

*На правах рукописи*

МАНДАРОВ ЭРДЭНИ БОРИСОВИЧ

**ЦИКЛОИДАЛЬНЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ: ПЕРЕНОС  
ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КРИВЫМ И ПРИ  
ЗАХВАТЫВАНИИ В ДВИЖЕНИИ**

Специальность 05.02.05 – Роботы,  
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на  
соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002

Работа выполнена в Восточно-Сибирском государственном университете (ВСГТУ)

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Жавнер Виктор Леонидович.

кандидат технических наук, доцент Слоущ Анатолий Владимирович.

Ведущая организация: ООО «Эс-Эм-Си - пневматик»

Защита состоится 5 ноября 2002 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по адресу: 195251, С-Петербург, Политехническая 29, СПбГТУ, I корп, ауд 41.

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

Автореферат разослан 28 сентября 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н.

Евграфов А.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В ведущих зарубежных странах роботостроение развивается быстрыми темпами. Специалисты в робототехнике должны быть готовы к тому, чтобы после периода развала народного хозяйства Россия также и в этой области заняла достойное место. К числу активно работающих научных коллективов относится имеющая свою оригинальную тематику лаборатория робототехники Бурятского института естественных наук Сибирского отделения АН СССР (в последние годы БИЕН СО РАН). Еще в семидесятых-восьмидесятых годах до последнего десятилетия XX века здесь была определена перспективная тематика: теория циклоидальных манипуляторов. В течение двух десятков лет под руководством д.т.н. С.О.Никифорова здесь ведутся теоретические исследования по теории быстродействующих роторных или циклоидальных манипуляторов. Данная диссертационная работа продолжает цикл теоретических и экспериментальных научных исследований в области робототехники, выполнявшихся в указанном направлении.

Основные соображения относительно перспективности циклоидальных манипуляторов следующие. Во многих отраслях промышленности велика потребность в максимально простых по конструкции, относительно дешевых роботах с цикловым программным управлением, предназначенных или для самостоятельного выполнения единообразных, достаточно простых технологических операций, или, чаще, для обслуживания быстродействующего технологического оборудования. Качество таких роботов в значительной мере определяется способностью работы в очень высоком темпе с тем, чтобы в максимальной степени использовать технологические возможности обслуживаемого быстродействующего технологического оборудования. При этом основная проблема заключается в существенном повышении быстродействия.

При традиционном принципе построения роботов и манипуляторов с цикловым программным управлением модули всех степеней подвижности имеют свои собственные приводы с самостоятельными двигателями и передачами. При выполнении программных движений на каждом этапе двигатели включаются и разгоняют подвижные части механизмов, затем приводы тормозятся перед заданными точками позиционирования, а для выхода в последующие точки те же движения выполняются повторно. В таких условиях представляет серьезные трудности уменьшение времени выполнения даже самых простых циклов до значений, меньших трех-четырех секунд, или повышение средних скоростей свыше полутора метра в секунду.

В лаборатории робототехники Бурятского научного центра Сибирского отделения РАН (БНЦ СО РАН) в течение многих лет прорабатывался другой путь принципиального и технического решения проблемы значительного повышения быстродействия манипуляторов с цикловым программным управлением, основанный на построении механизмов, в которых ведущие звенья, приводимые в движение роторами электродвигателей, вращаются в одну и ту же сторону равномерно, а выходные звенья механизмов передачи задают рабочему органу движения по траекториям, удовлетворяющим поставленным ограничениям, с мгновенными остановками в заданных точках позиционирования. Такие манипуляторы, механизмы которых являются плоскими, называют циклоидальными, поскольку для простейшей двухзвенной схемы воспроизводимые траектории относятся к классу циклоид (представляют собой эпициклоиды и гипоциклоиды).

В работах сотрудников БНЦ СО РАН ранее были исследованы циклоидальные механизмы, в которых производится сложение двух равномерных вращений вокруг параллельных осей. Возможности значительного повышения быстродействия таких манипуляторов обусловлены тем, что их двигатели не разгоняются, не останавливаются и не реверсируются, а со-

кращение времени цикла достигается просто увеличением постоянных угловых скоростей. Циклоидальные манипуляторы как правило должны сохранять обязательные и типовые для роботов свойства переналаживаемости, программируемости, что требует усложнения, а иногда и изменения во время движения структур и кинематических схем механизмов, использования нескольких приводов и систем автоматического управления. В этом плане научным консультантом данной работы д.т.н. С.О.Никифоровым для циклоидальных манипуляторов была предложена серия оригинальных усовершенствований, подлежащих серьезному и многостороннему научному анализу; некоторые из них защищены авторскими свидетельствами. Поэтому тема данной диссертации, посвященной решению ряда задач создания, расчета, проектирования и исследования таких быстродействующих, надежных и относительно недорогих циклоидальных манипуляторов новых поколений с расширенными манипуляционными возможностями, представляется актуальной.

**Связь с планами научных исследований.** Диссертационная работа продолжает цикл исследований, проведенных 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 разработка научных основ проектирования и исследование механики семейства быстродействующих циклоидальных манипуляторов, работающих на принципе сложения равномерных вращений, но выполненных по новым схемам с непараллельными осями, исследование кинематики и ди-

намики этих манипуляторов при захватывании и освобождении объектов во время движения.

В соответствии со сформулированной целью в диссертации поставлены следующие **основные задачи исследования**.

1. Изучение свойств траекторий захватного устройства в рабочей зоны для двух новых схем роторных манипуляторов, воспроизводящих не плоские, а пространственные траектории, сходные по конфигурации с типовыми траекториями рабочих органов обслуживающих обычных промышленных роботов, исследование законов изменения скоростей и ускорений.

2. Исследование возможностей захватывания объектов во время их движения по лентам транспортеров или в гнездах вращающихся роторов, выбор параметров манипуляторов и режимов их работы для обеспечения безударного захватывания и освобождения без проскальзывания, а также получения требуемых изменений модуля и направления скорости, ускорения или замедления процесса переноса.

3. Исследование особенностей динамики циклоидальных манипуляторов, обусловленных изменением приведенных масс их механизмов вследствие захватывания и освобождения объекта.

4. Определение требований к мощности двигателя привода на основе исследования энергетических соотношений, связанных с изменением скорости переносимого объекта на позициях захватывания и освобождения.

5. Анализ динамики механизмов быстродействующих циклоидальных манипуляторов с жесткими звеньями с целью определения неравномерности вращающих моментов или угловых скоростей.

6. Исследование возможностей использования циклоидальных манипуляторов в качестве демонстрационных устройств.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Применение роторных двухзвенных или трехзвенных быстродействующих манипуляторов, выполненных по кинематическим схемам с непараллельными осями кинематических пар позволяет воспроизводить пространственные траектории, у которых точки мгновенной остановки лежат ниже уровня переносных движений, что облегчает захватывание и установку на заданные позиции переносимых объектов.

2. Циклоидальные манипуляторы позволяют безударно захватывать объекты или с движущихся лент транспортеров или из ячеек вращающихся роторов и устанавливать их или на неподвижное основание, или на ленты других транспортеров; механизмы таких манипуляторов с двумя вращательными кинематическими парами позволяют осуществлять перенос с требуемым изменением направления и модуля линейной скорости.

3. Изменение модуля скорости переносимого объекта при снятии его с подвижного основания и установки его на другое подвижное или неподвижное основание, либо сбрасывание во время переноса приводит к тому, что нарушается условие энергетического баланса, и в зависимости от соотношений скоростей можно уменьшать или требуется увеличивать мощность двигателей приводов.

4. Изменение приведенных масс последнего звена манипулятора вследствие захватывания или освобождения объекта манипулирования оказывает существенное влияние на динамику движений, при двигателях малой мощности время этапа переноса объекта существенно увеличивается по сравнению с холостыми ходами.

5. При построении систем управления циклоидальными манипуляторами с двумя синхронизированными приводами необходимо использовать подстройку по сдвигу импульсов во времени, причем может быть исполь-

зовано два способа синхронизации; проще в реализации тот способ, при котором только привод второго звена является следящим.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в следующем.

1. Сформулированы, формализованы и решены задачи геометрии, кинематики и динамики двухзвенных и трехзвенных манипуляторов, выполненных по до сих пор не исследованным кинематическим схемам и воспроизводящих типичные для обслуживающих роботов пространственные траектории.

2. Получены условия, налагаемые на геометрические параметры и угловые скорости звеньев манипулятора, при которых манипулятор способен безударно перекладывать объекты с одного транспортера на другой при обращении в нуль относительной скорости перемещения захватного устройства и объекта в момент захватывания и освобождения.

3. На математической модели исследованы эффекты, которые являются следствием скачкообразной переменности массо-инерционных параметров манипулятора в моменты захватывания и освобождения переносимого объекта.

4. Сформулированы требования к системам автоматического управления приводами и синтезированы законы управления, при которых могут быть выполнены требования по точности и удовлетворены ограничения на траектории.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, содержащихся в диссертации, подтверждена корректным использованием математического аппарата, анализом и сопоставлением результатов расчетов и математического моделирования с экспериментальными данными.

**Методы исследования.** При разработке теории циклоидальных манипуляторов в диссертационной работе использованы методы аналитической



геометрии, теоретической и аналитической механики, теории автоматического управления.

**Практическая ценность работы** заключается в обосновании возможностей построения циклоидальных манипуляторов по новым схемам, при которых пространственные траектории захватных устройств более приспособлены для перекладки объектов с переносом их на более высоких уровнях, а также возможностей работы манипуляторов совместно с непрерывно перемещающимися транспортирующими устройствами.

**Реализация результатов исследований.** Манипуляторы, предназначенные для обслуживания прессового оборудования, использованы на автоматизированных участках изготовления деталей, сверления смазочного отверстия и сборки из пяти деталей узла стиральной машины “Белка-10-М” на У-УАПО (г. Улан-Удэ), а также пылесоса “Байкал” в У-УППО (г. Улан-Удэ). Использование и внедрение результатов диссертации подтверждается официально оформленными актами.

**Апробация работы и публикации.** Материалы диссертации докладывались в 2000-2002 годах на Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические вопросы современных информационных технологий», на семинарах БИЕН БНЦ СО РАН, на семинарах ВСГТУ (г. Улан-Удэ), на семинаре каф. «Автоматы» СПбГТУ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы - стр. 118, 50 иллюстраций. Список литературы насчитывает 106 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель, основные задачи, основные положения, выносимые на защиту, дается обзор содержания диссертации по главам приво-

дятся краткие сведения о публикациях, внедрении и апробации материалов диссертации.

Первая глава посвящена выводу основных геометрических и кинематических соотношений для новых механизмов манипуляторов с двумя и тремя вращательными кинематическими парами при непараллельности их осей; показано, что при определенных и постоянных соотношениях между угловыми скоростями вращения звеньев для концевой точки механизма могут быть получены трехмерные траектории с точками мгновенной остановки, близкие по конфигурации типовым траекториям рабочих органов манипуляторов обычных роботов, работающих в цилиндрической системе координат. Число точек мгновенной остановки определяется таким же соотношением между угловыми скоростями звеньев, как и в случае плоского двухзвенного гипоциклоидального механизма манипулятора. Кинематические схемы таких манипуляторов (двухзвенного и трехзвенного) и общий вид воспроизводимых траекторий показаны на рис. 1 - 4.

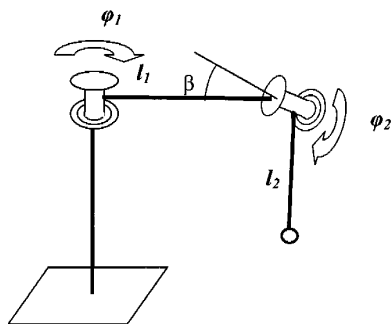


Рис. 1

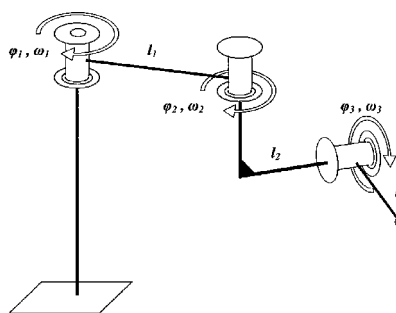


Рис. 2

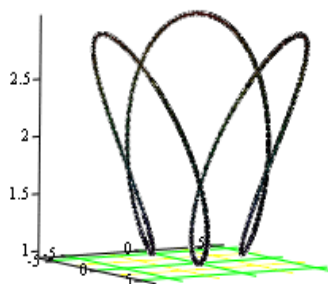


Рис. 3

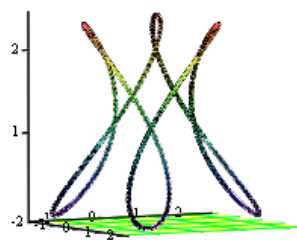


Рис. 4

Таким образом, циклоидальные механизмы, выполненные по рассматриваемым схемам с непараллельными осями, формируют чисто кинематическими средствами траектории рабочего органа, сходные с типовыми траекториями схватов простейших промышленных роботов с цикловым программным управлением, работающих в цилиндрической системе координат. Захватывание и отпускание объекта осуществляется в точках мгновенной остановки на нижнем уровне, а перенос – на верхнем. При правильно выбранных параметрах манипулятора вблизи точек мгновенной остановки перемещения захватного устройства близки к вертикальным, что часто требуется для нормального выполнения процесса захватывания. Число точек мгновенной остановки задается соотношением постоянных угловых скоростей звеньев, отношение угловых скоростей должно быть целочисленным, как и у плоского циклоидального механизма. У трехзвенного манипулятора имеется то дополнительное преимущество, что при переносе на верхнем уровне объект приближается к главной оси. Получены расчетные формулы для геометрических и кинематических параметров траекторий (линейных скоростей и ускорений), результаты расчетов представлены в виде графиков.

Имеется в виду, что циклоидальный манипулятор, воспроизводящий пространственные траектории, может быть реализован на базе единственного привода с использованием передачи для приведения во вращение второго звена. Однако показано, что при определенных условиях целесообразно в каждом шарнире устанавливать самостоятельный привод, а затем с помощью устройства управления синхронизировать приводы, согласовывать углы поворота и угловые скорости. Основой исследования являются геометрические соотношения, определяющие законы изменения координат концевой точки во времени при номинальных значениях параметров. Значительное внимание уделено получению приближенных выражений для

геометрических и кинематических параметров вблизи точек мгновенной остановки, эти выражения используются для оценки интервала времени, выделяемого на захватывание объекта.

Во второй главе рассматривается новая задача передачи объекта манипулирования с одного конвейера или технологического ротора на другой без их остановки, во время движения при условиях безударного взаимодействия объекта с захватным устройством с помощью двухзвенного циклоидального манипулятора с плоским механизмом. Если скорости лент транспортеров одинаковы, то может быть использован однозвенный переключатель. Однако имеется в виду, что ориентации лент транспортеров и их скорости перемещения могут быть различными (рис. 5).

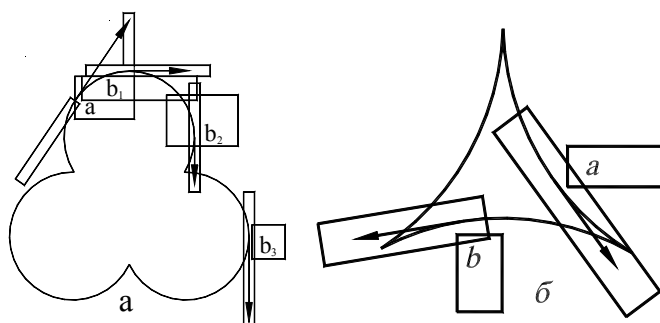


Рис. 5

Специфика задачи заключается в том, что на позициях захватывания объекта с ленты первого транспортера и установки его на ленту второго транспортера должна осуществляться не мгновенная остановка, а требуется уравнивание векторов линейных скоростей захватного устройства манипулятора и той точки транспортера, в которой находится объект. Уравнивание скоростей осуществляется за счет выбора положения главной оси манипулятора, длин звеньев и угловой скорости первого звена. В общем виде получены условия уравнивания скоростей. Показано, что использование циклоидальных кривых с точками возврата и без них (петлеобразных и волнообразных) позволяет обеспечивать получение в определенных пределах требуемых значений отношения и направления абсолютных линейных

скоростей объекта в моменты его захватывания и установки. В зависимости от расположения главной оси циклоидального манипулятора и выбора для переноса объекта того или иного участка циклоидальной кривой можно в определенных пределах варьировать время переноса. Установлено, что в зависимости от того, на каких участках циклоидальной траектории осуществляется выравнивание скоростей захватного устройства и транспортера, значительно изменяется характер относительного движения. Получены приближенные выражения законов относительного перемещения захватного устройства и объекта, еще находящегося на ленте транспортера, в зоне захватывания. Основными параметрами при этом являются составляющие относительного ускорения в точке мгновенной остановки. Новыми являются предложения для использования циклоидальных манипуляторов в качестве демонстрационных роботов, которые могут быть с успехом использованы на выставках, в рекламных стендах и пр. Приведены примеры организации циклов очень быстрой перекладки, осуществляемой циклоидальным манипулятором. Представляется, что реализация указанных предложений в демонстрационных установках способна привлечь внимание зрителей. В этой же главе также обсуждены возможности использования различных режимов работы манипулятора и соответственно получения траекторий, обладающих специфическими особенностями.

Третья глава посвящена проблематике создания захватных устройств, способных захватывать объекты в процессе движения. При использовании принципа чисто механического захватывания (зажиманием объекта между рабочими элементами) предпочтение отдается пассивным схватам (без двигателей), захватывающим объекты только за счет перемещения звеньев основных механизмов и удерживающих объекты за счет упругих сил. Предложены некоторые новые схемные решения таких схватов, выполнен их сопоставительный анализ. При гипотезе квазистатичности процесса захва-

тывания выполнен силовой анализ процесса захватывания с учетом способа задания переменной или поддержания постоянной угловой ориентации. Применительно к циклоидальному манипулятору значительный интерес представляет работа сил трения между объектом и рабочими элементами в процессе захватывания. Получены формулы для этой работы, которая зависит от усилия захватывания и геометрических параметров. При быстром протекании процесс захватывания можно представить, как неупругий удар. Потери энергии в этом процессе требуют увеличения мощности двигателей приводов.

В четвертой главе рассматриваются задачи динамики и управления циклоидальных манипуляторов. При исследовании динамики исходными являются дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода. Динамика свободных движений и большой группы вынужденных движений двухзвенного плоского механизма (в виде двойного маятника) при отсутствии и при наличии диссипативных сил была исследована ранее на основе решений этих уравнений. Однако еще в диссертации Д.Д. Хозонхоновой было показано, что основные выводы по динамическим эффектам, в первую очередь представляющие интерес для практики, получаются без интегрирования дифференциальных уравнений динамики двухзвенного механизма, а только при использовании интегралов энергии. В четвертой главе данной диссертации ставятся и решаются новые задачи также преимущественно на основе использования интегралов энергии. Прежде всего, проведено исследование влияния такого фактора, как изменение приведенной массы механизма манипулятора при захватывании и освобождении переносимого объекта манипулирования. В пренебрежении потерями на силы трения получается, что при движении захватного устройства по участку траектории между двумя точками мгновенной остановки этап переноса объекта имеет большую длительность, чем этап аналогичного холостого хода. Получены

формулы для расчета этого приращения времени, которое тем больше, чем больше масса переносимого объекта, результаты расчетов представлены в виде графиков. Из анализа интегралов энергии получено, что важную роль играют потери энергии при действии сил трения в процессе захватывания, который подобен неупругому удару. При захватывании объекта с подвижного основания и освобождении его не в точках мгновенной остановки, а во время движения проведенный расчет по интегралам энергии приводит к выводу, что приращение энергии за цикл может быть как положительным, так и отрицательным. В зависимости от этого или мощность двигателя привода может быть уменьшена, или требуется увеличение мощности. Получены формулы для расчета этого показателя. В этой же главе рассмотрены вопросы автоматического управления циклоидальными манипуляторами, выполненными по любым схемам. Циклоидальные манипуляторы приспособлены для работы в цикловом режиме, время цикла можно изменять в широких пределах изменением установки для постоянной угловой скорости приводов, но соотношение интервалов времени этапов цикла остается постоянным. При этом типичным является такой принцип организации роботизированным участком, при котором устройство управления манипулятором управляет также обслуживаемым оборудованием. В обратную связь включаются импульсные датчики, которые выдают синхронизирующие импульсы при прохождении поворотными частями манипулятора определенных положений. Чем большее число импульсов приходится на один оборот, тем большая точность достигается для положения точек мгновенной остановки. При невысоких требованиях к точности достаточно установки в любом положении простых по устройству датчиков, выдающих по одному импульсу за один оборот. В заключение главы приводятся краткие сведения об экспериментальных исследованиях на макете и о внедрении. Макетный экземпляр манипулятора был спроектирован изготовлен в лабо-

ратории робототехники БИЕН СО РАН, были предусмотрены возможности изменения параметров и режимов работы.

Выводы по диссертационной работе в целом сформулированы в Заключении.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты диссертационной работы формулируются следующим образом.

1. Предложено использовать в механизмах циклоидальных манипуляторов вращение звеньев вокруг непараллельных осей, в результате чего траектории захватного устройства получаются пространственными. Двухзвенный циклоидальный манипулятор с ортогональными осями кинематических пар позволяет осуществлять перенос на верхнем уровне с точками мгновенной остановки на нижнем уровне. Исследована геометрия и кинематика такого манипулятора.

2. Предложена схема трехзвенного циклоидального манипулятора, показано, что такой манипулятор позволяет воспроизводить сложные пространственные траектории, сходные с типовыми траекториями рабочих органов типовых промышленных роботов, работающих в цилиндрической системе координат. Определены параметры траекторий, воспроизводимых такими манипуляторами.

3. Показано, каким образом циклоидальные манипуляторы-перекладчики позволяют автоматизировать операции перекладки объектов манипулирования с одного движущегося основания (ленты конвейера или ротора) на другое, а также осуществлять захватывание с неподвижного основания и сбрасывание во время движения, сортировку с установкой разных объектов на различные транспортеры и т.п. Разработанная методика геометрического и кинематического синтеза дает возможность расчетно определять параметры манипулятора по заданным начальным и конечным векторам скоростей.



4. Показано, каким образом циклоидальные манипуляторы как самостоятельно, так и во взаимодействии с другими устройствами целесообразно использовать как эффектные объекты демонстрации на выставках и презентациях.

5. Применительно к циклоидальным манипуляторам осуществлена доработка общей теории захватных устройств. С учетом движения и поворотов схвата и конечности размеров объекта, а также погрешностей по координатам относительного положения и составляющим относительной скорости получены условия осуществления нормального процесса захватывания.

6. В результате прямого использования энергетических соотношений для базовой схемы установлены и количественно оценены ранее неизвестные эффекты увеличения времени фазы переноса объекта по сравнению с фазой холостого перемещения и определена дополнительная мощность привода, необходимая для установки объектов на подвижное основание или освобождение объекта в процессе движения.

7. Из решения прямой задачи динамики на основе использования интегралов энергии и кинетического момента получены законы изменения моментов приводов, необходимых для поддержания постоянных угловых скоростей для механизма пространственного манипулятора, а из решения обратной задачи динамики получены законы изменения угловых скоростей звеньев при отсутствии сил сопротивления.

8. Проведен сопоставительный анализ двух способов построения системы автоматического управления, когда или синхронизация следящих приводов осуществляется параллельно или следящий привод подстраивается к первому, работающему по разомкнутой схеме.

9. Испытания, проведенные на макете модернизированного циклоидального манипулятора, позволили подтвердить работоспособность устройств, выполненных по новым схемам, наблюдать эффекты, предсказан-

ные теоретически, а результаты испытаний удовлетворительно соответствуют теоретическим оценкам.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях

1. Никифоров С.О., Челпанов И.Б., Знаменский И.С., Соколов В.А., Мандаров Э.Б. Демонстрационные роботы: цели создания, разновидности и задачи механики. // Материалы научно-практической конференции «Проблемы механики современных машин». Улан – Удэ: Из-во ВСГТУ, 2000. – С. 32-45

2. Никифоров С.О., Мархадаев Б.Е., Мандаров Э.Б. Роторные манипуляторы. // Информационные технологии контроля и управления на транспорте. Иркутск: ИРГУПС, Вып. 9., 2001 - С. 167-175.

3. Никифоров С.О., Мандаров Э.Б., Челпанов И.Б. Задачи кинематики вспомогательных промышленных роботов при захватывании объектов во время движения. // Материалы научной сессии РАН «Кинематика и динамика сложных механических систем». Улан – Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002.

4. Никифоров С.О., Челпанов И.Б., Мандаров Э.Б. Процессы захватывания объекта в циклоидальных мехатронных устройствах во время движения. // Материалы международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование». Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002. – С. 283-288.

5. Никифоров С.О., Мандаров Э.Б., Челпанов И.Б. Применение циклоидальных мехатронных устройств в демонстрационных стендах. // Материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий». Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, Часть 1 – С. 53-56.

6. Никифоров С.О., Мандаров Э.Б., Никифоров Б.С. Мехатронные устройства машинного орнаментирования изделий. Улан – Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2002. – 153 с.