

На правах рукописи

СМОРОДОВ Павел Владимирович

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ РОБОТЫ
ДЛЯ ТЕАТРАЛЬНОЙ СЦЕНЫ

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2005

Диссертация выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Волков Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Романов Павел Иванович
кандидат технических наук
Павлов Евгений Евгеньевич

Ведущая организация: ЗАО «Ратте»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 1 ноября 2005 г в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: С-Петербург, Политехническая 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 28 сентября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12
кандидат технических наук, доцент

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Техническое обеспечение современных театральных постановок большинства ведущих театров нашей страны и мира, в первую очередь оперно-балетных, таких, как Большой театр в Москве, Мариинский театр в С-Петербурге, Grand Opera в Париже, La Scala в Милане и т.п. отличается исключительной сложностью. Традиционные технические средства (подъемные занавесы, выдвижные кулисы, сменные задники, люки на поверхности сцены и пр.), которые входят в состав постоянного технического оснащения сцены, конечно, продолжают широко использоваться, но время, когда основная часть подготовительных работ к постановке каждого определенного спектакля заключалось лишь в живописном оформлении плоских декораций, давно прошло.

В настоящее время почти для каждого спектакля требуется новое серьезное техническое оборудование, преимущественно стационарное, но часто, кроме того, подвижное. Постановщики спектаклей и главные художники год от года усложняют оформление сцены, проявляя большую фантазию и иногда ставя перед разработчиками технического оснащения задачи на границах технических возможностей. При этом, как правило, техническое оснащение каждого нового спектакля сугубо индивидуально и требует оригинальных решений.

Анализ исторического опыта развития сценической техники оперно-балетных театров показывает, что всегда достаточно важным средством достижения эффектности театрального действия было использование на сцене больших перемещающихся и трансформирующихся объектов различного внешнего вида, в том числе антропоморфных и зооморфных. В настоящее время объекты, фрагменты технического оснащения сцены нередко настолько усложняются, что переходят в качественно новую категорию. Они могут выполнять сложные движения, могут иметь многочисленные подвижные части с самостоятельными приводами с микропроцессорным управлением. С полным основанием эти сложные объекты можно считать сценическими демонстрационными роботами. Объединение их с помощью единой системы автоматизированного управления требует создания соответствующих специальных роботизированных комплексов. По

отношению к сценическим демонстрационным роботам пространство сцены целесообразно рассматривать, как демонстрационное пространство. Высокая концентрация в демонстрационном пространстве различного штатного (постоянного и переменного) оборудования вместе со сценическими демонстрационными роботами определяет сложную структуру сценических роботизированных комплексов.

Сценические демонстрационные роботы следует рассматривать, как одну из разновидностей демонстрационных роботов, предназначенных для различных сфер применения. В серии работ ученых СПбГПУ для демонстрационных роботов была разработана их многоаспектная классификация. Были проанализированы типовые требования к демонстрационным роботам; в качестве основной отличительной особенности была определена ориентация исключительно на зрительное восприятие. Однако до сих пор сценические демонстрационные роботы не были объектом серьезного научного анализа, что приводило к серьезным трудностям при их проектировании. Сценические демонстрационные роботы имеют отчетливую специфику. Эта специфика заключается в больших размерах (до десяти метров и более, во весь размер сцены), в необходимости учета высокой плотности заполнения демонстрационного пространства и в повышенных требованиях безопасности для актеров и другого персонала. Для сценических демонстрационных роботов, имеющих значительный вес, необходимо учитывать ограничения по силовому взаимодействию с планшетом сцены и с другим оборудованием. При проектировании конструкций для данного типа демонстрационных роботов необходимо учитывать требования, обычные для любого сценического оборудования: максимальное соответствие замыслу постановщика, возможность согласования движений с развитием сценического действия, минимально возможная масса, возможность быстрой и технологичной сборки и разборки на сцене перед каждым спектаклем при минимальных технических средствах, компактность, хорошая сохраняемость при хранении и т.д. В то же время обычно не предъявляются высокие требования по быстродействию и точности выполнения движений, что нетипично для робототехники.

В техническом оснащении сцены всегда самыми сложными и ответственными были устройства задания движений и управления движениями различных подвижных объектов. Известно, что во всей многовековой истории театра в техническом оформлении спектаклей именно механическое движение больших объектов с подвижными частями, с одной стороны, производило незабываемый эффект, а с другой стороны, представляло серьезные технические трудности. Накопленный опыт часто оказывается достаточным в традиционных операциях (поднятие и опускание занавеса, задника, перемещение по рельсовому напольному или подвесному пути декораций, перемещение на роликах и т.п.), но он недостаточен при решении многих новых задач. Опыт показывает, что и в наше время именно механическая проблематика создания современной подвижной сценической демонстрационной техники, включая демонстрационные роботы, остается наиболее сложной, поэтому именно ей в данной диссертации уделяется наибольшее внимание.

Представляется, что насущно необходима опережающая научная проработка таких принципиальных, схемных и конструктивных решений сценических демонстрационных роботов и роботизированных комплексов, которые соответствуют современным представлениям о достижениях мировой театральной техники, о потребностях технического оснащения, о стилистике тех театральных представлений, которые ориентированы на использование широкого арсенала технических, в том числе мехатронных средств. В силу всего сказанного тема данной диссертации, посвященной решению ряда проблем, возникших при проектировании сценических демонстрационных роботов и мехатронных устройств, является актуальной.

Целью диссертации является разработка научно обоснованных методик решения ряда задач выбора схемных и конструктивных решений, расчета и проектирования сложных специальных сценических демонстрационных роботов на основе обобщения опыта их создания для сцены Мариинского театра.

Для достижения указанной цели были решены следующие

основные задачи:

- анализ структуры и организации демонстрационного пространства современного театра, наиболее распространенных типов несущих конструкций и различных устройств перемещения с позиций приспособленности к современным театральным постановкам;

- разработка математических моделей и методов расчета сценических антропоморфных демонстрационных роботов;

- разработка математических моделей и методов расчета манипуляционных систем с упругими звеньями.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- проектирование современных сложных сценических демонстрационных роботов должно опираться на анализ демонстрационного пространства сцены;

- построение сценических антропоморфных демонстрационных роботов требует совмещения системы регулируемого подвешивания со встраиванием механизмов с приводами;

- для зооморфных сценических демонстрационных роботов в виду отсутствия жестких требований на точность позиционирования целесообразно применять манипуляционные системы, построенные на основе деформируемого с помощью тросов гибкого упругого стержня, для их расчета следует использовать теорию больших деформаций тонких стержней;

- при построении сценических зооморфных демонстрационных роботов, анатомия которых содержит продольно вытянутые гибкие управляемые элементы, целесообразно использовать манипуляционные системы на основе рычажных механизмов;

Методы исследования. При построении математических моделей и при решении задач геометрии, кинематики и динамики сценических демонстрационных роботов для сцены театра использовались методы теоретической и аналитической механики, теории механизмов и теории упруго-

сти. При проведении на компьютере численных расчетов использовались универсальные программы *Mathcad* и *Mathlab*.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- систематизированы сведения о техническом оснащении сцен современных театров, предложена многоаспектная классификация сценического оборудования;
- определена специфика демонстрационных роботов, предназначенных для сцены;
- предложены и обоснованы подходы к выбору схемных решений и разработаны методики расчета модулей антропоморфных демонстрационных роботов для сцены;
- показано, что при построении типовых модулей зооморфных демонстрационных роботов целесообразно использовать гибкие конструкции на основе упругих стержней, изгибаемых с помощью тросовых тяг, сформулированы задачи их расчета, построены их математические модели и проведен анализ результатов;
- для зооморфных демонстрационных роботов предложены конструктивные решения на основе рычажных механизмов и разработана методика построения их рабочих.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что в ней разработаны методики проектирования сценических демонстрационных роботов для современного театра.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы использованы при разработке антропоморфных демонстрационных роботов для спектаклей тетралогии Р.Вагнера «Кольцо нибелунга»: «Золото Рейна», «Валькирия», «Зигфрид» и «Гибель богов» Санкт-Петербургского Мариинского театра.

Основные положения работы докладывались на международной научно-технической конференции МТ'04 в Варне (Болгария), на международной конференции «Экстремальная робототехника» в ЦНИИ РТК, а также семинарах кафедры "Автоматы" СПбГПУ. Основное содержание диссертации отражено в пяти публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Список литературы содержит 126 наименований. Общий объем диссертации 134 страницы, в тексте имеется 78 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, дается краткий обзор содержания диссертации по главам. Основной материал диссертации распределен по трем главам.

Первая глава посвящена анализу демонстрационного пространства современного театра. Общая схема, которая дает представление о насыщенности демонстрационного пространства различным оборудованием, представлена на рис. 1, где обозначены следующие устройства: 1 - штанкетные балки (на одной из них изображен занавес), 2 - софиты (на своих подвесах они могут быть установлены на требуемой высоте), 3 - дорога (с подвешенной на ней декорацией), 4 - крюк индивидуального подвеса (индивидуальные подвесы могут быть установлены на несущих балках в требуемые позиции), 5 - панорама (она состоит из двух конических барабанов, в процессе представления ткань перематывается с первого барабана на второй, чем создается эффект горизонтального смещения занавеса), 6 - пожарный занавес (представляет собой металлический щит, который в случае пожара опускается, и отделяет сцену от зрительного зала), 7 - поворотный круг, 8 - подъемно-опускные площадки (люки) (предназначены для подъема объектов и актеров из трюма на планшет сцены и наоборот), 9 - фулка (изображена несущей лодку), 10 - оркестровая яма (часто имеет пол, регулируемый по высоте), 11 – сценический демонстрационный робот.

В главе дается краткая характеристика технических устройств сцены различного назначения и различных типов, в первую очередь, подвижных: подъемно-опускных, перемещающихся по рельсовым путям, свободно перемещающимся по сцене на колесных шасси и пр.

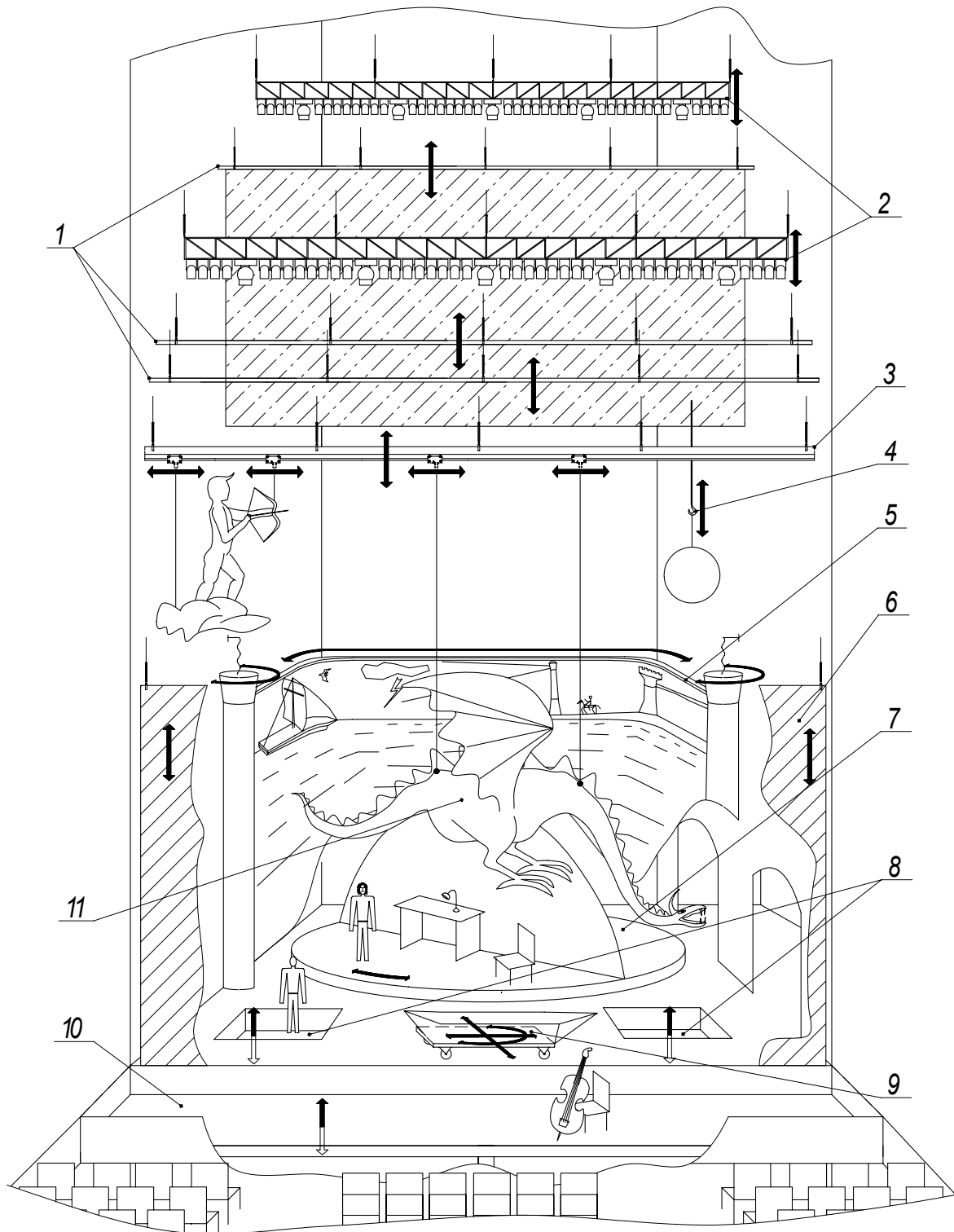


Рис.1. Типовая схема размещения объектов технического оснащения сцены театра

Также в первой главе дается многоаспектная классификация объектов технического оснащения сцены, в которой отмечаются признаки, соответствующие сценическим демонстрационным роботам. Схема многоаспектной классификации с перечислением основных классификационных

признаков представлена на рис.2. Классификационные признаки, свойственные различным видам сценических демонстрационных роботов, выделены на схеме утолщенной рамкой.

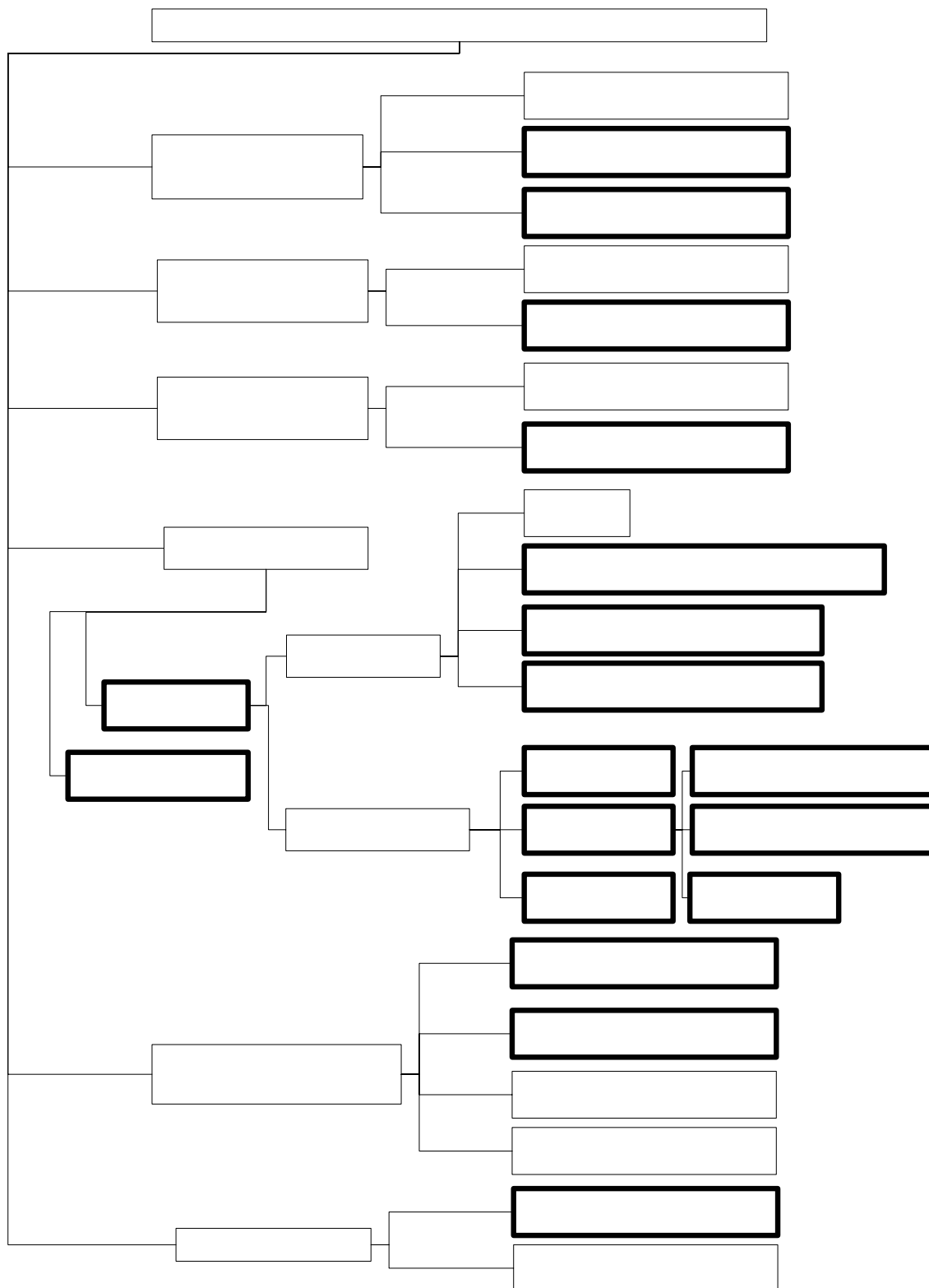


Рис.2. Классификация оборудования сцены

Обосновывается важное положение, что для театральных декораций основной является система подвешивания на штанкетах или одиночных тельферах. Размещение лебедок на потолочных балках и на стенах при использовании тросовых передач предоставляет достаточно широкие возможности смены положений и перемещения различных предметов на сцене, что целесообразно использовать при построении сценических демонстрационных роботов. Задачи перемещения декораций, в том числе сценических демонстрационных роботов, в современном театре можно разделить на две основные группы: монтажные задачи и рабочие задачи.

Монтажные задачи перемещения сводятся к установке и сборке декораций на позициях соответствующих запланированным для данного спектакля. Эта группа задач характеризуется тем, что на размещение декораций отводится ограниченный отрезок времени, который определяется как время монтажа спектакля. Имеют место ограничения на траектории движения декораций, которые связаны с наличием в рабочей зоне штатного, в том числе дорогостоящего подвесного оборудования (кулисы и софиты) и наличием на планшете сцены других декораций. Среди монтажных задач следует различать предварительные (перед началом спектакля) и межактовые (задачи смены декораций между актами). Под рабочими понимаются задачи, решаемые на сцене во время действия. В конце главы формулируются основные задачи исследования в диссертации.

Вторая глава посвящена методологии исследования механизмов антропоморфных демонстрационных роботов для сцены, начиная с задач геометрического анализа и синтеза. В этой главе рассматриваются механические персонажи «великаны», которые представляют собой антропоморфные демонстрационные сценические роботы. Представление о сложности дает конструктивная схема несущей конструкции (рис. 3).

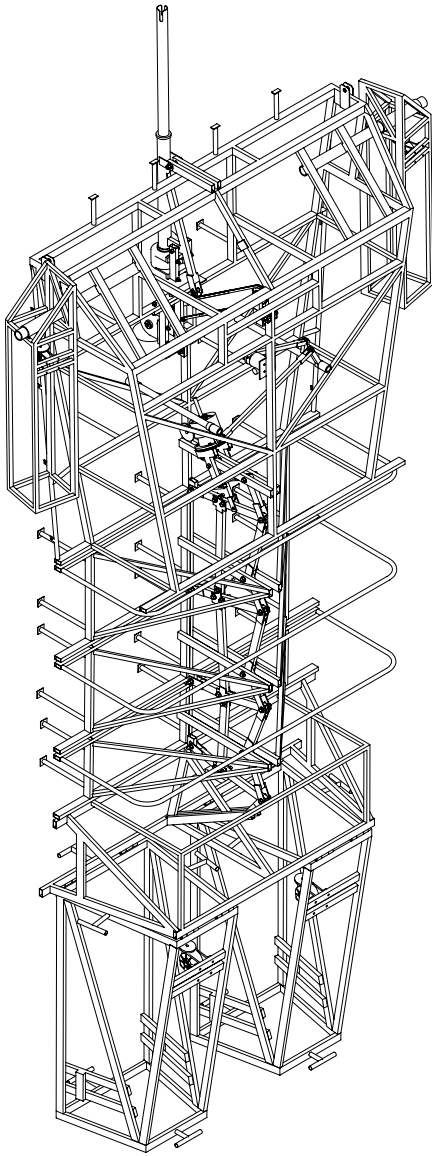


Рис.3. Каркас антропоморфного демонстрационного робота “великан”

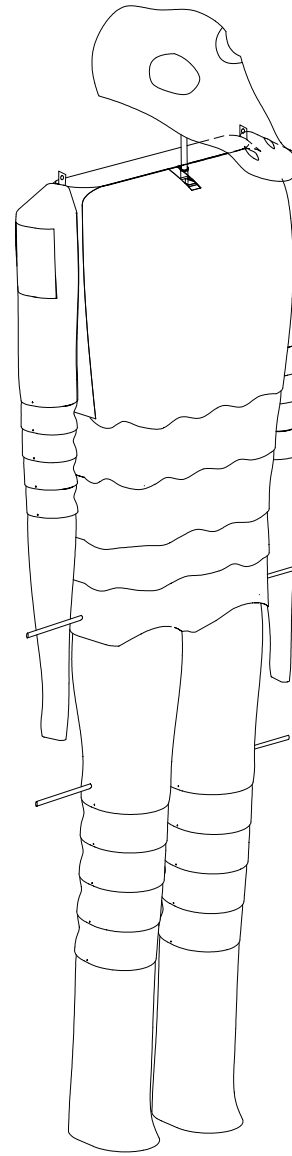


Рис.4. Внешний вид антропоморфного демонстрационного робота “великан”

Вид антропоморфного демонстрационного робота в собранном состоянии представлен на рис.4. Робот «великан» изображает собой человека. Его высота составляет 10 м, а ширина плеч 2,5 м. Руки «великана» имеют возможность изгибаться в локте и плечевых суставах, голова может наклоняться вперед и поворачиваться вокруг оси шеи, ноги могут изгибаться в коленях и тазобедренных суставах, подвижность также имеет торс демонстрационного робота, способный плавно изгибаться в области живота. Соответственно, исполнительный механизм имеет следующие модули: мо-

дуль изгиба спины, модуль поворота и наклона головы, модули изгиба рук, модули изгиба ног.

В данной главе обсуждаются и обосновываются в первую очередь принципы построения структуры механизмов подобных роботов. Прямое использование сведений из анатомии человека невозможно, так как в этом случае число степеней свободы будет недопустимо велико. Анализируются пути уменьшения числа степеней свободы, исходя из того, что в различных сценах «великаны» присутствуют на сцене в разных позах, причем изменение поз происходит медленно, в квазистатических режимах, поэтому большинство расчетов относится к геометрии и к статике.

Для модуля позвоночного столба при использовании единственного привода формулируется и решается задача параметрического синтеза, исходя из требований к получению требуемых форм изгиба в заданных диапазонах углов. На сцене «великан» ориентируется при помощи специальной системы подвешивания, состоящей из подвесной дороги и перемещаемой по ней тельферной тележке.

В модулях используются различные способы формирования и передачи движений: посредством шарнирно-рычажных механизмов и гибких звеньев. Для некоторых модулей (ног, начиная с коленных суставов) предложено использовать пассивный способ деформирования под действием сил тяжести. В главе проведен анализ конструкций антропоморфных демонстрационных роботов, построены их математические модели, разработаны методики расчета их наиболее важных модулей, исходя из требований к линейным перемещениям, углам поворота и деформациям, даны рекомендации по их совершенствованию, в частности, расширению их двигательных возможностей.

Третья глава посвящена исследованию возможностей воссоздания на сцене зооморфных демонстрационных роботов в виде сказочных персонажей и животных, анатомия которых содержит продольно-вытянутые управляемые гибкие элементы. Опираясь на опыт кукольного театра по созданию подвижной шеи лебедя и хобота слона (устройства их деформирования востребованы и на сцене оперного театра), предлагается исполь-

зывать ряд механизмов на основе гибких стержней в условиях больших те-
атров.

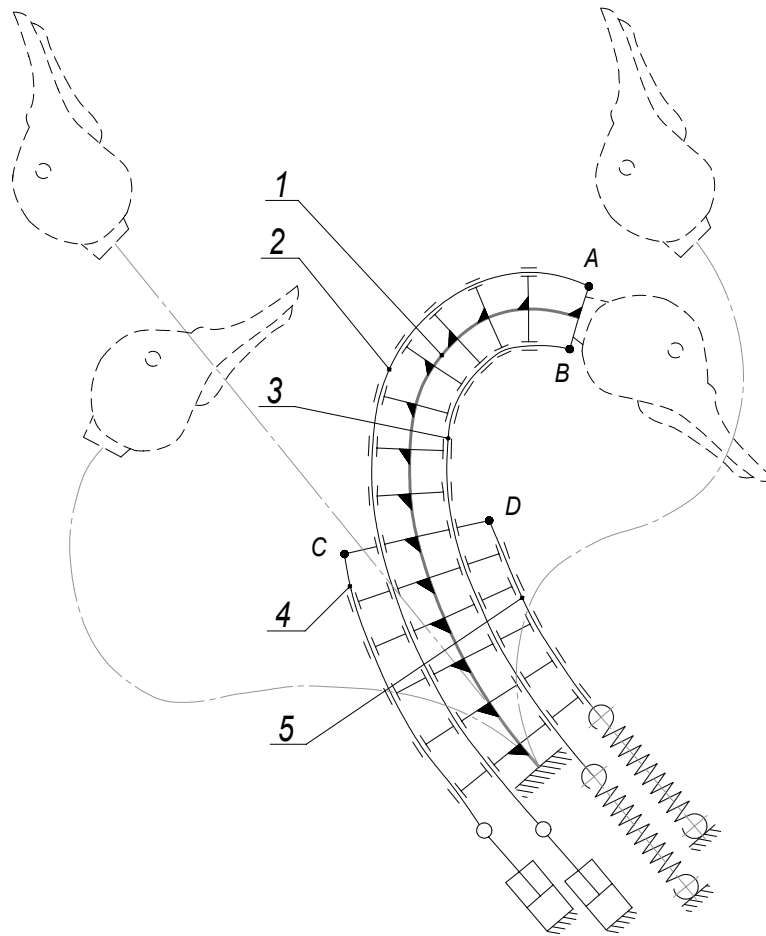


Рис.5. Схема манипуляционной системы для имитации гибкой шеи
лебедя

На рис. 5 изображена схема длинной гибкой шеи лебедя (разработанной для постановки оперы Р.Вагнера "Лоэнгрин"); механизм построен на гибком тонком стержне 1, он деформируется при управляемом натягивании тросов 2,3,4 и 5. Для демонстрационных роботов в отсутствии высоких требований к точности позиционирования, схема имеет много преимуществ при возможностях наращивания (несколько групп тросов с различными местами закрепления). Построена математическая модель управляемо-деформируемого упругого элемента, для этого использованы уравнения из раздела теории упругости – теории больших деформаций тонких криволинейных стержней. Основные уравнения этой теории имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{x_1}}{d\varepsilon} + q_{x_1} &= 0 \\ \frac{dQ_{x_2}}{d\varepsilon} + q_{x_2} &= 0 \\ \frac{d}{d\varepsilon} [A_{33} (\frac{d\varphi}{d\varepsilon} - \frac{d\varphi_0}{d\varepsilon})] + \cos(\varphi + \varphi_0) Q_{x_2} - \sin(\varphi + \varphi_0) Q_{x_1} + \mu_{x_3} &= 0 \\ \frac{du_{x_1}}{d\varepsilon} - \cos(\varphi + \varphi_0) + \cos(\varphi_0) &= 0 \\ \frac{du_{x_2}}{d\varepsilon} - \sin(\varphi + \varphi_0) + \sin(\varphi_0) &= 0 \end{aligned}$$

где Q_{x1} , Q_{x2} – проекции усилий в сечении на оси x_1 и x_2 ; q_{x1} , q_{x2} – проекции распределенной нагрузки; A_{33} – жесткость стержня; $\varphi(\varepsilon)$ – функция, описывающая текущую форму стержня (после приложения нагрузок); $\varphi_0(\varepsilon)$ – функция, описывающая начальную форму стержня (до приложения нагрузок); μ_{x3} – распределенный момент на стержне; u_{x1} , u_{x2} – проекции вектора определяющего положение точек изогнутой оси, ε – осевая координата (длина дуги). Численное решение этой системы уравнений при дискретизации находится методом конечных элементов. По результатам численного решения оценены возможности получения различных форм изгиба и формулируются рекомендации по выбору параметров. В диссертации разработаны методики статического и динамического анализа манипуляционных систем данного типа. Возможности манипуляционных систем такого типа проверены на специально спроектированном и изготовленном макете.

В главе предложено использовать манипуляционную систему на основе многозвенного рычажного механизма для воссоздания на сцене сказочных персонажей и животных, анатомия которых содержит продольно-вытянутые гибкие управляемые элементы. Предложена методика геометрического анализа данной манипуляционной системы. Разработана методика определения границ рабочей зоны и выработаны зависимости, позволяющие построить упрощенную рабочую зону концевой звена.

Выводы приводятся отдельно по главам, в интегрированном виде они содержатся в Заключение диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Проанализировано демонстрационное пространство современного театра и установлено, что в сценической машинерии наибольшее применение находят системы подвешивания с подъемными механизмами и горизонтальные дороги.
2. Выявлен наиболее рациональный принцип построения сценических демонстрационных роботов, заключающейся в совмещении системы регулируемого подвешивания на тельферных тележках с применением модулей со встроенными приводами.
3. Разработан модуль позвоночного столба антропоморфного сценического демонстрационного робота, позволяющий плавно сгибать спину робота при помощи одного привода. Установлено, что при построении модулей конечностей могут быть использованы такие приемы, как передача движений гибкими звеньями и пассивный способ деформирования под собственным весом при многозвенном выполнении конструкции. Разработаны математические модели и методика решения задач геометрии и статики этих модулей.
4. Предложено схемное и конструктивное решение для воссоздания на сцене сказочных персонажей и животных, анатомия которых содержит продольно-вытянутые управляемые гибкие элементы на основе гибких стержней. Разработана математическая модель и предложена методика расчета подобных систем. На основе теории больших деформаций криволинейных стержней для этого предложено использовать метод конечных элементов, и разработана программа численных расчетов.
5. Предложена и проработана оригинальная схема зооморфного робота на основе гибкого стержня для имитации змеевидного движения.

6. Сформулирован подход к решению прямой задачи динамики сценических демонстрационных роботов, построенных на основе гибких стержней.
7. Разработана методика построения зон возможных положений концевой звена для демонстрационного робота на основе многозвенного рычажного механизма.

Публикации автора по теме диссертации

1. Смородов П.В., Волков А.Н. Исследование динамики платформы Стюарта // 30 неделя науки СПбГПУ: материалы межвузовской науч.-техн. конф. Ч. III. – СПб.: изд. СПбГПУ, 2001. - С. 12-13.
2. Смородов П.В., Волков А.Н. Автоматизированные механизмы механизированного оснащения сцен оперных постановок // 32 неделя науки СПбГТУ: материалы межвузовской науч.-техн. конф. Ч. III. – СПб.: изд. СПбГТУ, 2003. - С. 17-18.
3. Смородов П.В., Волков А.Н. Построение сценических демонстрационных роботов с многозвенными кинематическими цепями // 33 неделя науки СПбГТУ: материалы межвузовской науч.-техн. конф. Ч. III. – СПб.: изд. СПбГПУ, 2004. - С. 13-14.
4. Волков А.Н., Смородов П.В., Челпанов И.Б. Задачи механики сцены современного театра // Сб. докл. международной конф. МТ'04. - Варна, Болгария, 2004. – С. 99-100.
5. Волков А.Н., Смородов П.В., Демонстрационные роботы на сцене театра: фигуры великанов в тетралогии Р.Вагнера "Кольцо нибелунга" // Теория Механизмов и Машин. 2005. -№1. С. 70 - 76.