

На правах рукописи

ШАПОШНИКОВ Петр Викторович

МЕХАНИКА РОБОТОВ, ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ
ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ
НА ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические
системы

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2004

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

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
проф. Жавнер Виктор Леонидович

кандидат технических наук,
доц. Слоущ Анатолий Владимирович

Ведущая организация: ООО «Тролль»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 01 июня 2004 г в 16.00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, 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 апреля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12
кандидат технических наук, доцент

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В парке промышленных роботов (ПР) всех передовых стран большинство составляют манипуляционные роботы, воспроизводящие манипуляционные движения рук человека при выполнении вспомогательных и технологических операций. Именно манипуляционным ПР посвящено большинство монографий и учебных пособий, в первую очередь, П.Н.Белянина, Е.П.Попова, А.И.Корендясева, И.М.Макарова, Е.И.Воробьева, В.С.Кулешова, Е.И.Юревича. Тем не менее в робототехнике всегда также были актуальными задачи транспортирования. Транспортные ПР в узком смысле (предназначенные для работы именно на производстве) на протяжении трех последних десятилетий разрабатывались в виде автоматически, программно управляемых тележек на колесных шасси в качестве средств колесного внутрицехового транспорта, как необходимый элемент интегрированных производственных систем в тех случаях, когда невозможно использовать конвейеры.

С другой стороны, в других областях робототехники, которые не связаны с промышленным производством, проектировались и изготавливались (часто в опытных экземплярах) многоногие (обычно шестиногие) шагающие автоматы, транспортные роботы, способные перемещаться не только по гладким, но и по неровным поверхностям, преодолевать препятствия, предназначенные для работы на пересеченной местности на Земле, на морском дне, на поверхностях планет и т.п. По отношению к этим разработкам близкими по научному содержанию являются исследования по двуногой ходьбе (в первую очередь В.В.Белецкого, Д.Е.Охоцимского и А.М.Формальского). Из исследований по теории транспортных роботов, приспособленных для работы в специальных условиях, следует особо отметить работы коллектива авторов РАН под руководством Ф.Л.Черноусько и В.Г.Градецкого по созданию теории роботов, способных перемещаться внутри трубопроводов.

Между тем в технике остается широкий спектр видов деятельности в специфических условиях и при особых требованиях, для которых транспортные

роботы практически не разрабатывались. В различных отраслях народного хозяйства существует потребность в автономных транспортных средствах, способных перемещаться по различным конструкциям путем захватывания их элементов. Принципиально новым явилось то обстоятельство, что для удерживания на элементах конструкций при лазании требуется использовать принцип механического захватывания.

При построении алгоритмов движения и систем управления таких транспортных роботов существенно упрощающим является то обстоятельство, что элемент неопределенности, свойственный задачам перемещения по «естественным» средам, сводится к минимуму. Конструкция и ее элементы, по которым необходимо перемещаться, заранее известна, и к ней можно приспособиться как выбором конструктивных элементов конечностей роботов, так и программированием движений. Нет необходимости усложнения алгоритмов, связанных, например, с необходимостью искать точки опоры.

Теоретические исследования научным основам проектирования таких роботов ведутся в последние годы на кафедре «Автоматы» СПбГПУ. В цикле проводимых исследований основное внимание обращается на задачи механики при взаимодействии конечностей робота с опорными элементами конструкций. В защищенной в 2000 году диссертации аспиранта кафедры Гуань Цзяня (КНР) рассматривались задачи механики транспортного робота, конечности которого оканчиваются наконечниками, упирающимися в опорные элементы так, что шасси подобного робота в целом оказывается подобным многопальцевому схвату.

Остались до сих пор не исследованы возможности создания роботов, все конечности которых оканчиваются схватами. Представляется, что именно такие транспортные роботы являются наиболее перспективными. Поэтому тема диссертации, посвященной постановке и решению задач механики транспортных роботов со схватами, является актуальной.

Основной целью в диссертации является обоснование основного принципа перемещения, исследование характеристик несущей способности и разработка научных основ проектирования схватов транспортных систем роботов, которые

имеют многозвенные конечности и способны перемещаться по различным конструкциям, когда удерживание осуществляется захватыванием, а перемещение осуществляется путем перезахватывания опорных их элементов.

Для достижения указанной цели в диссертации ставятся и решаются следующие **задачи**:

- систематизация сведений о типовых конструкциях, для перемещения по которым может предназначаться робот, определение способов захватывания опорных элементов конструкций и формулирование основных требований к роботам с несколькими конечностями;

- разработка принципиальных и схемных решений шасси транспортных роботов рассматриваемого типа, исходя из требований к базированию на всех фазах движения, обоснованный выбор числа и параметров конечностей;

- доработка теории механических хватных устройств зажимного типа применительно к использованию их в транспортных роботах;

- разработка методики определения характеристик несущей способности шасси транспортных роботов с несколькими конечностями с учетом способов захватывания;

- исследование некоторых динамических режимов, возникающих при перемещении транспортных роботов рассматриваемого типа.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- в различных отраслях народного хозяйства требуются подвижные автоматы – транспортные роботы с несколькими конечностями, способные перемещаться по конструкциям и выполнять различные технологические и вспомогательные операции;

- когда конструкции имеют расчлененные элементы, представляется наиболее подходящим способ удерживания шасси на этих элементах захватыванием с помощью механических хватных устройств зажимного типа – схватов и перешагивания путем перезахватывания;

- важнейшими из характеристик транспортных роботов рассматриваемого типа являются параметры несущей способности, определяемой соотношениями между предельно допустимыми значениями приложенных сил и моментов в состояниях статического и квазистатического равновесия;

- анализ решений задач расчета параметров несущей способности по разработанному методу позволяет устанавливать зависимости предельных значений сил и моментов от геометрических параметров шасси и конечностей и их изменение по фазам движения;

- при решении задач анализа несущей способности транспортных роботов рассматриваемого типа может быть существенным влияние упругости механизмов конечностей, различие жесткости может приводить к значительному снижению несущей способности;

- при решении задач динамики движений роботов при медленных и плавных движениях целесообразно к числу приложенных сил добавлять силы инерции,

- при решении задач динамики движений роботов для ударных процессов важна способность системы конечностей со схватами поглощать энергию удара, необходимо вводить самостоятельные характеристики несущей способности по отношению к ударному импульсу.

Методы исследования. При построении математических моделей и при решении задач геометрии, статики, кинематики и динамики транспортных роботов со схватами использовались методы аналитической геометрии, теоретической и аналитической механики, теории механизмов. При математическом моделировании и проведении на компьютере численных расчетов использовались универсальные программы *Mathcad* и *Mathlab*.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- систематизированы сведения о технических задачах, для решения которых целесообразно создавать транспортные роботы с несколькими конечностями, способные удерживаться на конструкциях с помощью схватов и перемещаться по ним путем перезахватывания;

- определены свойства конструкций и их элементов, характеризующие возможности их использования как опорных при перемещении транспортных роботов рассматриваемого типа;

- для задачи захватывания опорного элемента конструкции схватом конечности введено понятие области допустимых отклонений при захватывании в многомерном пространстве геометрических параметров;

- для задачи захватывания опорного элемента схватом конечности введено понятие области жесткого фиксирования после захватывания в многомерном пространстве обобщенных сил, разработана методика расчета ее границ;

- понятие области жесткого фиксирования обобщено на задачу удерживания на конструкции шасси с несколькими конечностями, снабженными схватами, разработана методика расчета ее границ;

- показано, что достаточно высокие значения показателей несущей способности шасси рассматриваемого типа обеспечиваются, только если в любой момент опорные элементы захвачены не менее, чем тремя схватами, в этих случаях достаточно учитывать только силы и можно пренебрегать моментами в схватах;

- понятие области жесткого фиксирования обобщено на задачу удерживания шасси с несколькими конечностями, снабженными схватами, на конструкции, разработана методика расчета ее границ;

- определено влияние на несущую способность шасси ограниченности моментов в шарнирах и упругости конечностей;

- введены показатели, определяющие способность удерживаться шасси на опорных элементах при воздействии импульсных сил.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы докладывались на научных семинарах кафедры «Автоматы» СПбГУ и на ряде научных конференций в Санкт-Петербурге. Основное содержание диссертации отражено в трех публикациях.

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней предложены принципиальные и схемные решения транспортных роботов нового

типа, обоснован выбор числа конечностей, разработана методика расчета несущей способности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации 140 страниц, в тексте имеется 37 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, приводится краткий обзор содержания диссертации по главам.

Основной материал диссертации распределен по пяти главам.

В первой главе сначала дается краткий анализ современного состояния робототехники. Приводится общая многоаспектная классификация роботов. Осуществляется краткий обзор прикладных задач, которые могут и должны решать транспортные роботы. Отмечается, что шагающие транспортные роботы с конечностями, а не с колесными шасси ранее рассматривались, как перспективные преимущественно для передвижения по горизонтальной плоскости, возможно, с препятствиями, причем предполагается, что каждая конечность просто опирается о поверхность. Обращается внимание на особенности условий работы, требований к транспортным роботам, на принципы работы ходовых частей, на задачи, которые должны решать системы автоматического и автоматизированного управления. Формулируется наиболее актуальная научная проблематика применительно к транспортным роботам, шасси которых имеют конечности, оканчивающиеся схватами. Определяются задачи исследования в диссертации. Основной признана задача анализа несущей способности робота (шасси) на различных фазах движения при захватывании схватами всех конечностей или при отрыве некоторых из них. Отмечается, что при этом необходимо использовать опыт разработки методик определения несущей способности схватов манипуляционных роботов - механических захватных устройств зажимного типа.

Вторая глава начинается с классификации транспортных роботов, устанавливается место роботов с несколькими конечностями, оканчивающимися

схватами, в общей классификации, приспособленных для перемещения по различным конструкциям и сооружениям. Примерный общий вид шасси такого транспортного робота представлен на рис. 1. Кинематическая цепь каждой конечности должна иметь шесть шарниров с тем, чтобы хват имел шесть степеней подвижности относительно корпуса шасси.

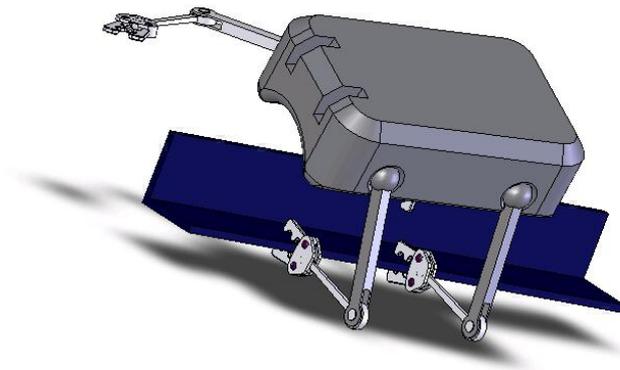


Рис. 1.

Далее во второй главе приводятся примеры строительных и других конструкций, по которым может перемещаться транспортный робот рассматриваемого типа. Предлагаемая классификация таких конструкций, относимых к категории техногенных сред, приведена на рис. 2.

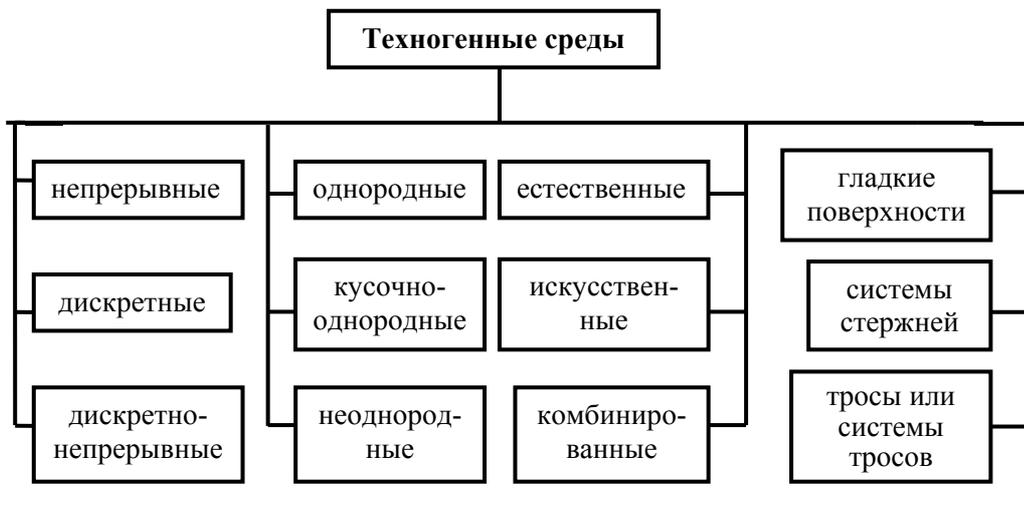


Рис. 2

К числу рассматриваемых конструкций и сооружений и их фрагментов могут относиться стальные, бетонные и кирпичные стены зданий и помещений (как наружные, так и внутренние), памятники архитектуры и их фрагменты, монументальная скульптура, тоннели, ограждения, пучки арматуры железобетонных сооружений, строительные леса, мосты и эстакады, подъемные краны и другое подъемно-транспортное оборудование, буровые вышки, мачты электропередачи и средств связи (в частности, ретрансляционных радиорелейных линий), телевизионные башни, большие емкости, корпуса и надстройки судов, конструкции космических и подводных аппаратов и станций, большие приемные и передающие антенны, трубопроводы, столбы, колонны, дымовые трубы, система труб в водотрубных котлах, стеллажи складов, несущие конструкции декорационных сооружений и т.д. Для всех этих объектов свойства элементов, которые используются для опоры схватов транспортных роботов, могут существенно различаться. Элементы этих сооружений могут представлять собой гладкие или негладкие (ребристые или с отверстиями) панели, оболочки (жесткие и легкодеформируемые), балки и стержни различного сечения, решетки, фермы (плоские и пространственные), тросы, цепи, специальные конструкции для перемещения людей (лестницы, скобы и т.п.) и любые их сочетание (упорядоченные и неупорядоченные). Как типичная описывается задача перемещения транспортного робота по лестнице с периодически следующими друг за другом перекладинами или по ферме.

В третьей главе теория захватывания, разработанная ранее в монографии И.Б.Челпанова и С.Н.Колпашникова применительно к схватам манипуляционных роботов, перерабатывается для задачи захватывания неподвижных опорных элементов схватами конечностей. Формулируемые в этой главе задачи механики имеют существенную специфику, которая заключается в том, что не схват удерживает захватываемый объект манипулирования, а шасси робота удерживается с помощью схвата на неподвижном опорном элементе.

Сначала определяются геометрические условия правильности захватывания с учетом погрешностей относительного положения элементов схвата и опорного элемента. Вводятся понятие области допустимых отклонений перед

захватыванием и в процессе захватывания в многомерном пространстве обобщенных координат, формулируются подходы для расчета ее границ.

Далее ставится и решается задача определения характеристик несущей способности одного схвата с учетом особенностей возможных форм опорных элементов при и задаваемых в общем виде силах и моментах, задаваемых их составляющими по осям. Вводится понятие области жесткого фиксирования в шестимерном пространстве составляющих, для точек которой выполняются условия равновесия механической системы «схват - опорный элемент».

Уравнения равновесия системы «схват-опорный элемент» имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_i \mathbf{R}_i + \mathbf{F} &= 0; \\ \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{R}_i + \mathbf{M} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\sum_i a_i(q_0)R_i^{(1)} + \sum_i b_i(q_0)R_i^{(2)} = S \quad (2)$$

где \mathbf{F} - главный вектор силы, \mathbf{M} - вектор момента приложенных сил, \mathbf{R}_i - реакции опорного элемента на губки схвата в точках контакта, \mathbf{r}_i - радиусы-векторы точек контакта, S - усилие захватывания. В общем случае в точках контакта реакции имеют нормальные составляющие и касательные, обусловленные трением. Используется универсальный кинематический метод, при котором малые перемещения опорного элемента относительно схвата из исходного положения равновесия зададим приращением $\delta \mathbf{r}_0$ вектора \mathbf{r}_0 и вектором $\boldsymbol{\theta}$ малого угла поворота. Изменения $\delta \mathbf{r}_i$ радиусов-векторов \mathbf{r}_i положений точек контакта задаются следующим образом

$$\delta \mathbf{r}_i = \delta \mathbf{r}_0 + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}_i + \delta \mathbf{l}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (3)$$

После этого направления сил трения оказываются определенными, а составляющие векторов $\delta \mathbf{r}_0$ и $\boldsymbol{\theta}$ входят в число неизвестных, для которых составляются дополнительные уравнения. Метод позволяет определять границы области жесткого фиксирования в аналитическом виде. Приведены формулы для предельно допускаемых значений сил и моментов для ряда задач, представляющих наибольший интерес.

На основе общей методологии расчета одиночного схвата в четвертой главе осуществляется определение в статических режимах несущей способности системы схватов, с помощью которых шасси робота удерживается на опорных элементах конструкции. Понятие области жесткого фиксирования обобщается на систему схватов. Задача ставится следующим образом: как зная ОЖФ каждого схвата, построить ОЖФ для шасси в целом, удерживающегося на конструкции с помощью m конечностей со схватами. Составлена общая система уравнений равновесия для системы соединенных схватов. Считается заданным и известным шестимерный вектор приложенных сил и моментов, приведенный к началу системы координат $X_0Y_0Z_0$, он обозначается $R = [F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}, M_{x0}, M_{y0}, M_{z0}]^T$. Шестимерный вектор сил и моментов, приложенных к i -ому схвату со стороны шасси, обозначим через $R_i = [F_{ix0}, F_{iy0}, F_{iz0}, M_{ix0}, M_{iy0}, M_{iz0}]^T$. Из условия равновесия шасси получаем условие

$$R = \sum R_i$$

или

$$[F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}, M_{x0}, M_{y0}, M_{z0}]^T = \sum [F_{ix0}, F_{iy0}, F_{iz0}, M_{ix0}, M_{iy0}, M_{iz0}]^T$$

Векторы сил и моментов $[F_{ix0}, F_{iy0}, F_{iz0}, M_{ix0}, M_{iy0}, M_{iz0}]^T$, заданные в единой базовой системе координат $X_0Y_0Z_0$, линейным преобразованием приводятся к системе координат $X_iY_iZ_i$ каждого схвата. Здесь исходными являются векторно-матричные соотношения

$$[F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}, M_{ix}, M_{iy}, M_{iz}]^T = \Gamma_i [F_{ix0}, F_{iy0}, F_{iz0}, M_{ix0}, M_{iy0}, M_{iz0}]^T$$

где Γ_i - матрица размерности 3×3 направляющих косинусов системы координат $X_iY_iZ_i$ относительно системы координат $X_0Y_0Z_0$.

Обосновывается практическая необходимость того, чтобы для удержания робота на опорных элементах было достаточно использовать только силы реакций, но не моменты. Показано, что в этом случае для обеспечения требуемой несущей способности шасси должно иметь четыре конечности, причем при перемещении все конечности отрываются от опор по одной, так что в любой момент удерживание должно осуществляться не менее, чем на трех схватах. В этих случаях задача определения несущей способности сводится к перебору дискретных состояний, в которых в разных сочетаниях происходит перемещение в разных схватах опорных элементов.

В четвертой главе на основе доработанной теории захватывания ставятся и решаются конкретные задачи определения несущей способности шасси рассматриваемого типа на типовых конструкциях при некоторых вариантах их ориентации. Первой является задача перемещения по вертикальному стержню (балке) и удерживания на трех конечностях. Исследуются зависимости характеристик несущей способности на различных фазах перемещения робота в зависимости от значений геометрических параметров. Далее рассматривается задача перемещения робота с захватыванием перекладин вертикально поставленной лестницы (рис. 3). Определены варианты потери равновесия при различных условиях нагружения. Предложен и обоснован порядок перестановки конечностей с захватыванием последующих опорных элементов. Схема рекомендуемой последовательности перестановки схватов конечностей представлена на рис. 4. Установлено, каким образом изменяются параметры несущей способности шасси по фазам движения. Далее учитывается ряд дополнительных факторов, в частности, ограниченность моментов в шарнирах конечностей. Показано, что эти ограничения могут существенно уменьшать область жесткого фиксирования.

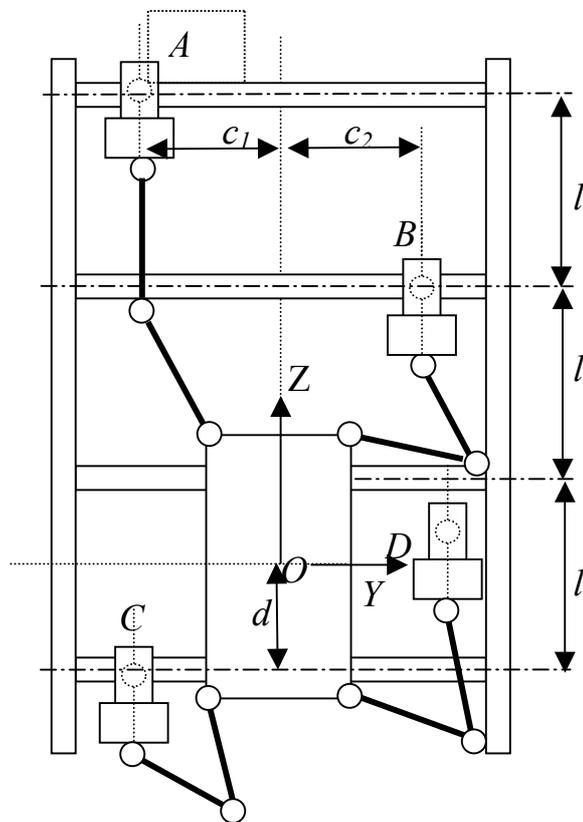


Рис. 3.

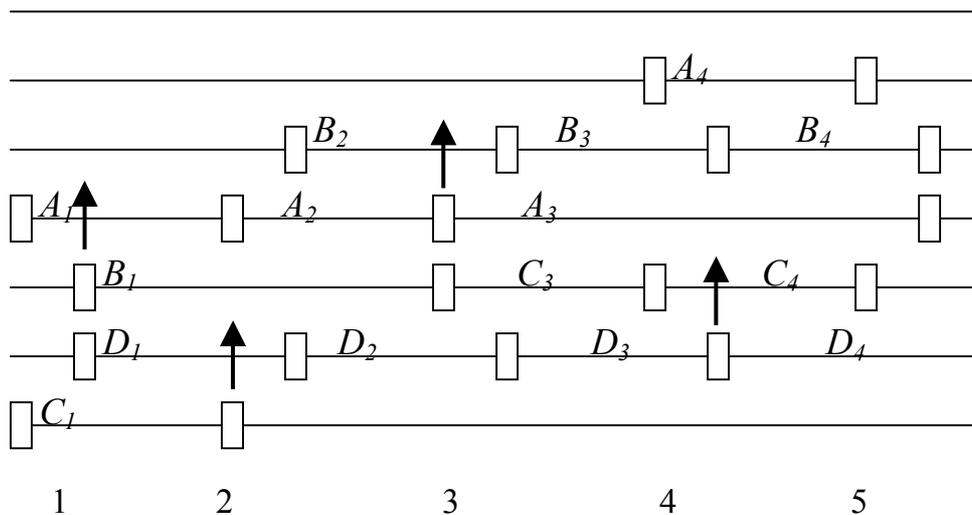


Рис. 4

На простых моделях оценено влияние упругости в шарнирах конечностей и опорных элементов. Показано, что упругость звеньев конечностей и их соединений обычно не приводит к сужению ОЖФ, если фактор упругости приводит к выравниванию сил реакций, но может приводить к снижению несущей способности, если приведенные коэффициенты упругости для конечностей существенно различаются.

Пятая глава посвящена постановке и решению некоторых задач динамики транспортных роботов рассматриваемого типа. Для случая медленных и плавных движений к числу действующих сил прибавляются силы инерции и далее рассматривается состояние, близкое к состоянию статического равновесия. Самостоятельного исследования потребовали задачи динамики при импульсных воздействиях. Показано, что при модели жесткого шасси с жесткими механизмами конечностей вследствие импульса обязательно происходит смещение опорных элементов во всех схватах. Если при этом перемещения достигают предельно допустимых значений, то произойдет срыв робота с опорной конструкции. Для типовой задачи и упрощенной ее математической модели получены оценки модуля предельно допустимого импульса. Если же предельные значения не достигаются, то окончания действия импульса в

зависимости от характеристик схвата происходит или возвращение в исходное состояние, или полученное перемещение сохраняется. Делается вывод о том, что необходимо вводить самостоятельные параметры, характеризующие устойчивость робота со схватами по отношению к импульсным воздействиям. Рассмотрены примеры.

Выводы сформулированы отдельно по главам, в концентрированном виде они представлены в Заключении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В народном хозяйстве имеется потребность в создании транспортных роботов, способных перемещаться по различным конструкциям (техногенным средам) и выполняющим такие функции, как осмотр, очистка поверхностей, окраска, нанесение покрытий, прокладка кабелей, установка приборов и т.п. Для подобных роботов представляется перспективной схема шасси с несколькими конечностями, имеющими схваты.
2. При проектировании механизмов подобных роботов основными являются следующие этапы: формализация требований; определение основных принципов удерживания на опорных элементах, расчет параметров несущей способности роботов в статических и динамических режимах; разработка предложений по управлению конечностями при перешагивании.
3. Для расчета несущей способности шасси с несколькими конечностями в общем случае необходимо определять области жесткого фиксирования в шестимерном пространстве составляющих сил и моментов, практически достаточно рассматривать двумерные сечения этой области.
4. В тех случаях, когда шасси удерживается на опорных элементах конструкции не менее чем тремя схватами, в каждом из них достаточно учитывать только силы реакций и можно пренебрегать моментами.
5. При расчетном определении границ области жесткого фиксирования следует использовать кинематический метод, приводящий к задаче оптимизации линейного функционала при линейных ограничениях,

6. Аналитические оценки и расчеты показывают, что параметры несущей способности шасси при перешагивании могут существенно изменяться по фазам движения.
7. При определении параметров несущей способности шасси рассматриваемого типа в рамках разработанного метода можно учитывать ограничения на моменты в кинематических парах конечностей.
8. Влияние упругости элементов опорной конструкции и звеньев механизма самого шасси, с одной стороны, может сказываться положительно и приводить к выравниванию нагрузок на схваты, но может приводить к снижению несущей способности, вследствие упругих перемещений возможна потеря опоры в отдельных схватах.
9. Значительный практический интерес представляют задачи динамики роботов рассматриваемого типа при импульсных воздействиях. При этом механизмы схватов выступают в роли динамических поглотителей энергии удара. Решена простейшая одномерная задача ударного движения.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шапошников П.В., Никифоров С.О., Сосоров Е.В. Задачи кинематики транспортных роботов, перемещающихся по техногенным средам. // Материалы 2 международной конференции «Проблемы механики современных машин», т. 3. Улан-Удэ, 2003.
2. Шапошников П.В. Роботы для перемещения по конструкциям // Материалы 4 Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» Санкт-Петербург 2003
3. Шапошников П.В. Задачи механики роботов, перемещающихся по конструкциям периодической структуры. // Материалы XXXII Межвузовской научно-технической конференции. СПб, 2004.