешенное на шести канатах, длины которых изменяются по специально синтезированным законам с помощью лебедок с программным управлением. На схеме (рис. 5 а) лебедки размещены снизу на одном горизонтальном уровне, а отводные блоки могут крепиться к установочным приспособлениям на стенах, планшете или колосниках. Такие роботы обеспечивают возможность перемещения подвижных объектов по всему сценическому пространству (например, при имитации свободного полета или при выполнении монтажа громоздких декораций).

В рабочем положении выходного звена все канаты натянуты и обеспечивается фиксирование его по шести степеням подвижности. Для сравнения на рис.5 б представлена схема робота, при которой неизбежны маятниковые колебания платформы. Очевидным достоинством таких схем демонстрационных сценических роботов является возможность использования канатов практически неограниченной длины в пределах сценической коробки при различных способах размещения в пространстве позиций установки лебедок.

Равновесие выходного звена робота с гибкими звеньями имеет место в пределах ОВП, которая в общем случае является шестимерной (в шестимерном пространстве трех линейных координат и трех углов поворота). Для роботов с параллельными кинематическими цепями и жесткими звеньями определяющими для построения ОВП являются ограничения хода линейных приводов, и поэтому границы ОВП строятся исключительно из геометрических соотношений. Принципиальной особенностью рассматриваемых роботов является то, что все канаты воспринимают только усилия растяжения, но не сжатия, и налагаемые ими связи являются не двусторонними, а односторонними. Поэтому при решении задач о

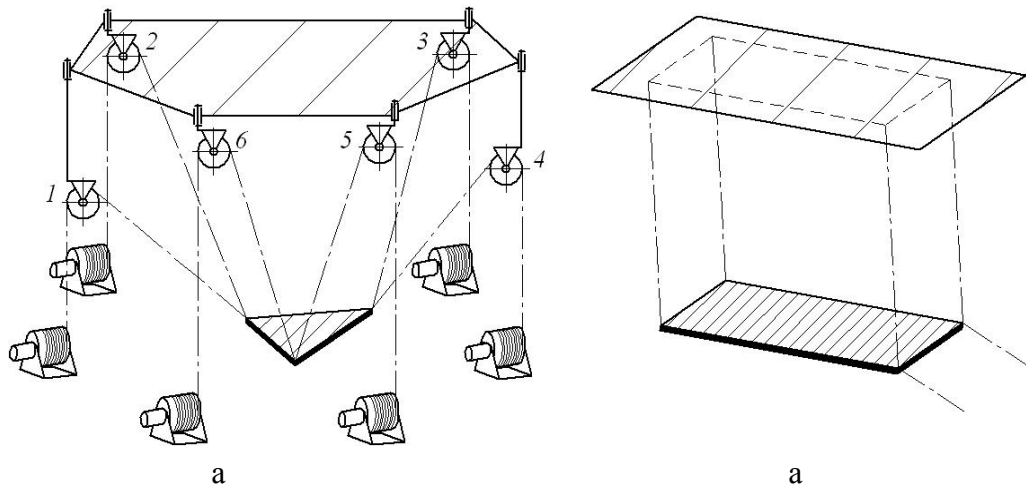


Рис.5.

статическом равновесии в первую очередь учитываются ограничения на неотрицательность усилий в канатах и условия их непересечения. Конструктивные ограничения на изменение длин канатов практически отсутствуют, а остальные геометрические ограничения учитываются при программировании траектории движения.

Для шестистепенного робота в статике силы растяжения приводных звеньев, задающие положение выходного звена и его позиционирование, определяются весом платформы и канатов. Для повышения надежности системы подвешивания и расширения ОВП предложено вводить избыточные параллельные кинематические цепи, обеспечивающие приложение дополнительных сил к выходному звену.

При отсутствии избыточности ОВП определяется на основе решения задач статики. Вводятся в рассмотрение векторы S_i сил реакций канатов, воздействующих на выходное звено; они направлены от точек закрепления канатов к соответствующим опорам:

$$S_i = S_i e_i, \quad (9)$$

где $e_i = l_i / |l_i|$ - единичный вектор, направленный по i -ому канату. В случае, когда учитывается только сила тяжести P , приложенная к выходному звену, определяемому радиусом-вектором r_c , записываются два уравнения равновесия сил и моментов:

$$\begin{aligned} \sum S_i + P &= 0; \\ \sum r_i \times S_i + r_c \times P &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

При введении дополнительных канатов, создающих силы S_{0j} , уравнения статики приобретают вид:

$$\begin{aligned} \sum S_{0j} + \sum S_j + P &= 0, \\ \sum r_j \times S_{0j} + \sum r_j \times S_j + r_c \times P &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Специфика задачи заключается в том, что двигателями или грузами задаются модули сил S_j , а их направления зависят от закрепления средства натяжения и определяются из решения задач геометрии, как и для основных канатов.

Разработана методика определения границ ОВП. Рассматривается шестимерное пространство Ω_c составляющих линейных координат и параметров углового положения. Вводится в рассмотрение шестимерное пространство Ω_s усилий. Между пространствами Ω_c и Ω_s существует бинарное соответствие: каждой точке пространства Ω_c соответствует точка пространства Ω_s и наоборот. Совокупность условий $S_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) означает выделение сектора в шестимерном пространстве Ω_s усилий. Выход на границу ОВП при перемещениях происходит тогда, когда по крайней мере одна из сил растяжения канатов обращается в нуль. Фиксирование одного из усилий S_r (в данном случае – приравнивание к нулю: $S_r=0$) означает выход точки на пятимерную гиперповерхность в шестимерном пространстве Ω_s усилий. Поскольку возможных независимых условий $S_r=0$ шесть, то в шестимерном пространстве усилий выделяется шестигранник с криволинейными гиперплоскостями.

Аналитическое или численное определение границ ОВП производится по следующему алгоритму. Записывается система уравнений статики (10) или (11). Они линейны относительно шести S_i и относительно заданных приложенных сил, причем коэффициенты этой системы зависят помимо силы веса и других параметров от координат центра выходного звена и углов поворота, т.е. от координат шестимерного пространства.

Задаются такие параметры положения выходного звена, при которых сила в первом канате обращается в нуль, т.е. $S_1=0$. Это соответствует выходу на границу в шестимерном пространстве Ω_s усилий, на границу сектора положительности усилий, а в шестимерном пространстве Ω_c - и на границу ОВП. В этом случае уравнения статики превращаются в систему шести линейных алгебраических уравнений относительно пяти неизвестных сил S_i (при $i = 2, \dots, 6$). Эта система имеет решение тогда, когда между шестью параметрами положения существует единственное соотношение. Это соотношение может быть формально представлено в виде уравнения, связывающего все шесть параметров положения выходного звена. Во введенном шестимерном пространстве Ω_c координат этому уравнению соответствует гиперповерхность, которая представляет собой один из участков границы ОВП. Аналогичным образом, задавая условие $S_2=0$, получается уравнение второго участка границы ОВП и т.д.

По предложенной методике проведена серия расчетов двумерных сечений ОВП в предположении малости размеров платформы по сравнению с расстояниями между точками расположения лебедок. Сформулированы рекомендации по рациональному размещению лебедок, обеспечивающему возможно большее расширение ОВП.

Учет веса канатов осуществляется путем совместного решения задач о статическом равновесии платформы и каждого из канатов. Предложен и опробован приближенный способ учета сил веса канатов, основанный на вычислении поправок в первом приближении. Учет указанного фактора приводит к некоторому уменьшению ОВП.

В заключении главы рассмотрена прямая задача динамики робота с параллельными кинематическими цепями и гибкими звеньями. При этом в соответствии с принципом кинестатики для заданного закона движения робота к числу действующих на выходное звено сил в уравнениях статики добавлены силы инерции. Для типовых движений установлено, что положительность усилий в канатах может сохраняться даже при ограниченных смещениях платформы из статической ОВП, т.е. возможно существенное расширение динамической ОВП относительно статической.

В седьмой главе решаются задачи имитации на сцене эпизодов разрушений и катастроф. На основании анализа современного репертуара ведущих театров установлено, что наиболее эффектно для сцены имитировать разрушения кораблей, ландшафтных объектов (например, деревьев, скал, пещер), произведений архитектуры и строительных сооружений (колонн, стен, башен, дворцов, мостов), монументальной скульптуры. Представлена классификация эффектов разрушения. Все эффекты разрушения разделены на три группы:

- разрушение объекта на фрагменты, когда меняется их взаимное расположение в пространстве;
- изменение формы объекта с имитацией больших пластических деформаций сжатия и (или) изгиба;
- комбинированные варианты разрушения с разделением на фрагменты и с деформацией отдельных элементов.

Основными принципиальными требованиями к средствам имитации разрушения в театре, в отличие от кинематографа, являются обеспечение многократного идентичного воспроизведения и минимум уровня шума.

Проблемы имитации пластических деформаций решаются путем применения мехатронных модулей на базе механизмов, воспроизводящих поворот и поворот с линейными перемещениями. Сами модули покрыва-

ются эластичными оболочками, декорированными под заданную постановщиком фактуру. Воспроизведение разрушения на фрагменты является наиболее выразительным и требует многосторонней проработки. Для обеспечения правдоподобности разрушения предложено производить его математическое моделирование.

Большое внимание в главе уделено воспроизведению разрушения колонн. Падение колонны происходит от первоначального толчка и далее в процессе движения под действием собственного веса и сил инерции она разваливается на составные части.

Движение колонны как единого целого предложено описывать классическим уравнением поднятого маятника в отклонениях от нейтрального (равновесного) положения, при котором центр масс находится на одной вертикали с осью поворота. Уравнение моментов относительно точки поворота имеет вид:

$$I d^2\varphi/dt^2 = mg (c \sin \varphi - \frac{1}{2}d \cos \varphi), \quad (13)$$

где φ – угол наклона (его нельзя считать малым), m – масса, а I – момент инерции тела относительно оси вращения, d – диаметр фрагмента, c – координата центра тяжести.

Известное аналитическое решение выражает начальное значение φ_0 через специальные функции. На первой фазе движения колонна рассматривается как жесткий стержень (рис.7 а), поворачивающейся по закону, определяемому полученным решением, а на второй - частицы распавшейся колонны двигаются в поле сил тяжести по параболам (рис. 7 б). Угол поворота и угловая скорость в критический момент времени t^* распада на части обозначаются через φ^* и ω^* . Значения координат и проекций линейной скорости в момент времени t^* определяются выражениями:

$$\begin{aligned} x(t^*) &= l \sin \varphi^*; & z(t^*) &= l \cos \varphi^*; \\ V_x(t^*) &= l\omega^* \cos \varphi^*; & V_z(t^*) &= -l\omega^* \sin \varphi^*. \end{aligned} \quad (14)$$

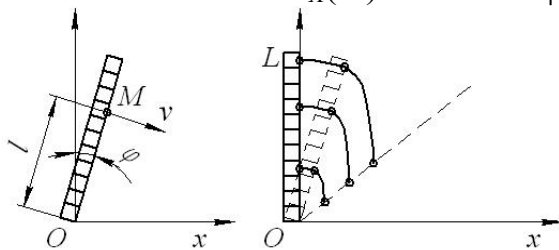


Рис.7.

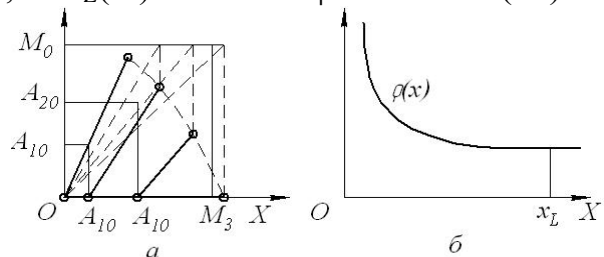


Рис.8.

Начиная с момента t^* , движение произвольной точки M происходит как свободное в поле силы тяжести. Закон движения определяется выражениями:

$$\begin{aligned}x(t) &= l \sin \varphi^* + l (t - t^*) \omega^* \cos \varphi^*; \\z(t) &= l \cos \varphi^* - l (t - t^*) \omega^* \sin \varphi^* - \frac{1}{2} g(t - t^*)^2.\end{aligned}\quad (15)$$

Для имитации разрушения представляет интерес не закон движения определенной точки, а изменение во времени линии, соединяющей положения всей совокупности точек (фрагментов).

В наиболее распространенном случае, когда разрушение происходит под действием короткого импульса, можно приближенно принимать $t^*=0$, $\varphi^*=0$ и для координат фрагмента записать следующие выражения:

$$x(t) = l t \omega^*; \quad z(t) = l - \frac{1}{2} g t^2. \quad (16)$$

Схема построения текущих положений совокупностей точек для значений моментов времени t_1, t_2, t_3 представлена на рис.8 а. В процессе падения линия трансформируется от вертикального положения $OA_{10} A_{20} M_0$ в момент t_1 в ломаную $OA_1 M_1$, затем, в момент t_2 в ломаную $OA_1 A_2 M_2$ (при этом угол наклона уменьшается) и, наконец, в горизонтальную прямую $OA_1 A_2 M_3$. Произвольная точка A_{20} переходит в точку A_2 , ее координата x_l определяется выражением:

$$x_l = 1,41 \omega^* l^{3/2} g^{-1/2}, \quad (17)$$

а координата конечной точки M_3 рассчитывается по формуле:

$$x_L = 1,41 \omega^* L^{3/2} g^{-1/2} = 1,41 V^* L^{1/2} g^{-1/2}, \quad (18)$$

где V^* - начальная скорость верхней точки колонны. Величина зоны разброса обломков при падении колонны пропорциональна начальной угловой скорости, но нелинейно зависит от высоты L .

При анализе сцен разрушения колонны (рис.9 а, б) значение x_L является основным показателем, определяющим картину разброса обломков. Представляет интерес исследование преобразования линейной плотности частиц в процессе движения. Формула преобразования, полученная из условия сохранения массы, имеет вид:

$$\rho(l) = \rho_0 |dl/dx|, \quad (19)$$

где $\rho(l)$ и ρ_0 - плотности распределения массы по колонне в начале и в конце разрушения. Выражения для плотности фрагментов имеют вид:

$$\rho(x) = 0,529 \rho_0 g^{1/3} x^{-1/3} (\omega^*)^{-2/3} \quad (20)$$

Наибольший интерес представляет зависимость плотности от координаты x после падения колонны. Если для окрестности точки производная $dl/dx < 1$, то плотность уменьшается, а при $dl/dx > 1$ плотность повышается. Во втором случае частицы в исходном положении плотно прилегали друг к другу, а в конечном положении они начинают «налезать» друг на друга, образуя нагромождение фрагментов. Из второй формулы (22) следует, что плотность распределения частиц (рис.9 в) имеет характер

гиперболы. Условие $dl/dx > 1$ выполняется для всего отрезка $(0, x_L)$, если оно выполняется для его конца:

$$g^{1/3} L^{-1/3} (\omega^*)^{-2/3} > 1,89 \quad (21)$$

В этом случае плотность везде будет ниже начальной (рис.9 г). В противном случае на одной части отрезка будет нагромождение фрагментов, а на другой – между ними будут промежутки (рис. 9 в).

В некоторых случаях можно сделать выводы о характере вращения фрагментов, обломков в процессе их полета. Если плотность уменьшается, что реализуется при достаточно большой ω^* , то их свободному вращению в полете ничто не мешает, они сохраняют постоянной начальную угловую скорость ω^* . Если же угловая скорость мала, то между фрагментами, обломками возникают сложные ударные взаимодействия, так что использование каких-либо простых математических моделей становится невозможным.

Формулы, приведенные выше, справедливы при распадении колонны на фрагменты в положении близком к вертикальному. Однако полученные качественные и количественные показатели сохраняются, если разрушение колонны происходит при конечном угле ϕ_0 .

Проблему определения угла ϕ_0 и времени t^* предложено решать на основании представлений о нарушении равновесия или условий прочности. Предложено в процессе моделирования сцен разрушений и катастроф варьировать и вводить следующие факторы:

- количество фрагментов и форма поверхностей стыка;
- дополнительные связи между фрагментами (фрагменты могут быть соединены шарнирами, допускающими повороты, или тросами);
- начальные условия, определяемые характером и способами приложения импульсов;
- способы соединения фрагментов в единое целое на первых этапах и порядок их разъединения на последующих этапах разрушения;
- переход от плоских движений во фронтальной вертикальной плоскости к пространственным движениям.

В главе также научно обоснованы принципы рационального фрагментирования крупных конструкций, картина разрушения которых воспроизводится на сцене. Предложены принципы построения мехатронных систем для «растягивания» процесса разрушения во времени.

В восьмой главе представлены результаты работы автора, реализованные в современных постановках ведущих театров России.

Для тетралогии Р.Вагнера "Кольцо нибелунга" (гл. 1) созданы четыре одиннадцатиметровые фигуры великанов, которые представляют собой модульные антропоморфные демонстрационные роботы. В полной комплектации масса робота составляет 600 кг, он имеет 9 встроенных, 7 внешних и 23 навесных управляемых приводов. На рис. 10 представлен «скелет» великана с встроенными механизмами и приводами, на рис. 11 – его внешний вид, а на рис.12 показана кинематическая схема позвоночного столба. В соответствии с требованиями постановщиков спектакля кинематические схемы рук, ног и позвоночного столба выполнены пятизвенными. В основу манипулятора робота положена схема с последовательно-параллельными кинематическими цепями. В работе выполнен анализ конструкции манипулятора великана и алгоритмов управления его

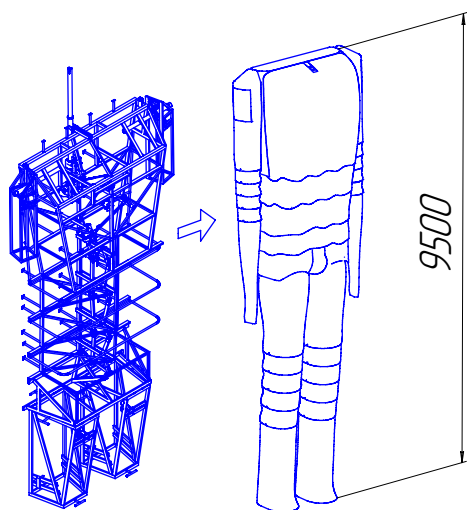


Рис. 10

Рис. 11

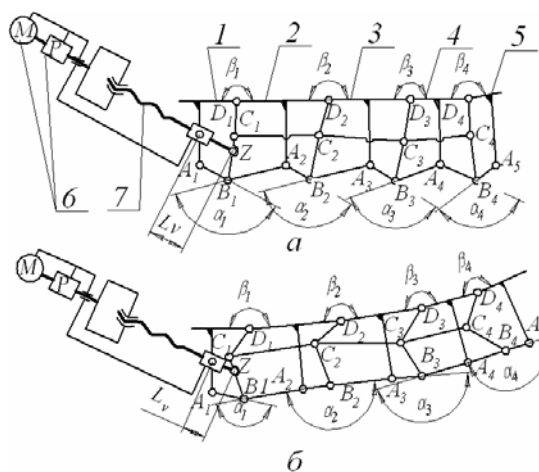


Рис. 12

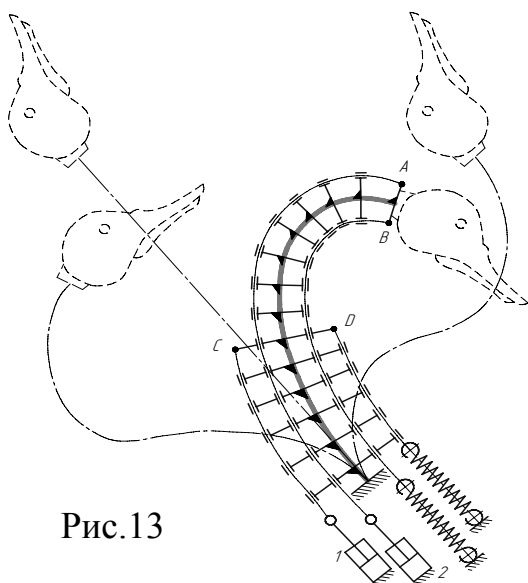


Рис.13

сценическими движениями, приведены данные о результатах расчета и моделирования основных элементов.

Сформулированы и решены задачи согласования движений с музыкальным сопровождением на основе автоматизации управления.

На рис. 13 изображена схема гибкой шеи лебедя, зооморфного демонстрационного робота, разработанного для постановки оперы Р.Вагнера "Лоэнгрин". Шея построена на гибком тонком стержне 1, он деформируется

натяжением управляемых канатов 2, 3, 4 и 5. Для демонстрационных сценических роботов в отсутствии высоких требований к точности позиционирования схема на упругом стержне имеет много преимуществ. Построена математическая модель управляемого деформируемого упругого элемента. Для этого использована теория больших деформаций тонких криволинейных стержней. Численное решение этой системы уравнений при дискретизации найдены методом конечных элементов. Выбор геометрических параметров осуществлялся по результатам экспертного оценивания выразительности сценической картины деформации. На рис. 13 показаны конфигурации шеи, полученные при двухканальном управлении.

Для постановки оперы М.Мусоргского «Борис Годунов» в Мариинском театре (2002 г.) создан зооморфный робот – паук. В его основу положена схема со смешанными кинематическими цепями: каркас (туловище) с восьмью разомкнутыми кинематическими цепями лап подвешен на четырех канатах. Робот имеет разомкнутую систему управления на базе контроллера GM6 с программированием по времени. Масса робота составляет 240 кг, а габаритные размеры - 8,0 x 8,0 x 8,0 м.

Одиннадцать мобильных электромеханических локомотивных роботов повышенной маневренности созданы для оперных спектаклей Мариинского театра: «Борис Годунов» (2002 г.) в постановке Г.Ципина, «Нос» (2004 г.) в постановке З.Марголина, «Мадам Баттерфляй» (2005 г.) в постановке М.Трелинского. Четыре робота созданы для спектакля Большого театра России «Болт» (2005 г.) в постановке С.Пастуха. Размеры роботов составляют от 1,0 x 1,0 x 0,3 м до 3,2 x 12,0 x 4,0 м, грузоподъемность – от 150 кг до 1200 кг, а скорости движения – от 0,1 м/с до 1,0 м/с.

Разработан мехатронный комплекс из шестнадцати подвижных модулей, установленных в два яруса по высоте с размерами до 2,2 x 5,6 x 2,0 м, выполненных в виде параллелепипедов для спектакля Большого театра России «Война и мир» (2006 г.) в постановке А.Боровского. Комплекс позволяет изменять структуру сценического пространства во время представления.

В техническом проекте новой сцены Александринского театра (2006 г.) впервые реализована концепция структурной гибкости, предложенная автором [2, 3]. Сущность концепции заключается в обеспечении возможности автоматизированной гибкой адаптации сценического комплекса к технологии проведения конкретного спектакля. Проблемы адаптации решены применительно к манипуляционной системе, состоящей из 56 авто-

матизированных подъемников грузоподъемностью 150 кг и 250 кг. Возможность перемещения элементов сценического робототехнического комплекса обеспечена тремя порталными транспортными роботами и одной автоматизированной транспортной тележкой. Такой подход к автоматизации переконструкции оборудования сцены позволяет решать две важнейшие задачи. Во-первых, штанкеты в такой системе ориентируются в пространстве в зависимости от пожелания постановщика. Во-вторых, 56 автоматизированных подъемников размещаются в пространстве таким образом, что в несущей конструкции декорации сложной формы при подвешивании можно минимизировать напряжения и деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Систематизирован опыт создания и эксплуатации техники сцены и установлено, что фундаментальной основой для дальнейшего развития театральной машинерии являются сценические структурно-гибкие адаптивные робототехнические и мехатронные системы.

2. Сформулированы принципы построения сценических структурно-гибких человеко-машинных комплексов и организации автоматизированного управления современным оперно-балетным спектаклем.

3. Определены перспективные направления развития сценической робототехники и мехатроники, показано, что для реализации пространственных движений целесообразно создание роботов с параллельными кинематическими цепями.

4. Разработаны научные основы и методология комплексного проектирования роботов для сцены, сформулированы принципы модульного построения, при которых предусмотрены взаимно совместимые модули оснований, выходных звеньев, линейных приводных звеньев, линейных звеньев постоянной длины и шарнирных узлов.

5. Существенно развит математический аппарат исследования роботов с параллельными кинематическими цепями, доказано, что их наибольшие функциональные возможности достигаются при размещении шарниров приводов не в двух плоскостях, а в трехмерном пространстве.

6. Предложен способ формализованного описания геометрии сценических роботов с параллельными кинематическими цепями, путем задания матриц направляющих косинусов приводных звеньев, произведен анализ конфигурации рабочих зон таких роботов.

7. Разработана теория роботов с параллельными кинематическими цепями и с гибкими звеньями, приводимыми в движение программно управляемыми лебедками с помощью канатов переменной длины, сформулиро-

ваны и обоснованы практические рекомендации по созданию на их базе средств имитации свободного полета и выполнения операций монтажа декораций.

8. Сформулированы основные положения теории построения области возможных положений выходного звена робота с параллельными кинематическими цепями, с гибкими звеньями и с учетом условий неотрицательности усилий в канатах, влияния прогибов канатов и сил инерции.

9. Показано, что для расширения области возможных положений сценического демонстрационного робота с параллельными кинематическими цепями и гибкими звеньями целесообразно использовать дополнительные канаты, силы натяжения которых следует задавать постоянными или изменять по программе.

10. Создана методология проектирования мехатронных модулей для имитации эпизодов разрушений и катастроф, которая предусматривает отработку на математических моделях разрушения колонн, перекрытий, сводов, арок, стен, башен и т.п.

11. Рекомендованы перспективные схемы построения локомобионных роботов для театральной сцены и выполнен анализ их функциональных возможностей.

12. Предложены научно обоснованные принципы построения и схемные решения для антропоморфных и зооморфных сценических роботов с комбинированными кинематическими цепями.

13. Разработаны принципы организации автоматизированного управления современным оперно-балетным спектаклем.

14. Результаты исследований использованы при создании проектной документации на новые сценические площадки семи ведущих театров страны и театральной машинерии для 32 спектаклей Государственного Академического Большого театра России, Кремлевского Дворца съездов, Государственного Академического Мариинского театра, театра им. Ленсовета, Санкт-Петербургского театра комедии им. Н.П.Акимова, Санкт-Петербургского театра музыкальной комедии и других.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Волков А.Н., Дьяченко В.А., Медведев С.В., Саратовский С.В.** А.с.1109331 СССР/Устройство для передвижения по гладкой поверхности, произвольно ориентированной в пространстве.-БИ №31-1984.

2. **Волков А.Н., Бросалин Б.Б., Дьяченко В.А., Сунгурова Л.П.** А.с. 1497902 СССР/Устройство для перемещения по гладкой поверхности.- Б.И. № 33.-1985.

3. **Волков А.Н., Дьяченко В.А., Краснослободцев В.Я.** Патент России по заявке 4804846/11/034703/Устройство для передвижения по произвольно ориентированной в пространстве поверхности.- Б.И. №21.-1986.

4. **Волков А.Н., Дьяченко В.А., Катковник В.Я, Смирнов А.Ю.** Принцип построения структурно-адаптивного роботизированного производства// Робототехнические системы: Тез.докл. III Всесоюзной межвузовской конф., Челябинск: изд. ЧПУ.- 1983.-С.49.

5. **Волков А.Н., Смирнов А.Ю.** Управление размещением модулей структурно-гибкого роботизированного производства//Труды ЛПИ им. М.И.Калинина. Л: изд. ЛПИ; № 410.- 1985.- С.69-73.

6. **Волков А.Н.,** Теория и расчет электромагнитных средства автоматизации //Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы науч.-техн.конф. СПб: изд. СПбГТУ.-1997.-С59.

7. **Волков А.Н., Алексеев П.В.** Динамика быстродействующих цикловых механизмов с линейным электромагнитным приводом//Сб.трудов СПбГТУ.-СПб: издание СПбГТУ; № 481.-1998.-С.54-57.

8. **Волков А.Н., Алексеев П.В.** Проблемы автоматизации проектирования цикловых приводов//Сб.трудов СПбГТУ. СПб: изд. СПбГТУ; № 510.-1999.-С.24-27.

9. **Волков А.Н., Алексеев П.В., Викторов О.А., Ефимов И.Г.** Электромагнитный привод - современное состояние и перспективы развития//Научно-техн. ведомости СПбГТУ. СПб: изд. СПбГТУ; № 3 (17).-1998.- С.96-100.

10. **Волков А.Н., Кочетков А.В.** Динамика быстродействующего циклового привода с линейным двигателем//Вестник машиностроения М: Машиностроение; № 6.-1999.- С.19-21.

11. **Волков А.Н., Соколов В.А.** Проблемы проектирования демонстрационных роботов//Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы III Всероссийской научно-техн. конф. СПб: изд. СПбГПУ.- 1999.-С.39.

12. **Волков А.Н., Смородов П.В.** Трехкоординатный домкрат// Робототехнические системы для работы в экстремальных условиях: Материалы науч.-практ. конф. СПб: изд. СПбГПУ.-2001. С.47.

13. **Волков А.Н., Павлова С.В.** Манипуляторы с параллельными кинематическими цепями и дискретными приводами//Робототехнические системы для работы в экстремальных условиях: Материалы науч.-практ. конф. СПб: изд. СПбГПУ.-2001.- С.54.

14. **Волков А.Н.** Машинное оснащение современного театра// Научно-технические ведомости СПбГТУ.-СПб: изд. СПбГТУ; №4(34).- 2003.-С.97-105.

15. **Волков А.Н.** Мехатроника театральной сцены//Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ`2004): Материалы всероссийской науч.-техн.конф.с международным участием. Владимир: изд. ВГУ.2004.-С.57-61.
16. **Волков А.Н., Смородов П.В.Челпанов И.Б.** Задачи механики современного театра// IV Международный конгресс «Машиностроительные технологии `04»: Сб. докл. т.5. Варна, Болгария: - 2004.- С.99-100.
17. **Волков А.Н., Смородов А.В.** Построение сечений рабочей области платформы Стюарта//IV Международный конгресс «Машиностроительные технологии `04»: Сборник докладов т.5. Варна, Болгария:-2004.-С.101-124.
18. **Волков А.Н., Смородов П.В., Челпанов И.Б.** Демонстрационные роботы на сцене театра: фигуры великанов в тетралогии Вагнера «Кольцо нибелунга»// Теория механизмов и машин, № 3, СПб, 2004.- С.70-76.
19. **Волков А.Н.** Шестистепенные подвесные платформы и их исследование. – СПб., изд. СПбГПУ, 2006, 92 с.
20. **Волков А.Н., Мархадаев Б.М.** Перспективы создания погрузочно-разгрузочного оборудования на базе шестистепенных платформ//Вестник ИрГТУ. – Иркутск: изд. ИрГТУ; №3.- 2005.- С. 32-36.
21. **Волков А.Н.** Подвижные конструкции на сцене современного театра//Конструктор-машиностроитель.- СПб: №6.- 2005.-С.20-23.
22. **Волков А.Н.** Имитация сцен разрушений и катастроф на сцене современного театра//Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ.конф. СПб.: изд. СПбГПУ.- 2006.-С.41.
23. **Волков А.Н.** Новые технологии в постановке современных спектаклей// Научные исследования и инновационная деятельность: Материалы науч.-практ.конф. СПб.: изд. СПбГПУ.- 2006.-С.43.
24. **Волков.А.Н., Челпанов И.Б.** Механика имитации сцен разрушений и катастроф на сцене театра// Проблемы механики современных машин: Материалы III международной конф. Улан-Удэ: изд. ВСГТУ, Улан-Удэ, 2006.- С.73-74
25. **Волков А.Н.** Механика сцены современного театра// IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докладов. Нижний Новгород: изд. НГУ; т.1.- 2006.- С.34-35
26. **Волков А.Н., Ситкин Д.С.** Транспортно-манипуляционные системы на базе шестистепенных подвесных платформ//Известия ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование.-Тула: изд. Тул.ГУ; Вып. 7.- 2006.-С. 128-135.
27. **Волков.А.Н., Ситкин Д.С.** Задачи динамики управляемого полета над сценой в современных театральных постановках//Научно-технические ведомости СПбГТУ.- СПб: изд. СПбГПУ; № 5-1(47). 2006.- С. 218-222.