

На правах рукописи

ЛЕ ДЫК ТХИНЬ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ С НОВЫМИ ТИПАМИ
ПНЕВМОПРИВОДОВ И ВАКУУМНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Диссертация выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
засл. деятель науки РФ Челпанов Игорь Борисович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Колпашников Сергей Николаевич
кандидат технических наук, Павлов Евгений Евгеньевич

Ведущая организация: «Эс-эм-си – пневматик»

Защита состоится 18 февраля 2003 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, 1-й учебный корпус, ауд.41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан « _____ » 2003.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Пневмопривод и вакуумные устройства всегда занимали и занимают в настоящее время важное место в робототехнике. Большинство промышленных роботов с цикловым программным управлением и сбалансированных манипуляторов (с автоматическим уравниванием груза) имеет в качестве двигателей по степеням свободы пневмоцилиндры. Но даже в тех случаях, когда основные приводы по степеням подвижности не являются пневматическими, для некоторых механизмов (например, схватов) пневмодвигатели оказываются практически незаменимыми. Кроме того в немалом числе разнообразных рабочих органов используется или сжатый воздух, или вакуум. Особое внимание к пневмоприводам в робототехнике выразилось, в частности, в том, что в этой области было утверждено и действует в России большое число государственных стандартов.

Важными достоинствами пневмопривода всегда считалась большая удельная мощность, возможность работы от центральной пневмомагистрали, нечувствительность к таким факторам, как большие перепады температур, а при действующей системе подготовки воздуха - загрязнение среды. В некоторых отраслях техники важны свойства пожаробезопасности (при работе во взрывоопасных средах), санитарной безопасности (для предприятий пищевой промышленности), экологичности. К числу отрицательных качеств пневмопривода обычно относят сжимаемость воздуха, что значительно осложняет управление по скорости и практически исключает использование в работах с контурным управлением.

Оборудование классического пневмопривода самой широкой номенклатуры выпускается рядом ведущих фирм ведущих промышленных стран на протяжении десятилетий. Однако в последнее десятилетие появились новые

типы пневмопривода. К их числу относятся бесштоковые пневмоцилиндры и транспортные системы, которые можно рассматривать, как транспортные роботы, а также пневмомускулы, которые при определенных условиях могут заменять пневмоцилиндры. Подобные устройства были изобретены достаточно давно. Они существовали в макетах. Но пригодные для эксплуатации конструкции на основе новых технических решений и материалов были созданы только в последние годы, после чего некоторые ведущие фирмы стали выпускать их серийно. Серийный выпуск сопровождается рекомендациями по выбору и применению. Однако теория подобных пневматических устройств новых типов до настоящего времени не была разработана.

С другой стороны, в рабочих органах, а именно, в вакуумных захватных устройствах роботов традиционно находил применение низкий вакуум (порядка нескольких сотых МПа). В робототехнике имеются перспективы более широкого применения низковакуумных технологий, в том числе и в приводах, особенно тогда, когда устройства для создания вакуума просты или уже имеются в системе в связи с другими потребностями. Наконец, в последние годы вакуумные устройства стали находить применение в качестве рабочих органов контрольно-измерительных роботов. К их числу относятся вакуумные течеискатели. Оснащенные ими ПР выполняют роль контрольных автоматов, предназначенных для контроля герметичности и поиска микротрещин вакуумных камер путем сканирования их поверхностей или швов. В этой области оказалась необходимой доработка теории, их конструкций и элементов, а также выполнение экспериментальных исследований. Материал данной диссертации, в которой приводятся результаты проработки теории новых типов пневмоприводов и вакуумных устройств объединен идей нетрадиционного (применительно к новым конструкциям и устройствам) и эффективного использования в робототехнике воздуха как рабо-

чего тела, что позволяет расширять возможности и области применения промышленных роботов. В силу всего сказанного выше тема данной диссертации представляется актуальной.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка инженерной теории и научных основ методик расчета новых пневматических и вакуумных устройств вспомогательных и специальных промышленных роботов.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены следующие **основные задачи исследования:**

- систематизация необходимых сведений по технической теории пневмоприводов,

- получение и обоснование рекомендаций по выбору принципиальных и схемных решений пневмоприводов захватных устройств;

- построение математических моделей и теоретическое исследование пневматических бесштоковых транспортных роботов и транспортных систем с магнитной связью между поршнем и кареткой;

- построение математических моделей и аналитическое исследование характеристик пневмомускулов, построенных на упругих армированных оболочках;

- доработка теории вакуумных захватных устройств, их схемных и конструктивных решений, а также источников вакуума для них;

- совершенствование течеискателей применительно к их использованию как рабочих органов контрольных промышленных роботов.

На защиту выносятся следующие **основные положения:**

- методика синтеза пневмоприводов схватов промышленных роботов ;

- рекомендации по выбору параметров вакуумных захватных устройств промышленных роботов, обеспечивающих базирование захватываемых объектов различных размеров;

- рекомендации по выбору параметров и применению бесштоковых пневматических транспортирующих систем;

- методика расчета и проектирования портативных магниторазрядных течеискателей высокой чувствительности.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем.

- обоснована последовательность выполнения статических расчетов при проектировании пневмоприводов для схватов роботов, при которой сначала определяется требуемая энергия за один ход, а затем подбирается механизм передачи;

- построена математическая модель пневмотранспортной системы, в которой учитывается увеличение объема рабочей полости трубопровода и вследствие этого значительное снижение низшей собственной частоты;

- построена математическая модель пневмомускула, армированного ромбической сеткой корда и определены его механические характеристики;

- разработаны способы введения в вакуумные захватные устройства новых элементов, обеспечивающих базирование переносимых объектов по заданным координатам;

- разработан метод модульного построения вакуумных малогабаритных блоков измерения портативных течеискателей;

- построена математическая модель течеискателя, позволяющая рассчитывать его чувствительность по парциальному давлению гелия в атмосфере.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждена корректным использованием ма-

тематического аппарата при построении математических моделей и проведении расчетов, а по последнему разделу – хорошим соответствием результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований.

Методы исследования. При разработке математических моделей пневмоприводов различных типов и проведении расчетов использовались методы общей механики, теории колебаний, механики газов, теории механизмов и вычислительной математики, а при разработке модели течеискателя – экспериментальные методы исследования вакуумных систем.

Практическая ценность работы заключается в разработке методик выбора принципиальных, схемных и конструктивных решений новых типов пневмоприводов и пневмотранспортных систем, а также методики проектирования и испытания течеискателей для контрольных роботов.

Реализация результатов исследований. По результатам проведенных исследований, представленных в четвертой главе, разработаны конструкции двух вариантов вакуумных модулей и малогабаритных блоков измерения портативного течеискателя. Разработан и изготовлен откачной пост безмасляной откачки на сорбционных насосах, предназначенный для предварительной откачки и тренировки модели.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы представлены в двух статьях. Диссертация прошла апробацию на семинарах кафедры «Автоматы» СПбГПУ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы: 127 страниц, 47 иллюстраций. Список использованных литературных источников насчитывает 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основная цель и конкретные задачи, необходимые для достижения этой цели, приводится перечень основных положений, выносимых на защиту, дается краткий обзор содержания диссертации по главам. Констатируется, что для новых типов пневмоприводов и пневмотранспортных систем требуется разработка теоретических основ методики расчета и проектирования.

Основной материал диссертации разделен на четыре главы.

В первой главе значительное место уделяется сведениям по математической теории и методике анализа динамики пневмопривода. Приводятся системы дифференциальных уравнений динамики пневмодвигателей одностороннего и двустороннего действия. Выполнена серия численных расчетов динамических процессов для пневмоцилиндра. В главе в качестве основной рассматривается задача синтеза пневмопривода для схватов вспомогательных промышленных роботов. Отмечено, что для схвата время срабатывания определяется не по моменту времени приведения звеньев механизма в конечное положение, а по моменту достижения усилием захватывания требуемого значения. Численными расчетами показано, что при вариациях параметров время захватывания изменяется в узких пределах. Как первостепенная, выделяется задача синтеза статических характеристик схвата, который должен обеспечивать захватывание заданной совокупности объектов различных размеров заданными усилиями. Показано, что этим требованием однозначно определяется работа, совершаемая пневмоцилиндра за один рабочий ход, а следовательно, объем пневмоцилиндра. На основе системы полученных формул для задачи статики предложена и обоснована методика проектирования механизма схвата, которая предусматривает следующую последовательность этапов.

1. Определение поверхностей объектов, по которым осуществляется захватывание.
2. Выбор схемы базирования объекта в схвате.
3. Выбор числа, формы и кинематики перемещений рабочих элементов.
4. Расчет параметров рабочих элементов и определение минимально необходимого раскрытия схвата, необходимого для нормального протекания процесса захватывания.
5. Для совокупности объектов, которые необходимо захватывать и переносить, расчет соответствующих значений усилия захватывания.
6. Расчет параметров пневмоцилиндра.
7. Выбор схемы и параметров механизма схвата.

Проведен сопоставительный анализ двух десятков распространенных схем плоских механизмов схватов, выявлены преимущества и недостатки схем.

Во второй главе рассматриваются бесштоковые пневмоцилиндры и бесштоковые транспортные системы. Идея транспортирования по трубам с помощью сжатого воздуха в XIX веке была реализована в пневматической почте. Современные пневмотранспортные системы, которые с полным основанием можно относить к транспортным роботам, характеризуются тем, что поршень и каретка разделены, связь поршня, находящегося внутри цилиндра и перемещаемого сжатым воздухом, и каретки, перемещающейся по направляющим снаружи и предназначенной для перемещения объектов, осуществляется не через механическую связь, а бесконтактно, через их магнитное взаимодействие (рис. 1). Из наборов модулей с унифицированными стыковочными узлами можно формировать длинные трассы, имеющие как прямолинейные, так и криволинейные участки, обходить различные препятствия как сбоку, так и сверху; возможности таких систем проиллюстрированы в диссертации.

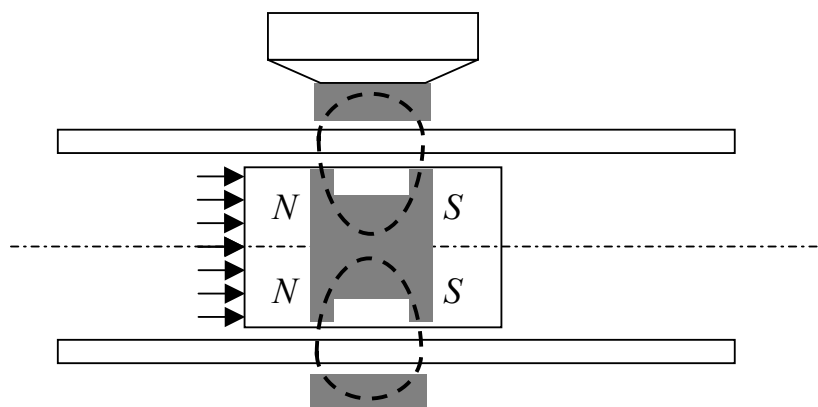


Рис. 1

Важным достоинством рассматриваемых пневмотранспортных систем является то, что оказывается возможным полностью герметизировать внутренние объемы всей пневмосистемы. В диссертации приводятся сведения о наборах модулей, выпускаемых японской фирмой SMC. Обращается внимание на то, что в подобных системах важно ограничение несущей способности, а также появление новой упругой степени подвижности и значительные изменения собственных частот вследствие изменения длины и, следовательно, объема полости трубопровода при движении. Описывается общая методика определения характеристики квазиупругой силы взаимодействия поршня и каретки. Построена математическая модель динамики с учетом упругой степени свободы, определены законы изменения собственных частот системы в процессе движения. Численным моделированием исследуются движения, получающиеся в механических системах рассматриваемого типа, формулируются рекомендации по выбору параметров.

В третьей главе рассматриваются пневмомускулы и вакуумные захватные устройства ПР. Рассматривается несколько вариантов конструкций двигателей, принцип действия которых на деформировании замкнутой упругой оболочки при повышении или понижении внутреннего давления. Пневмодвигатель одностороннего действия нового типа – пневмомускул - представ-

ляет собой цилиндрическую надувную армированную оболочку из легко деформируемого материала. Корд уложен по двум семействам винтовых линий, вращающихся в противоположные стороны (рис. 2 а). При такой укладке корда он однозначно определяет деформационные возможности, а именно, соотношение между изменениями длины и диаметра, поскольку его жесткость значительно превосходит жесткость оболочки. Ромбический элемент сетки корда в исходном и деформированном состоянии показан на рис. 2 б.

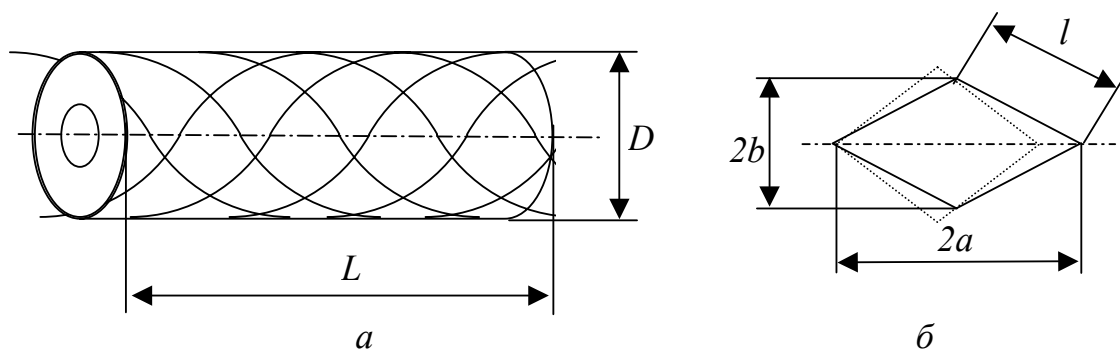


Рис. 2

В зависимости от углов ромбов, т.е. отношения размеров a и l при подаче давления длина пневмомускула может увеличиваться или уменьшаться. Получены условия сокращения или удлинения при подаче давления, построены механические характеристики (графики зависимости объема V и силы F от соотношения размеров ячеек сетки), представленные на рис. 3.

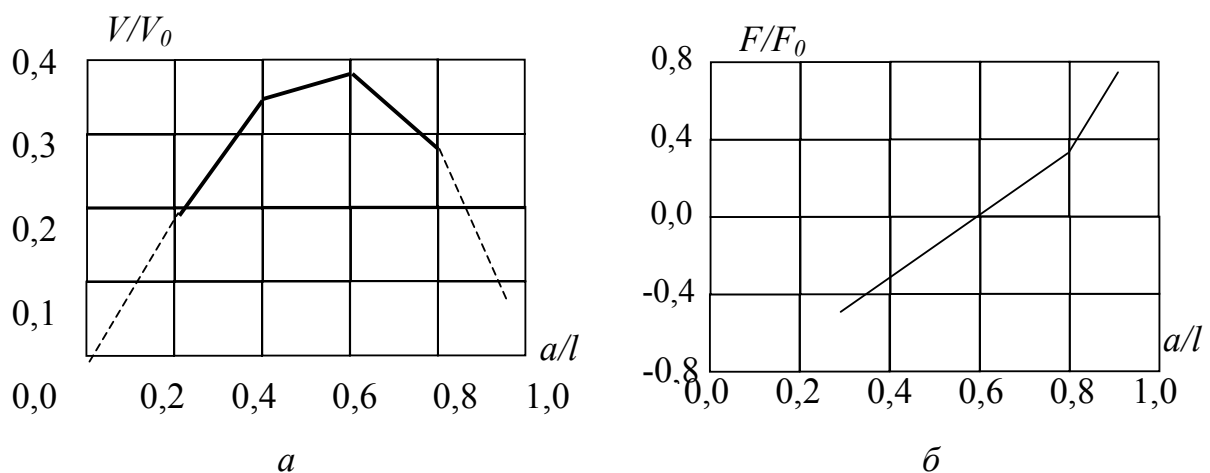


Рис. 3

Показано, что при малых значениях отношения a/l , т.е. в сжатом состоянии, пневмомускул создает толкающую, раздвигающую силу, а при больших - стягивающую. При удлинении пневмомускула развиваемое им усилие уменьшается. Это означает, что у пневмомускула, который при подаче давления работает в режиме сокращения, корд должен быть уложен с большим шагом. Получено выражение для силы F , создаваемой пневмомускулом, оно определяется из принципа возможных перемещений следующей формулой

$$F = - p dV/dL = - p dV/da (dL/da)^{-1} = - \pi^{-1} p n^2 (l^2 - 3a^2), \quad 0 < a < l.$$

Зависимость F/F_0 существенно нелинейна, однако в диапазоне изменения отношения a/l от 0,4 до 0,75 отклонения от линейности невелики, они не превышают 20 %. При значении $a = a^* = 3^{-1/2} l = 0,576 l$ и соответствующем значении $L = L^*$ сила обращается в нуль, для ненагруженного пневмомускула это положение равновесия при наличии любого давления внутри полости. Указанное значение отношения соответствует углу нити корда с направляющей (или осью цилиндра), равному $35,2^\circ$.

Получено выражение для жесткости пневмомускула, при постоянстве давления p (предполагается, что полость постоянно остается соединенной с магистралью)

$$C_0 = dF/dL = 1/2 m^{-1} F/da = 3(m \pi)^{-1} p n^2 a$$

В третьей главе также рассматриваются вакуумные хватные устройства, которые чаще всего используются для захватывания плоских деталей, основное внимание обращается на свойства базирования по некоторым координатам. В качестве примера комплектного выпуска вакуумных хватных устройств в главе произведен анализ серии *ZP* вакуумных присосок японской фирмы *SMC*. Показано, что функциональные возможности вакуумных хватных устройств могут быть значительно расширены, в частности, может

быть обеспечено базирование захватываемых объектов по нескольким координатам объектов с различной формой поверхностей. Предложены различные способы создания низкого вакуума, в том числе и нетрадиционными способами, с помощью сильфонов, деформируемых при выполнении основных программных движений.

Материал четвертой главы связан с одним из новых важных применений промышленных роботов – осуществлению контроля и периодических инспекций состояния трубопроводов, контроля герметичности и выявления микротрещин – источников протечек. В этих случаях роль чувствительного элемента играет течеискатель, а механизм робота обеспечивает его перемещение по местам, где с наибольшей вероятностью могут проявляться протечки (например, по местам разъемных или неразъемных соединений, вдоль сварных швов и т.п.) или реализовывать сканирование больших поверхностей. Кроме того, если робот имеет свою вакуумную систему (для вакуумных схватов, специальных вакуумных двигателей), то для самих вспомогательных промышленных роботов актуальна задача обеспечения герметичности объемов трубопроводов и других элементов. После сборки роботов, в процессе наладки и при периодическом контроле необходим поиск возможных мест протечек, для этого также используются течеискатели. Автор участвовал в разработке модели нового течеискателя под руководством д.т.н.проф. Розанова. Вакуумная схема для ее испытания показана на рис 4.

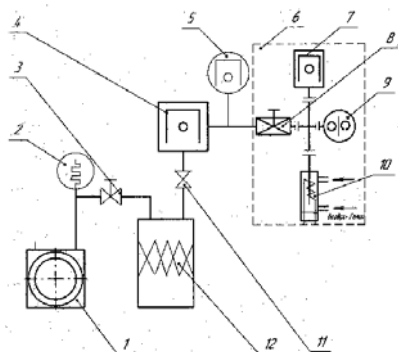


Рис.4. Вакуумная схема откачного поста.

- 1- форвакуумный насос НВР-5DM;
- 2- манометрический преобразователь МТ-6;
- 3- клапан
- 4- насос НОРД-25

- 5- манометрический преобразователь ПММ-32;
- 6- печь (300⁰С)
- 7- насос магнитоэлектрический
- 8- прогреваемый клапан
- 9- манометрический преобразователь ПМИ-10-2
- 10 гелиевая течь
- 11 клапан
- 12 адсорбционный насос АФИНА-5

В данной главе представлены результаты разработки экспериментального образца магнитоэлектрического течеискателя с селективной кварцевой мембраной, который приспособлен для установки на специальных контрольно-измерительных роботах, предназначенных для контроля герметичности в тех случаях, когда выполнение работ по обследованию объектов рабочими исключено или нецелесообразно. В четвертой главе излагается разработанная методика расчета магнитоэлектрического течеискателя, предназначенного для использования в качестве чувствительного датчика контрольного робота, предназначенного для контроля герметичности. Особенность данного способа состоит в применении кварцевой селективной мембраны, пропускающей пробный газ – гелий. Магнитоэлектрические насосы имеют быстроту действия по азоту в 10 раз больше, чем по гелию и быстроту действия по водороду в 20 большую, чем для гелия. Принцип действия основан на том, что испытываемый объект наполняется смесью газов, в которой присутствует пробный газ – гелий, до давления выше атмосферного. Вытекающий через течи гелий через кварцевую селективную мембрану попадает в насос и приводит к увеличению разрядного тока.

В связи с малыми размерами датчика он может служить основой для создания переносного прибора. Порог чувствительности является важней-

шим показателем течеискателя. При участии автора была разработана методика расчетного определения порога чувствительности. На основе созданного комплекса был выполнен цикл экспериментальных исследований. Был использован магниторазрядный насос диодный двухячеистый с быстротой откачки по гелию 0,03 л/с при анодном напряжении 3 кВ и магнитном поле 0,1 Тл имеет $a = 10^{-2}$ А/Па. Для него методом постоянного объема были измерены быстроты откачки. Мембрана избирательной проницаемости изолирует вакуумированный объем от внешней среды. При появлении во внешней среде газа (гелий), способного проникать через мембрану, повышается давление во внутренней полости магниторазрядного насоса, что приводит к увеличению регистрируемого разрядного тока. В качестве мембраны предложено использовать кварцевые SiO₂ или Br-Si стекла. При испытаниях было поставлено целью определить проводимость двух имеющихся мембран по гелию и по воздуху при нормальных условиях. Важнейшим этапом было определение порога чувствительности, который представляет собой минимальное давление или поток пробного газа, который может быть зафиксирован течеискателем. Перед определением порога чувствительности проводится градуировка капиллярной течи по потоку гелия на масляной бюретке. Через капиллярную течь из подушки под давлением 0,01 МПа гелий поступает в масляную бюретку. Давление гелия в подушке создается грузом и фиксируется мановакуумметром. При нагреве мембраны до 200 °С были проведены дополнительные эксперименты, которые показали, что такой прогрев увеличивает проводимость мембраны и достаточен для регистрации атмосферного гелия.

Для определения срока службы проводились ускоренные испытания, при которых количество гелия, поступающего в модель значительно больше, чем в процессе обычной эксплуатации. Для ускоренных испытаний напуск

гелия в насос осуществляется выдержкой мембраны в атмосфере гелия при давлении 1,0 МПа. Был оценен расчетный срок эксплуатации.

На базе проведенных экспериментальных исследований предложены конструкции двух вариантов вакуумных модулей и малогабаритных блоков измерения портативного течеискателя. Результаты проведенных испытаний модели по определению порога чувствительности продемонстрировали перспективность выполненной разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы формулируются следующим образом.

1. Установлена специфика статических расчетов при проектировании пневмоприводов для схватов ПР: в первую очередь определяется требуемая энергия за один ход, а затем подбирается механизм передачи. Исходя из условий надежности удерживания объектов заданной номенклатуры, задается зависимость усилия захватывания от параметра раскрытия схвата, а затем по этой зависимости синтезируется механизм передачи. Проведенный сопоставительный анализ механизмов передачи дает возможность обоснованно выбирать схемы и основные параметры схватов ПР.
2. Пневмотранспортные бесштоковые системы с магнитной связью между поршнем и кареткой позволяют осуществлять перемещения на большие расстояния по трассам сложных конфигураций с обходом препятствий. Показано, что силовые возможности пневмотранспортных систем определяются как пневмоприводом, так и магнитным взаимодействием поршня с кареткой. В построенной модели рассматриваемого привода, как двухмассовой колебательной системы, необходимо учитывать значительное увеличение

объема рабочей полости трубопровода и вследствие этого значительное снижение в процессе движения низшей собственной частоты. Для собственных частот получены расчетные формулы.

3. Исследована возможность использования в качестве двигателей роботов с цикловым программным управлением пневмомускулов в виде цилиндрических оболочек, армированных ромбической сеткой корда. Показано, что в зависимости от угла укладки корда пневмомускулы могут работать или на стягивание, или на раздвижение, получены выражения для развиваемых сил.
4. Предложена система приемов, которые позволяют значительно расширить область применения вакуумных хватных устройств типа присосок за счет профилирования контура камеры и установки упоров, обеспечивающих базирование переносимых объектов с заданной формой внешних поверхностей.
5. Показано, что в некоторых случаях целесообразно применение в пневмодвигателях низкого вакуума вместо сжатого воздуха. При этом имеет смысл применять сильфоны, деформируемые при выполнении основных программных движений механизмами манипуляторов.
6. На базе проведенных исследований предложены конструкции двух вариантов вакуумных модулей и малогабаритных блоков измерения портативного течеискателя. Исследованы характеристики насоса, проведено испытание модели по определению чувствительности, порога чувствительности, срока службы.
7. Исследованы характеристики разработанного магнитоэлектрического насоса, исследованы мембранные кварцевые течи, течей с прогревом до 250 °С.
8. Определена теоретическая и экспериментальная чувствительность модели по парциальному давлению гелия в атмосфере или по величине потока

гелия. Разработан и изготовлен откачной пост безмасляной откачки на сорбционных насосах, предназначенный для предварительной откачки и тренировки модели.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Челпанов. И.Б, Ле Дык Тхинь: пневмодвигатели на основе армированных упругих оболочек. Вакуумная техника и технология, т12, N4, ст205-210, 2002г.
2. Ле Дык Тхинь. Современное вакуумное оборудование в робототехнике. Вакуумная техника и технология, т12, N4, ст205-210, 2002г.