

На правах рукописи

СОСОРОВ Евгений Владимирович

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
С ИМПУЛЬСНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические
системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Диссертация выполнена на кафедре «Детали машин, теория механизмов и машин» ГОУ «Восточно-Сибирский государственный технологический университет».

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Романов Павел Иванович;

кандидат технических наук, доцент
Терешин Валерий Алексеевич

Ведущая организация: ОАО «Бурятэнерго»

Защита состоится 02 декабря 2003 г. в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан 31 октября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12
кандидат технических наук, доцент

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Общий кризис в промышленности России девяностых годов XX века отразился на робототехнике, какие-либо сведения о выпуске роботов в России в настоящее время полностью отсутствуют. Однако в тот же период в ведущих странах роботостроение продолжало интенсивно развиваться, темпы прироста годового выпуска в среднем были не ниже 15 %; в 2000 году мировой парк роботов превышал 1 миллион, а на 2003 год эта цифра близка к 1,3 миллиона. Потребность в промышленных роботах в нашей стране не исчезла, однако в первую очередь требуются достаточно простые по устройству и дешевые роботы с цикловым управлением, способные работать в быстром темпе и приспособленные для обслуживания быстродействующего технологического оборудования. Большинство таких быстродействующих роботов в прошлом имело линейный пневмопривод (пневмоцилиндры). При этом приходится мириться с хорошо известными недостатками пневмопривода, к числу которых относятся: необходимость подключения к пневмосети и очистки воздуха, сложности с размещением трубопроводов, трудность получения плавных движений, невозможность работы в следящем режиме при контурном управлении, шум при работе, невысокий ресурс. В последние два десятилетия в робототехнике все более широкое применение находит электропривод, на основе новых типов двигателей он постепенно вытесняет другие типы приводов.

Для роботов с любыми приводами, в первую очередь, электромеханическими, серьезные трудности при проектировании связаны с размещением двигателей. Традиционное размещение двигателей вместе с редукторами на подвижных звеньях у кинематических пар манипуляторов приводит к значительному увеличению подвижных масс и моментов инерции, вследствие чего возникают жесткие ограничения по быстродействию.

Оказывается невозможным снижение периодов циклов до значений, меньших трех-четырех секунд, или повышение средних скоростей свыше полутора метра в секунду, даже небольшое улучшение показателей быстро-

действия по сравнению с этими величинами требует недопустимо большого увеличения мощностей двигателей приводов. Кроме того, важно, что двигатели и устройства подвода энергоносителей на подвижных звеньях работают при больших механических перегрузках, часто значительных, что снижает их надежность.

Начиная с семидесятых-восьмидесятых годов в лаборатории робототехники Бурятского института естественных наук Сибирского отделения АН СССР (в последние годы БИЕН СО РАН); сложилась перспективная тематика в области роботостроения, это теория циклоидальных манипуляторов, простых по конструкции, имеющих простые системы управления. В течение двух десятков лет под руководством д.т.н. С.О.Никифорова здесь ведутся теоретические исследования по теории быстродействующих роторных или циклоидальных манипуляторов, опубликовано несколько десятков работ.

Принцип заключается в том, что ведущие звенья, приводимые в движение роторами электродвигателей, вращаются в одну и ту же сторону от неуправляемых электродвигателей, а выходные звенья механизмов передач задают рабочему органу движения по траекториям, удовлетворяющим поставленным ограничениям, с мгновенными остановками в заданных точках позиционирования.

Первоначально теория циклоидальных манипуляторов строилась на предположении, что приводы обеспечивают постоянство угловых вращений звеньев. Однако в дополнение указанным исследованиям для ряда схем исследовалась динамика периодических движений и при равенстве нулю вращающих моментов двигателей во время движения, т.е. свободных движений, что послужило начальным импульсом для исследований данной диссертационной работы.

Данная диссертационная работа близка к проработкам, которые представлены циклом перечисленных выше теоретических и экспериментальных научных исследований по теории циклоидальных манипуляторов, но идея использования свободных движений механизмов

использования свободных движений механизмов находит более последовательное развитие.

Предлагаемый путь нахождения компромисса между противоречивыми требованиями обеспечения свободы движения и необходимостью приведения звеньев в движение заключается в том, чтобы обычные двигатели, постоянно включенные в кинематические цепи, заменить специальными импульсными двигателями, выходные звенья которых сохраняют контакт со звеньями механизма лишь на коротких интервалах времени приложения разгоняющих импульсов, после чего кинематические цепи разрываются.

Определение принципов действия, перспективных принципов устройства, схемных решений, необходимого числа и расположения этих импульсных двигателей представляет одну из задач исследования в данной диссертации. При этом необходим анализ возможностей получения требуемых траекторий перемещения из заданных начальных точек в заданные конечные точки при устранении приводов по некоторым степеням подвижности, а для необходимых приводов на основе импульсных двигателей – возможностей размещения их на неподвижном основании. Этим полностью устраняются типичные конструктивные трудности, связанные с необходимостью компоновывания двигателей в подвижные звенья механизма. Принципиально важно, что воспроизводимые траектории формируются из отрезков, участков свободного движения, причем переход от очередного участка к последующему осуществляются под действием импульсов. Таким образом, механизм манипулятора в процессе движения изменяет свою структуру, неустойчивые механические связи с импульсными двигателями и упорами то устанавливаются, то пропадают, а получаемое движение является составленным из фрагментов, «кусочно-свободным».

Необходимо отметить, что в дополнение к импульсным двигателям требуется целый комплекс средств, еще другие устройства, такие, как фиксирующие упоры и демпферы, поглощающие энергию, а также отражательные упоры.

Поэтому тема данной диссертации, посвященной обоснованию возможностей построения манипуляторов со стационарно устанавливаемыми импульсными двигателями и другими устройствами, выбору схем установки и параметров этих двигателей и устройств, исходя из требований к траекториям, представляется актуальной.

Связь с планами научных исследований. Диссертационная работа продолжает цикл исследований, начатых в соответствии с Координационным планом научно-исследовательских работ АН СССР “Проблемы механики и управления в робототехнических системах и автоматизированных производствах” (шифр 1.11.3), а также по специальной теме “Исследование и разработка быстродействующих циклоидальных манипуляторов”, утвержденной Постановлениями ГКНТ И 108 от 20.04.87 и ОФМТН Президиума АН СССР И 11000-194-1216 от 05.12.85.

Цель диссертационной работы. Основной целью диссертации является обоснование возможностей построения манипуляторов, в механизмах которых исключены приводы во всех кинематических парах, возможно, за исключением первой, а движение осуществляется на интервалах времени как свободное, под действием импульсов, сообщаемых специальными импульсными двигателями, устанавливаемыми на неподвижном основании, а также упорами различного типа, и теоретическое исследование кинематики и динамики типовых кинематических схем подобных манипуляторов.

В соответствии с основной целью в диссертации сформулированы следующие **основные задачи исследования**.

1. Определение числа импульсов и соответственно числа импульсных двигателей, необходимых для осуществления переносов объектов с помощью механизма манипулятора из заданных положений в заданные конечные.

2. Исследование возможностей использования различных физических принципов и схемных решений при создании импульсных двигателей и других устройств (фиксирующих и отражательных упоров), необходимых для реализации манипуляторов рассматриваемого типа.

3. Разработка научных основ методики построения математических моделей кусочно-свободных движений манипуляторов рассматриваемого типа на основе использования интегралов кинетической энергии и момента количества движения, а также выражений для обобщенных импульсов сил.

4. Построение математических моделей для типовых кинематических схем и исследование свойств свободных движений по результатам расчетов траекторий механизмов манипуляторов рассматриваемого типа с целью использования участков этих траекторий для построения программ движения.

5. Синтез траекторий переноса объектов с помощью манипуляторов рассматриваемого типа на основе сопряжения участков траекторий свободных движений и (или) движений при задаваемом вращении первого звена при фиксировании определенных конфигураций с помощью упоров на некоторых интервалах.

6. Разработка методики и анализ динамики упругих колебаний механизма манипулятора рассматриваемого типа под действием импульсов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Во вспомогательных (обслуживающих) манипуляторах могут быть исключены двигатели, обычно устанавливаемые у кинематических пар механизмов. Вместо этого используются только неподвижно устанавливаемые обычный двигатель по первой степени, импульсные двигатели по другим степеням подвижности, тормозные устройства, отражательные и фиксирующие упоры.

2. При построении импульсных двигателей могут быть использованы различные физические принципы. Наиболее перспективными представляются механические пружинные двигатели, которые одновременно выполняют функции тормозных амортизаторов и рекуператоров энергии.

3. Законы движения и программные траектории переноса объектов для манипуляторов рассматриваемого типа строятся сопряжением участков свободных движений после импульсов, выстоев в заданных конфигурациях с помощью фиксирующих упоров. При рациональной установке импульсных

двигателей и упоров обеспечивается приход рабочего органа в заданное положение даже при значительных погрешностях задания импульсов.

4. По результатам синтеза программных траекторий для наиболее распространенных кинематических схем манипуляторов получены рекомендации по расстановке импульсных двигателей и упоров различных типов и задания абсолютных значений и направлений импульсов.

5. Импульсные воздействия в конструкциях манипуляторов рассматриваемого типа могут приводить к возбуждению свободных колебаний достаточно больших амплитуд. Необходимо выполнение проверочных расчетов динамики упругих колебаний с целью исключения соударений и обеспечения надежности удерживания объекта в захватном устройстве.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем.

1. Предложен новый способ взаимодействия выходных звеньев короткоходовых двигателей со звеньями механизмов манипуляторов, при котором воздействия осуществляются кратковременно, после чего кинематические связи разрываются и движение осуществляется по инерции.

2. Сформулирована и для типовых кинематических схем манипуляторов решена задача синтеза траекторий кусочно-свободных движений, происходящих под действием импульсов, которые прикладываются в определенных конфигурациях к звеньям механизмов манипуляторов при заданных начальных и конечных условиях.

3. На основе разработанных математических моделей динамики свободных движений предложена методика решения задач программирования траекторий, основанная на использовании интегралов энергии и моментов количества движения и выражений для обобщенных импульсов сил.

4. Разработаны методики учета таких факторов, как погрешности задания модулей и направлений импульсов, силы и моменты трения, упругость звеньев манипуляторов и их соединений.

Методы исследования. При разработке математических моделей, аналитическом исследовании геометрии, кинематики и динамики рассматривае-

мых систем и при проведении необходимых расчетов использовались методы аналитической геометрии, теоретической и аналитической механики, теории механизмов и вычислительной математики.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что в ней проработаны научные основы методик проектирования вспомогательных роботов, способных задавать большие перемещения и большие скорости перемещений при обслуживании быстродействующего технологического оборудования, при преодолении обычных трудностей, связанных с размещением двигателей. Результаты диссертации были использованы при проведении научно-исследовательских работ на Улан-Удэнском приборостроительном объединении (У-УППО) и на Улан-Удэнском авиационном производственном объединении (У-УАПО).

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались на международной конференции «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 2003), а также на семинарах кафедры «ДМТММ» ВСГТУ в 2002 и 2003 гг. и на семинаре кафедры «Автоматы» СПбГПУ. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и Приложения. Общий объем диссертации 135 страниц, в тексте имеется 39 рисунков. Список литературы включает 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, дается обзор содержания диссертации по главам.

Основной материал диссертации распределен по трем главам.

Первая глава посвящена обоснованию разрабатываемого принципа построения манипуляторов, описанию принципиальных и схемных решений

устройств, необходимых для манипуляторов рассматриваемого типа, а именно, импульсных двигателей и упоров. Разработанная классификация этих устройств представлена на рис. 1.

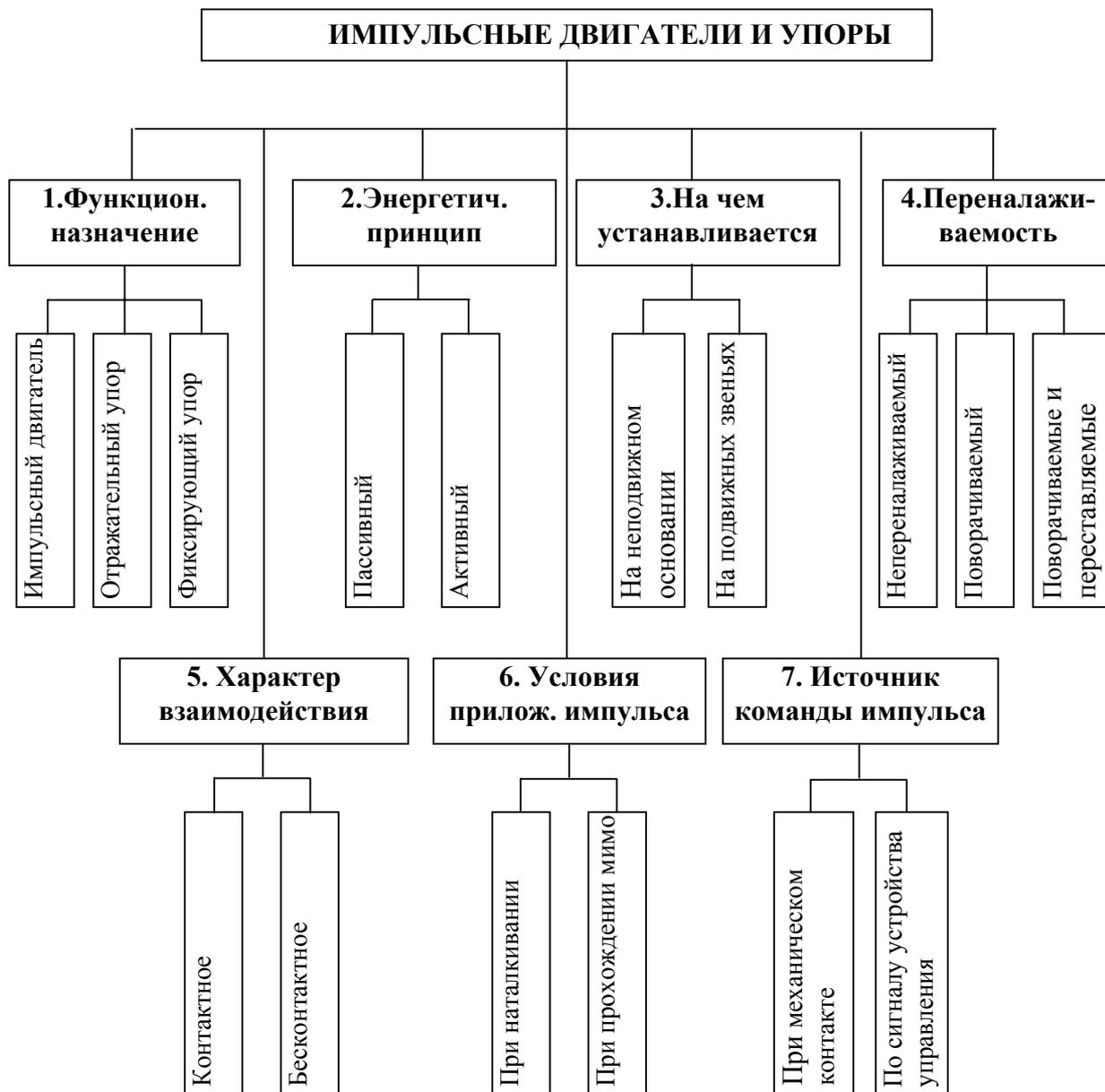


Рис. 1

Приводятся основные соотношения классической теории удара, принятые в теоретической механике. Имеется в виду, что ударный импульс в общем случае имеет нормальную и касательную составляющие, учитывается коэффициент восстановления при ударе. Далее в главе 1 описываются принципиальные и схемные решения упоров и импульсных двигателей. Выделяются фиксирующие упоры, которые фиксируют подвижное звено после со-

ударения. Основное внимание уделено чисто механическим и электромеханическим устройствам. Приводятся варианты их принципиальных и схемных решений. Как наиболее перспективные выделяются электродинамические и соленоидальные линейные двигатели (рис. 2), предназначенные для создания импульсов электромагнитных сил и фиксирующие упоры с механическими

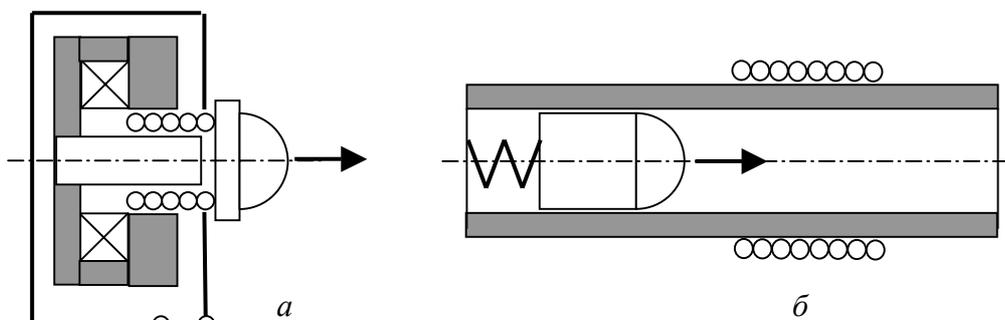


Рис. 2

защелками и электромагнитным управлением.

Показано, что при рациональном построении устройств и режимов работы может быть реализован принцип рекуперации энергии, в том числе с применением пружинных устройств, что позволит значительно снижать как средние, так и пиковые потребляемые мощности двигателей. Формулируются предложения по объединению двигателей и упоров в единых устройствах.

В заключение главы сформулированы основные задачи исследования в следующих главах диссертации.

Материал второй главы является теоретической базой для решения задач о движениях манипуляторов, задаваемых с помощью приложения импульсов.

Задачи формулируются и решаются в общем виде в терминах обобщенных координат и обобщенных сил на основе методов теоретической и аналитической механики. Однако предварительно основные закономерности вскрыты на одномерной модели трехмассовой системы. Предполагается, что в общем случае импульс от импульсного двигателя передается через механизм преобразования к подвижной массе механизма. На этой модели показано, что желательно сообщать ускоряющий импульс в непосредственном первоначальном контакте выходного звена импульсного двигателя со звеном

приводимого в движения механизма, а для случая передачи движения через промежуточный элемент типичен нежелательный режим последовательности ударов. Получены условия существования этого режима. Далее рассматриваются задачи расчета протяженного во времени импульса силы для случаев, когда в процессе передачи усилия необходимо учитывать изменение геометрии. Приведена блок-схема алгоритма численного решения этой задачи.

На траектории движения рабочего движения рабочего органа могут быть расставлены отражательные упоры, позволяющие изменять направление скорости. На примерах показано, каким образом при применении отражательных упоров можно формировать кусочно-гладкие траектории. Основным аппаратом решения задач динамики является аппарат уравнений Лагранжа при использовании интегралов импульсов и энергии. Предложена и подробно описана общая методика исследования движений, происходящих под действием импульсов, на математических моделях.

Методы и расчетные методики, разработанные и описанные во второй главе применяются в третьей главе для исследования импульсных движений плоских механизмов манипуляторов, работающих в соответственно в прямоугольной, полярной и ангулярной системах координат. На примере самой простой задачи динамики манипулятора, работающего в прямоугольной системе координат, исследованы зависимости направления начальной скорости от параметров импульса, получены условия выхода в конечную точку позиционирования по кратчайшему пути, оценены потери при нарушении этого условия. Для манипуляторов, работающих в полярной и ангулярной системах координат, рассмотрены различные возможности размещения фиксирующих упоров. При установке одного из упоров для второго звена в центральной зоне могут быть получены траектории, типичные для обычных роботов (после захватывания объекта рука втягивается, потом поворачивается, а затем вытягивается к заданной конечной точке позиционирования). Пример такой траектории для робота, работающего в цилиндрической системе координат приведен на рис. 3.

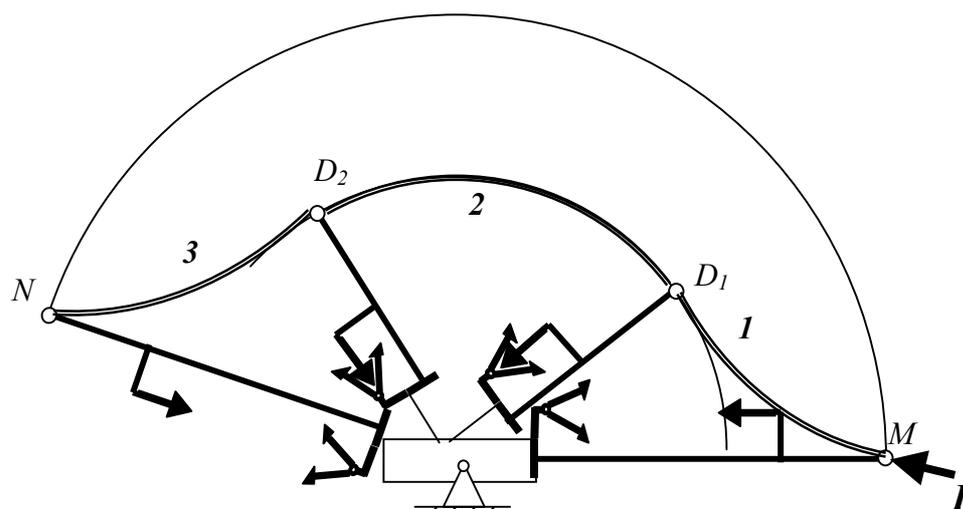


Рис. 3

Начальный импульс в точке M прикладывает импульсный двигатель. В точке D_1 радиальное перемещение останавливает фиксирующий упор; в точке D_2 этот упор освобождает руку и движение оканчивается в точке N . Кратко рассмотрены некоторые задачи, в которых при переносе нужно учитывать угловое переориентирование объектов манипулирования, а также задачи динамики манипуляторов с учетом упругой податливости шарниров и звеньев механизмов. Показано, что при применении фиксирующих упоров, вступающих в действие при приходе подвижных частей в заданные положения и освобождающих подвижные части по командам в определенные моменты времени, можно формировать достаточно сложные, кусочно-гладкие траектории движения рабочего органа. При этом могут решаться такие задачи, как обход препятствий в рабочей зоне и выход на конечные позиции с заданных направлений.

Таким образом, в диссертации определены преимущества новых схем, сформулированы и решены новые задачи механики, возникшие при проектировании манипуляторов, в которых исключены приводы, обычно размещаемые у кинематических пар. Перспективность создания манипуляторов, выполненных по новым схемам, подтверждена результатами математического моделирования.

Манипуляторы, предназначенные для обслуживания прессового оборудования, использованы на автоматизированных участках изготовления деталей, сборки узла машины в Улан-Удэнском приборостроительном объединении (У-УППО) а также в Улан-Удэнском авиационном производственном объединении (У-УАПО). Использование и внедрение результатов диссертации подтверждается официально оформленными актами, копии которых приведены в Приложении.

Основные результаты работы и выводы

Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Показано, что для вспомогательных роботов-манипуляторов с цикловым управлением принцип задания движений, как свободных, получающихся в результате приложения коротких импульсов, является перспективным, поскольку двигатели и тормозные устройства можно устанавливать на неподвижном основании и открываются возможности значительного увеличения перемещений рабочих органов манипуляторов без использования длинноходовых линейных двигателей.

2. Для построения механизмов, способных воспроизводить требуемые траектории кусочно-свободного движения, необходимо иметь следующие устройства: импульсные двигатели, фиксирующие упоры с демпферами-амортизаторами, отражательные упоры. Возможно сочетание в одних и тех же устройствах нескольких функций. Импульсные двигатели могут быть построены на различных физических принципах, выполнен их сопоставительный анализ.

3. В большинстве задач определение параметров импульсов, воздействующих на звенья механизма манипулятора, требует самостоятельного рассмотрения. Способы преобразования работы, совершаемой импульсными двигателями, и потенциальной энергии, накопленной аккумуляторами, в силовые импульсы, а затем в кинетическую энергию существенно различаются по основным параметрам.

4. Соотношения, полученные на простейшей одномерной математической модели трехмассовой или двухмассовой динамической системы при учете разных вариантов силового взаимодействия масс, позволили установить качественный характер взаимосвязей массо-инерционных и энергетических параметров со скоростью, приобретаемой массой после действия импульса.

5. Использование интегралов импульсов и энергии для уравнений Лагранжа при упрощениях, обычных при описании ударных процессов, позволяет получать выражения для обобщенных скоростей произвольных механизмов, что решает проблему определения обобщенных скоростей по степеням подвижности после действия импульса.

6. На основе разработанного унифицированного общего алгоритма могут решаться задачи синтеза системы задания и обеспечения качества импульсных режимов манипуляторов, выполняемых по различным схемам.

7. Рассмотрение задач механики импульсных и комбинированных движений на примере плоских механизмов манипуляторов, построенных по типовым схемам, позволяет выявить возможности формирования различных траекторий переноса объектов.

8. На примере двухстепенных манипуляторов, работающих в прямоугольной, полярной и ангулярной системах координат, определены и аналитически описаны задачи определения направления импульса, задающего заданное направление скорости; осуществлен анализ возможностей формирования траекторий, типичных для обычных манипуляторов, при импульсных движениях и движениях при заданных законах вращения первого звена с помощью фиксирующих упоров; сформулированы рекомендации по расстановке фиксирующих и отражательных упоров.

9. Сформулированы задачи формирования законов движения и исследования динамики при наличии ориентирующих степеней подвижности. Предложены подходы к решению задач динамики манипуляторов рассматриваемого типа при учете упругости элементов конструкции.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сосоров Е.В., Никифоров Б.С. Матрично-кодовый метод анализа механизмов роторных манипуляторов // Материалы II научно-практической конференции «Будущее Бурятии глазами молодежи» - Улан-Удэ: Изд. БГУ, 2002. С.45-48.
2. Сосоров Е.В., Никифоров С.О. Особенности формирования компоновочных структур циклоидальных манипуляторов // Материалы II Международной конференции «Проблемы механики современных машин» - Улан-Удэ: Изд. ВСГТУ, 2003. - ч.3. С. 80-83.
3. Сосоров Е.В., Челпанов И.Б., Никифоров С.О. Классификационные признаки манипуляторов с импульсным заданием движений // Материалы II Международной конференции «Проблемы механики современных машин» - Улан-Удэ: Изд. ВСГТУ, 2003. - ч.3. С. 84-88.
4. Сосоров Е.В., Никифоров С.О. Способы автоматического управления циклоидальных мехатронных устройств // Материалы II Международной конференции «Проблемы механики современных машин» - Улан-Удэ: Изд. ВСГТУ, 2003. - ч.3. С. 89-93.
5. Сосоров Е.В. Манипуляционные системы с импульсным заданием движений. Улан-Удэ: Изд. БНЦ СО РАН, 2003. 24 с.