

На правах рукописи

БУДЬКО Игорь Аркадьевич

**ЗМЕЕПОДОБНЫЕ ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ
РОБОТЫ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург- 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Волков Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Евстифеев Михаил Илларионович
кандидат технических наук
Павлов Евгений Евгеньевич

Ведущая организация: ЗАО «ТДМ»

Защита состоится 24.01.2012 г в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: С-Петербург, Политехническая 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

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

Автореферат разослан . . _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Анализ текущего состояния робототехники и тенденций развития в этой области в последние десятилетия показывает, что наблюдается поиск новых областей применения технических средств, которые относят к числу роботов. Известны многочисленные, достаточно сложные технические устройства, которые предназначаются не для выполнения производственных функций, а только для демонстрации самих себя. Такие устройства часто относят к самостоятельной категории демонстрационных роботов; требования к ним нетрадиционны для робототехники: привлечение внимания, хорошая дизайнерская проработка внешнего облика, естественность и видимая красота движений. К числу достижений относятся зооморфные и антропоморфные роботы для игр (*game robots*), роботы для выставок, приемов и парков развлечений.

В последнее десятилетие демонстрационная робототехника нашла применение в техническом оснащении сцен современных театров. Обобщение накопленного опыта технических разработок в этой области, перспективы дальнейшего развития и научная проблематика применительно к этому разделу робототехники представлены в докторской диссертации А.Н.Волкова и в его опубликованных работах. К настоящему времени с задачами робототехники для театральной сцены естественно объединить новые задачи создания больших демонстрационных роботов для празднеств, демонстраций, шествий и представлений на открытом воздухе, в том числе на площадях и стадионах. Потребности в создании подобных больших роботов (с обязательным учетом специфики восприятия в различных странах и регионах) подтверждается активным обсуждением проблематики на многих конференциях и в заинтересованных организациях. Большие размеры подобных роботов с изменяемой геометрией означают новое качество, необходимы новые подходы, принципиальные и технические решения. Накопленный опыт в этой области пока невелик (обычны лишь неизменяемые фигуры, которые к числу роботов отнести нельзя), требуются новые решения на основе серьезных научных исследований.

При этом необходимо опираться на опыт робототехники. Теория роботов разрабатывалась многими коллективами ученых, в ряду которых, начиная с семидесятых годов, видное место занимали отечественные специалисты,. Исторически наука робототехника (применительно в первую

очередь к манипуляционным роботам) сложилась в результате объединения усилий специалистов в классической механике, теории механизмов и машин, теории автоматического, а затем компьютерного управления, технической кибернетики, приводам, сенсорам и сенсорным системам. Это отражено в основоположной литературе. В первую очередь следует упомянуть трехтомное издание под ред. К.В. Фролова и А.И. Воробьева, монографии М.Б. Игнатьева, А.И. Корендясева, Я.А. Шифрина, Е.И. Юревича, Д.Е. Охоцимского, Ф.Л. Черноусько, А.Е. Кобринского, П.Н. Белянина, М.З. Коловского, И.М. Макарова, Ю.Г. Мартыненко, В.Л. Жавнера, И.Б. Челпанова. К тематике данной диссертации ближе всего исследования по транспортным роботам, к числу которых относятся работы Е.А. Девянина, С.Ф. Бурдакова, Ю.Г. Мартыненко, В.Е. Павловского.

В течение длительного времени демонстрационные роботы для игр и развлечений создавались, пользовались успехом, но оставались вне научных исследований и были исключительно предметом изобретательства, инженерной и дизайнерской проработки. Однако для театральной сцены уже понадобились серьезные комплексные, в первую очередь теоретические исследования, поскольку большие масштабы объектов, специфические требования к их движениям означали новое качество. К тому же оказались необходимыми новые принципиальные, схемные и конструктивные решения, которые не встречались в традиционной робототехнике. Научная школа в области демонстрационной робототехники сложилась в СПбГПУ, здесь помимо основоположных работ А.Н. Волкова следует упомянуть кандидатские диссертации и статьи И.С. Знаменского, Е.Р. Урмакшиновой, П.В. Смородова.

Змееподобные или змеевидные роботы (*snake-robots*) относятся к числу новых для демонстрационной робототехники объектов, часто их не относят к числу демонстрационных, а декларируются намерения решать с помощью их сложные утилитарные задачи, но о практическом применении их ничего неизвестно, они явно находятся на стадии демонстрационных разработок. При этом ввиду малости размеров макетов не возникало серьезных трудностей с конструированием. Спецификой демонстрационных роботов в данной диссертации являются большие масштабы. Предполагаемые параметры таковы: общая длина 5 . . . 150 м, длина на период по дуге 1. . . 15 м, число волн (периодов) по длине 4. . 10, амплитуда попереч-

ных колебаний до 3 м, частота колебаний (волн) 0,05 . . 0,3 Гц, суммарная мощность приводов до 50 кВт.

Применительно к рассматриваемым в этой диссертации большим змееподобным демонстрационным роботам размерами в десятки метров и более, а также к рассматриваемым условиям размещения (сцена театра, открытое пространство) должны решаться специфические задачи подвешивания и удерживания на высоте или движений на поверхности при воспроизведении требуемых изменениях формы, автоматического управления такими движениями и т.п. Нужно решать целый комплекс вопросов, включая выбор форм изгиба, выразительных и приспособленных для воспроизведения, задание движений, обоснование принципов подвешивания, выбор конструктивных параметров многозвенных механизмов, встраивания и пристраивания приводов и их программирования.

Вследствие этого тема диссертации, посвященной научной проблематике, которая является основой при создании больших змееподобных демонстрационных роботов, представляется актуальной.

Целью диссертации является разработка принципов построения конструкций, задания форм изгиба и управления движением больших змееподобных демонстрационных роботов, предназначенных для театральных сцен и празднеств на открытых площадках и способных воспроизводить волновые движения различного вида.

Для достижения указанной цели должны быть решены следующие **основные задачи:**

- сбор, систематизация и обобщение накопленного опыта по анализу геометрии и кинематики движения живых змей, по раскрытию механизмов их взаимодействию с грунтом и построения математических моделей их перемещения;

- анализ опыта создания конструкций и программирования движений малых змееподобных роботов при различных устройствах движителей;

- обоснование выбора и выбор такой типовой формы изгибания змееподобного робота, при которой обеспечивается получение широкого многообразия выразительных конфигураций при простоте соотношений между основными геометрическими параметрами;

- построение и исследование форм и фаз изгибания и кинематики движения змееподобного робота при стоячей и бегущей волне;

- формулирование требований к жесткости на изгиб и формулирование требований к системе подвешивания змееподобного робота, исходя из возможностей воспроизведения требуемых форм и законов движения;

- исследование змееподобного робота, построенного в виде цепочки соединенных колесных модулей, анализ кинематической устойчивости и возможностей воспроизведения типовой программной траектории;

- обоснование возможностей построения змееподобного робота в виде цепочки шарнирно соединенных газонаполненных баллонов, в том числе разработка методов повышения жесткости звеньев при использовании систем натянутых тросов;

- обоснование возможностей использования релейных законов управления приводами при формировании предложенных форм изгиба и при волновом движении .

Методы исследования. Геометрические, кинематические и силовые характеристики исследовались с использованием методов аналитической геометрии, теории механизмов и машин, теоретической и аналитической механики. При составлении программ были использованы пакеты математических вычислений *Maple* и *MathCAD*.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- при создании конструкций больших змееподобных демонстрационных роботов необходимо использовать наблюдения за формами изгибания и движений, но не имеет смысла пытаться копировать физику их движений;

- в качестве базовой конфигурации при всех способах построения конструкций целесообразно выбрать волнообразную форму, получающуюся сопряжением дуг окружностей одинакового радиуса, при этом значительно упрощаются соотношения между геометрическими параметрами, законы и системы управления приводами;

- для указанных применений больших демонстрационных змееподобных роботов для театра основными являются три варианта задания форм, удерживания в определенных положениях и задания движений: подвешивание на тросах с управляемыми лебедками, соединение цепью модулей на колесных шасси и шарнирное соединение газонаполненных оболочек;

- возможно создание конструкций больших змееподобных демонстрационных роботов на газонаполненных баллонах, создающих подъемную силу, при этом целесообразно использовать систему тросов, способную при малой массе обеспечивать жесткость модулей.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- обосновано применение кусочно-кругового представления с аргументом в виде длины дуги для описания геометрии средней линии сечений змееподобного робота при большом многообразии конфигураций;

- проведено исследование форм и фаз изгиба и кинематики движения змееподобного робота при стоячей и бегущей волне, сформулированы требования к количеству подвесов;

- проведено исследование геометрии и кинематики змееподобного робота при перемещении и изменении формы в режимах стоячей и бегущей волны, выявлены критические параметры изменения формы;

- сформулированы требования к жесткости на изгиб и сформулированы требования к системе подвешивания змееподобного робота, исходя из возможностей воспроизведения требуемых форм и законов движения;

- проведено исследование змееподобного робота, построенного в виде цепочки соединенных колесных модулей, сформулированы требования кинематической устойчивости и возможности воспроизведения типовой программной траектории;

- обоснована возможность использования релейных законов управления приводами при формировании предложенных форм изгиба и при волновом движении.

- обоснована возможность выполнения различных движений змееподобного робота на газонаполненных баллонах при управлении длинами тросов;

Практическая ценность диссертации заключается в том, что в ней определены перспективы значительного расширения типажа больших демонстрационных роботов и определены пути практической реализации в следующих вариантах:

- подвешивание осуществляется на тросах управляемой длины, изменения формы – с помощью программно управляемых лебедок на поступательно перемещающейся траверсе;

- цепочка модулей на колесных шасси перемещается по горизонтальной плоскости, изменения формы, при правильном выборе параметров волны, получаются естественным образом вследствие специфики кинематических связей;
- цепочка газонаполненных оболочек, создающих подъемные силы, изменения формы осуществляется тросами с помощью управляемых лебедок.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались на ряде научно-технических конференций в Иркутске, на семинаре кафедры «Автоматы» СПбГПУ а также на международной научно-технической конференции. По результатам диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Список использованной литературы содержит 105 наименований. Общий объем диссертации 164 страниц, в тексте имеется 68 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 начинается с аналитического обзора теоретических работ по исследованию механики ползания змей, среди них выделяются работы Ф.Л. Черноусько, В.Ф. Журавлева, А.И. Добролюбова, Д. Ну. Кратко обсуждаются гипотезы об анизотропии трения, о целенаправленных изменениях по длине давления на опорную поверхность и др. Затем приводятся данные о реализации в макетах, экспериментальных образцах. Это разработки робота-змеи ACM-R5 японской фирмой Хироэ (*Hirose Fukushima Robotics Laboratory*), Г.Миллера (G.Miller) робота *OmniTread* университета штата Мичиган, разработки университетов штата Вирджиния и Джона Гопкинса, а также NASA (США), Национального университета науки и оборонных технологий Китая. Известно о целевых разработках в Японии (роботы-змеи ACM-R5 и Kohga), Норвегии (робот Anna Konda норвежского фонда научных и промышленных исследований *SINTEF*) и

разработке военного назначения в Израиле. В России известна разработки робота «Змеелок» в ЦНИИ РТК (С-Петербург). Обращается внимание на то, что очень часто декларируются намерения использовать подобные роботы для решения трудных задач (например, разведки, перемещений по развалинам и пр.), но реально они способны перемещаться только по гладкому полу, не проработаны средства придания свойств адаптивности. Из сопоставительного обзора следует, что механика движения живых змеев представляет познавательный интерес, но физика их движений не сможет быть использована для построения движителей змееподобных роботов.

К числу сложных, но развлекательных по назначению относится домашний, заявленный как многофункциональный, но по существу развлекательный робот-змея *RoboBoa*. При создании больших змееподобных роботов следует учитывать традиции Китая в демонстрировании больших фигур драконов, которые до сих пор движутся только вручную, поднимается и извиваются на шестах. В конце главы формулируются основные задачи исследования в диссертации и особенности, связанные с большими размерами.. змееподобные, роботы

Вторая глава посвящена описанию геометрии и кинематики движения змееподобных демонстрационных роботов. Формулируются общие требования к выбору базовых конфигураций, которые представимы в виде гладких периодических функций. Рассматриваются исключительно плоские формы, предполагается, что изгибание может происходить как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Обосновывается целесообразность аналитического представления форм в параметрическом виде, когда в качестве параметра выбирается дуга по средней линии сечений.

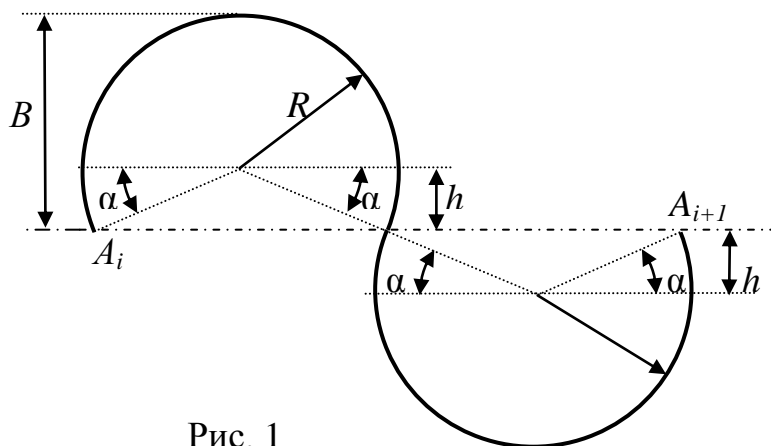


Рис. 1

Предложено выбрать волнообразную форму средней линии сечений, кусочно-круговой, которая получается сопряжением дуг окружностей одинакового радиуса (один период показан на рис.1). При таком способе задания, с одной стороны, можно получать эффектные формы со сближением соседних фрагментов (что производит сильное впечатление при наблюдении настоящих змей), а с другой — получать достаточно простые аналитические зависимости между всеми основными параметрами, между длиной S_0 дуги на периоде радиусом R , углом α и длиной L по средней линии сечений, поперечным размахом B (т.е. габаритным размером) и смещением h центров круговых участков. Эти уравнения имеют вид:

$$S_0 = 2R(\pi + 2\alpha); \quad L = 4R \cos \alpha; \quad h = R \sin \alpha; \quad B = 2R(1 + \sin \alpha)$$

Графики зависимостей между некоторыми из этих параметров представлены на рис. 2.

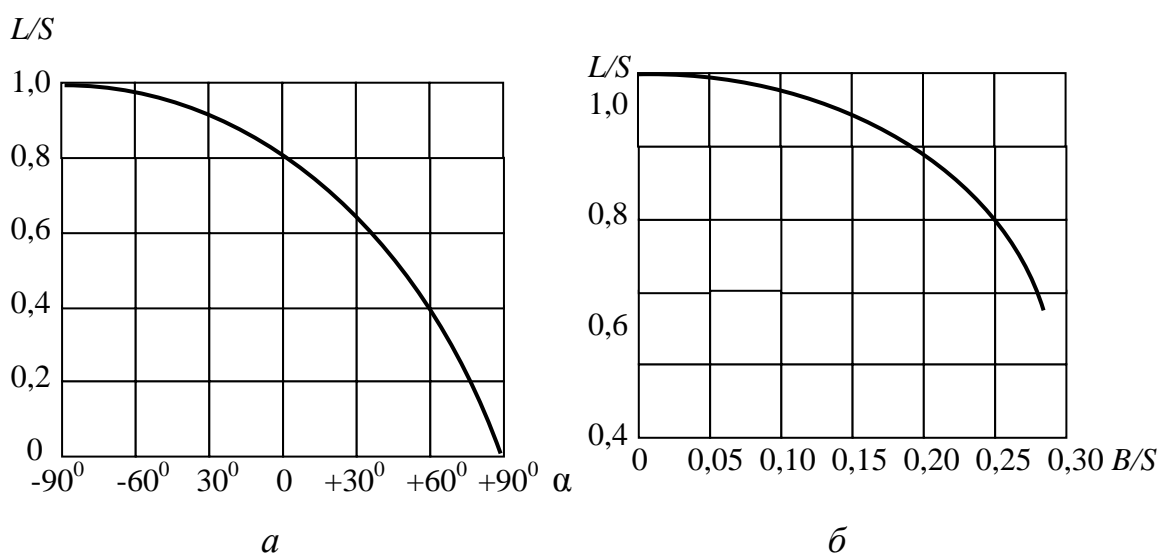


Рис.2

В процессе движения, в кинематике принимается, что способ формирования кривой на всех фазах остается неизменным, но изменяются указанные параметры, причем естественно считать, что S_0 сохраняет свое постоянное значение, а параметр h является задаваемой периодической функцией времени. Показано, что при выразительности движений законы управления приводами могут быть достаточно простыми, релейными, поскольку локальная кривизна может принимать только два значения. Наиболее подробно рассматривается задание движений в вертикальной плоскости в виде стоячей и различных вариантов бегущей волны. Из рассмотренных в главе 2 законов изменения формы подробнее всего рассмотрены два. На рис. 3 а

изображены фазы движения, когда змея ползет по неподвижной волнообразной траектории (показана пунктиром), а на рис. 3 б — когда змея неподвижна, а волна бежит от головы к хвосту. Наложением поступательного движения на волновое движение, изображенное на рис. 3 б, можно получать различные варианты, все они имеют право на реализацию. Применительно к большим змееподобным демонстрационным роботам могут представлять интерес любые соотношения между скоростями бега волны от головы к хвосту и поступательного движения, в том числе и соотношения не наблюдаемые в живой природе.

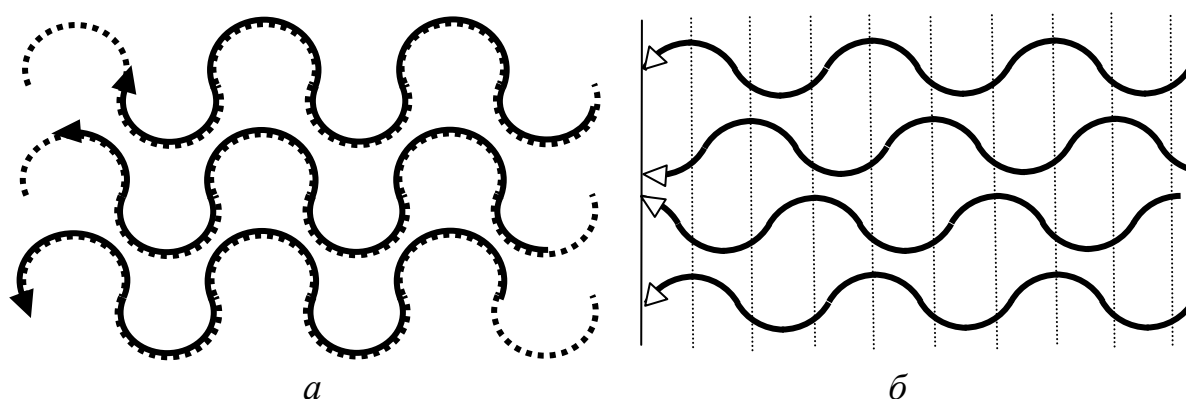


Рис.3

Для различных случаев сочетания движений извивания с поступательным движением, получены выражения для скоростей точек средней линии сечений.

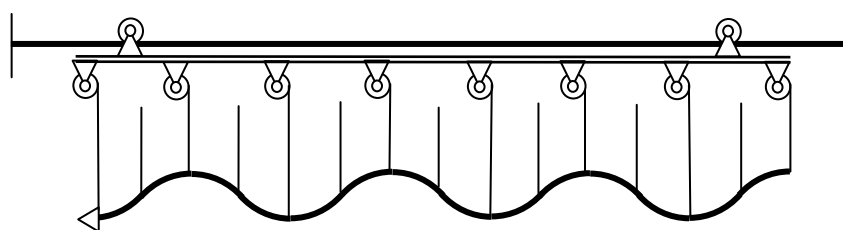


Рис. 4

Схема подвешивания на тросах, длины которых изменяются лебедками с программным управлением, закрепленным на подвижной балке, представлена на рис. 4. В главе обосновываются рекомендации по выбору числа лебедок, которые вытекают из требований к точности воспроизведения форм. Для получения качественно правильной картины должно быть не менее четырех тросов на период. На рис. 4 лебедки показаны через одну.

Форма изгибания упругой конструкции змея на тросах должна быть

естественной. Для определения зависимостей форм изгибания от распределенной жесткости была аналитически решена задача определения больших перемещений точек средней линии сечений подвешенной конструкции под действием распределенных сил веса. Расчетная схема изображена на рис. 5. Ниже приведена нелинейная система дифференциальных уравнений изгиба при больших перемещениях.

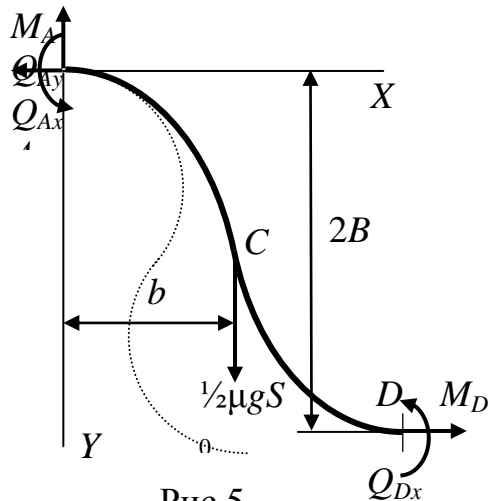


Рис.5

$$\begin{aligned} dQ_x/ds &= q \sin \varphi \\ dQ_y/ds &= q \cos \varphi \\ dM/ds &= Q_x \sin \varphi - Q_y \cos \varphi \\ Dd\varphi/ds &= M \\ dx/ds - \cos \varphi &= 0 \\ dy/ds - \sin \varphi &= 0 \end{aligned}$$

Здесь M – изгибающий момент, Q – сила в сечении, D – приведенная жесткость на изгиб. Показано, что такие формы крутого изгибания, как показано пунктиром, могут быть реализованы только при приложении горизонтальной силы.

Результаты расчетов прогибов при различных значениях безразмерного параметра D относительной жесткости представлены на рис. 6 в виде семейства графиков.

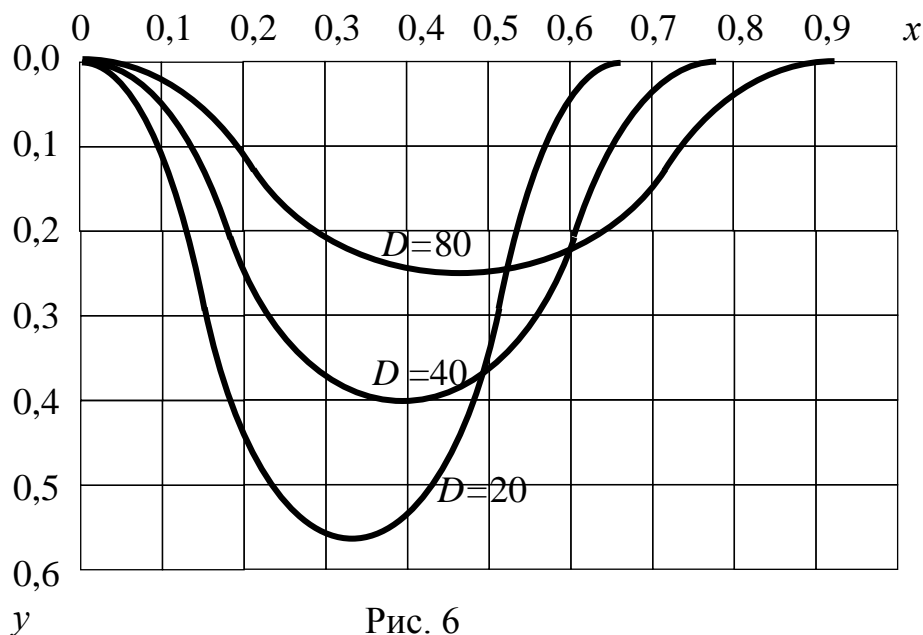


Рис. 6

Исходя из анализа полученного решения, формулируются требования к изгибной упругости конструкции, оцениваются изменения форм на периодах в зависимости от ее параметров.

Проведен анализ распределения скоростей точек по длине при типовых движениях в виде стоячей и бегущей волн. Обсуждаются возможности усложнения форм изгибания, например, для сцены «броска вперед» змеи. Во всех случаях предполагается, что движения являются медленными, формы изгиба близки к статическим, так что расчеты динамики можно считать проверочными. При подвешивании могут проявляться маятниковые колебания, однако, с одной стороны, нет данных для оценки сил, вызывающих эти колебания, а с другой стороны, нет оснований для ограничения их амплитуд.

Третья глава посвящена рассмотрению конструкций змееподобных роботов в виде цепей шарнирно соединенных одинаковых модулей на колесных шасси. Конструкция приспособлена для воспроизведения движений по волновой траектории на горизонтальной плоскости, скорее всего, на сцене театра. Предполагается, что колеса являются поворотными у головного, ведущего (приводного) модуля и, может быть, еще у некоторых, но у их большинства положение осей фиксировано. При этом в случае отсутствия проскальзывания направление скорости центра любого модуля определяется положением шарнира ведущего модуля.

Выбором числа модулей определяются возможности воспроизведения определенного числа волн, на один период требуется не менее шести модулей. Предполагается, что для воспроизведения гладкой кривой используется общий для всех модулей гибкий кожух. Цепочка соединенных модулей изображена на рис. 7 первый, ведущий модуль является трехколесным, с одним поворотным колесом, и он не дает опрокидываться всем остальным, которые могут быть одноколесными.

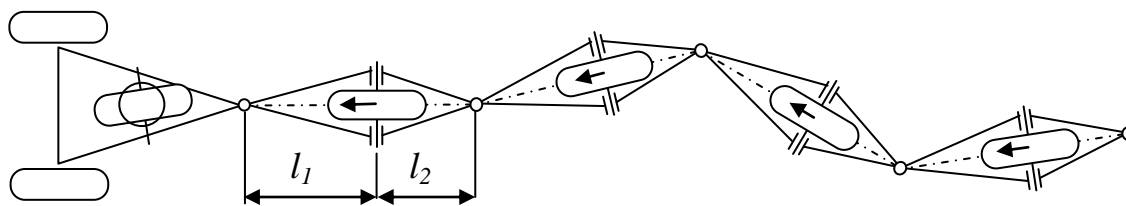


Рис. 7

Требуется, чтобы при задании волнообразного или более сложного движении головного модуля последующие модули воспроизводили траекторию его движения. Формулируются и решаются задачи определения воспроизводимости модулями волнообразных траекторий без проскальзывания колес. При этом определяющим является отношение l_2/l_1 длин от центра до шарниров. Выявлена связь свойства воспроизводимости кусочно-круговых траекторий с параметром l_2/l_1 , который является определяющим. Показано, что свойство воспроизводимости этих траекторий связано с кинематической устойчивостью. Приводятся результаты численных расчетов кинематики движений при устойчивости и неустойчивости. Типовые изменения круговой траектории показаны на рис. 8

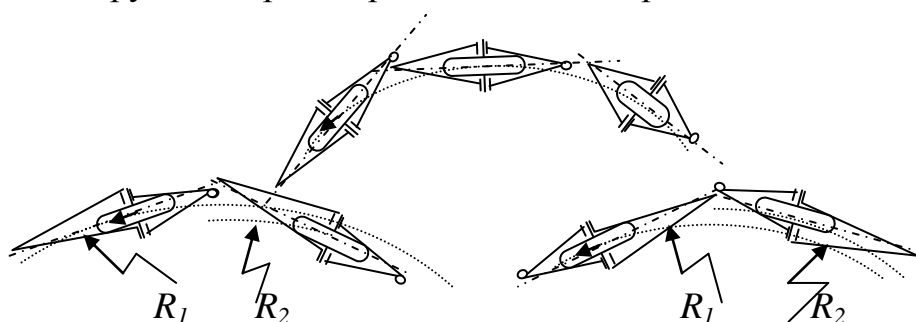


Рис. 8

При $l_2/l_1 > 1$ радиус увеличивается, при $l_2/l_1 < 1$ уменьшаются. Только при $l_2/l_1 = 1$ траектория воспроизводится без изменений. Свойство кинематической устойчивости иллюстрируется на примере движения по прямой траектории, когда задается начальные отклонения по углу α_1 и в соответствии с этим изменяются последующие углы α_i (рис. 9).

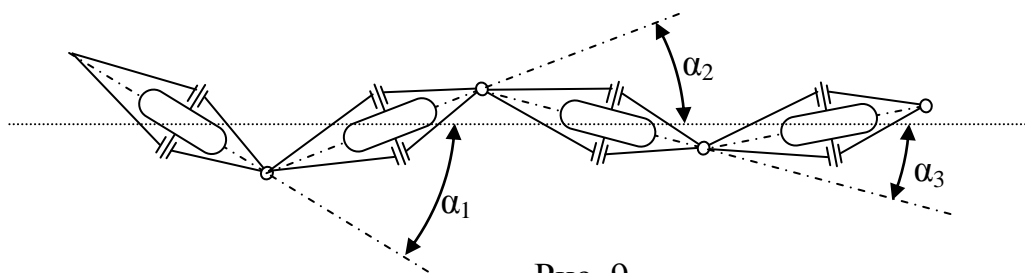


Рис. 9

Преимущество задания базовой траектории в виде сопряжения дуг окружностей заключается в том, что на каждой окружности модули повторяют движение головного без проскальзывания, и трудности возникают только в малых зонах вблизи точек сопряжения. Возможности достаточно точного воспроизведения цепочкой сцепленных модулей движения голов-

ного модуля по неподвижной волнообразной кривой без бокового проскальзывания экспериментально проверены на специально изготовленном макете.

Четвертая глава посвящена исследованию возможностей построения больших змееподобных роботов на надувных оболочках обоснованию и предложений. При этом можно опираться на накопленный опыт. Сугубо развлекательной направленностью характеризуются антропоморфные и зооморфные надувные фигуры, спонтанно и динамично изменяющие свои формы так называемые аэромены, основу которых составляют проточные оболочки; однако их хаотичные движения неуправляемы. В главе основное внимание обращено на анализ возможностей построения больших змееподобных роботов на надувных оболочках, наполненных гелием и создающим подъемные силы, а управление движениями осуществляется тросами с помощью лебедок, установленных неподвижно на земле или на движущемся основании. Известны намерения крупных стран юго-восточной Азии создать на этом принципе извивающиеся фигуры драконов размерами до 100-200 метров. Общий принцип иллюстрирует рис. 10. Предполагается, что конструкция будет строиться на последовательном шарнирном соединении тонкостенных баллонов, ужесточенных стальными каркасами, причем изменения конфигураций производится поворотами в шарнирах.

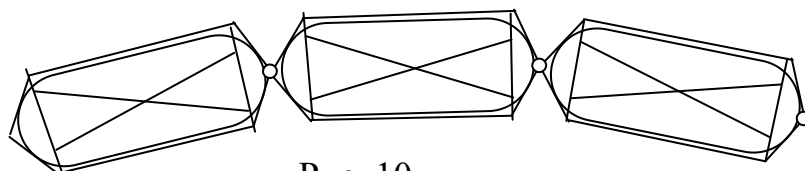


Рис. 10

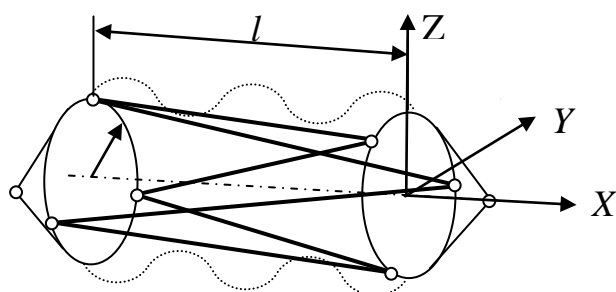


Рис. 11

Для подобных конструкций актуальна минимизация веса. В данной работе предлагается новый способ обеспечения жесткости на изгиб звеньев, выполненных в виде вытянутых надувных газонаполненных оболочек, когда жесткость создается системой шести натянутых тросов.

Получены условия, при которых все тросы натянуты и этим обеспечивается жесткость звена. Из этих условий находятся допустимые нагрузки.

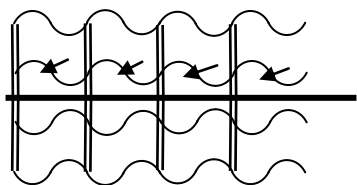


Рис. 12

Проработана также новая схема распределенного секционированного пневмопривода по всей длине конструкции, не разделенной на модули (рис.12), когда давление может независимо подаваться в полости, и тогда соответствующий участок изменяет кривизну.

Показано, что при изгибании змея по формам, образуемым сопряжением дуг окружностей значительно упрощаются законы управления конфигурацией: в определенные моменты времени, при прохождении средней линии необходимо производить включение приводов в ту или иную сторону, чтобы изменить знак кривизны. Таким образом, роль приводов на участках кривизны одного знака сводится только к удерживанию фиксированного относительного положения (например, с помощью упоров), а включаются и работают только те приводы, секции которых проходят среднюю линию.

В порядке экспериментальной проверки ряда положений диссертации на натурном макете, было проверено и подтверждено свойство воспроизведения при движении всеми шарнирно соединенными модулями на колесных шасси, образующими цепочку, волнообразной траектории рассматриваемого типа (в виде сопряжения дуг окружностей на горизонтальной плоскости). Было оценено влияние соотношения расстояния от центров до шарниров на свойства кинематической устойчивости и неустойчивости.

Также была осуществлена компьютерная анимация. При использовании которой, наблюдая движения на экране монитора, можно изменять параметры траекторий с помощью параметров (радиусом R , поперечным размахом B). При просмотре движений удобно находить зрительно наиболее выигрышные конфигурации и подбирать параметры движений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертации можно сформулировать следующим образом.

1. В индустрии развлечений, ориентированной на демонстрацию на сценах театров и во время празднеств на открытом воздухе, востребованы большие змееподобные демонстрационные роботы; для них первостепенным является ориентация на зрительное восприятие; для их создания должны быть выполнены серьезные научные исследования.

2. Из аналитического обзора научных исследований по анализу геометрии и кинематики движения змей следует, что разработаны вполне убедительные, доведенные до математических моделей теории их движения (ползания) на основе взаимодействия с грунтом, однако материалы о реализованных работающих макетах показывают, что в змееподобных роботах используются иные решения, традиционные для техники.

3. На начальных этапах создания змееподобных демонстрационных роботов следует найти наиболее подходящее формализованное представление форм изгибания средней линии сечений; как базовую целесообразно использовать периодическую форму изгиба в виде сопряжения круговых участков, при этом параметром является длина дуги. При этом обеспечивается широкое многообразие выразительных конфигураций при простоте соотношений между основными геометрическими параметрами

4. Для больших змееподобных роботов целесообразно воспроизведение стоячей или бегущей волны с возможным наложением поступательного движения. В частном случае может быть получено движение всех точек по одной и той же траектории, наиболее естественное для движения змеи в природных условиях. Построены и исследованы формы изгибания и кинематики движения змееподобного робота по фазам при стоячей и бегущей волне

5. Движения в виде стоячей или бегущей волны при ограничениях на амплитуды реализуемы при подвешивании гибкой конструкции на тросах при координированном управлении вертикальными движениями с помощью лебедок. Правдоподобие формы провисания оценивается по результатам полученного решения задачи о форме прогиба стержня при больших перемещениях.

6. Для змееподобного робота, механизм которого построен как цепь шарнирно соединенных колесных модулей, важнейшим является свойство воспроизведения программной траектории всеми модулями без проскаль-

звания колес. При этом определяющим является отношение расстояний до шарниров.

7. Показано, что большие змееподобные роботы можно строить на цепочках звеньев в виде шарнирно соединенных газонаполненных баллонов, при этом управление с помощью тросов осуществляется лебедками на земле или на подвижной платформе. Показано, что значительное облегчение конструкции при высокой жесткости звеньев может быть достигнуто при использовании системы натянутых тросов.

8. Применительно к изгибанию по закону бегущей волны по кривой, получаемой сопряжением дуг окружностей для приводов, задающих углы относительного поворота шарнирно соединенных звеньев, возможно и целесообразно использовать релейные законы управления при позиционировании по упорам.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кочетков А.В., Челпанов И.Б., Будько И.А., Гуань Цзянь Транспортные промышленные роботы, перемещающиеся по сооружениям и конструкциям // Автоматизация и современные технологии. 1997, № 11, стр.105-110
2. Будько И.А., Задачи механики сценических роботов //Экстремальная робототехника «Труды XXI Международной научно-технической конференции – Санкт-Петербург издательство «Политехника-сервис», 2010 – 494с.», стр. 139-147
3. Будько И.А., Волков А.Н., Челпанов И.Б. Задачи механики змееподобных роботов // Теория Механизмов и Машин 2010г. №1(15). Том 8 - Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, СПбГПУ, кафедра ТММ, редакция журнала "Теория механизмов и машин", стр.89-97
4. Будько И.А., Волков А.Н., Челпанов И.Б. Методы задания геометрических форм змееподобных роботов // Материалы VII международной научно-практической конференции «Новости научного прогресса», 2011г., том 9. Технологии. Здания и архитектура. Математика. Физика. Современные информационные технологии. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД -104 стр., стр 47-51.
5. Будько И.А., Волков А.Н., Челпанов И.Б. Задачи механики змееподобных роботов //Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «наука и образование» №3(130), 2011г., стр.91-97