

На правах рукописи

АННАБИ Мохамед Хабиб

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ
ОТРАБОТКИ РОБОТАМИ ПРОГРАММНЫХ
ТРАЕКТОРИЙ**

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 «Автоматы» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бурдаков Сергей Федорович.
кандидат технических наук.
Шульгина Марина Юрьевна.

Ведущая организация: ООО ``Фесто - РФ``,СПБ.

Защита состоится 4 ноября 2003 г в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при 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 03 Октябрь 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12
кандидат технических наук, доцент

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. К настоящему времени разнообразие роботов, классифицируемых по назначению, характерным признакам принципиального, схемного и конструктивного решений, чрезвычайно широко. Обзору современного типажа роботов в данной диссертации уделяется определенное внимание. Однако вне зависимости от назначения за последние десятилетия в робототехнике вполне определилась приоритетная научная проблематика. Проблема обеспечения требуемой или предельно возможной точности промышленных роботов (ПР) была одной из центральных в робототехнике, начиная с ее рождения, она полностью сохраняет актуальность и в наше время. За два последних десятилетия в монографической и учебной литературе, в публикациях в периодических изданиях, в сборниках и трудах научных конференций проблематике точности ПР неизменно уделяется большое внимание.

Однако расширение вычислительных возможностей общедоступного стандартного программного обеспечения современных компьютеров привело к весьма спорному представлению, что анализ точности ПР всегда необходимо строить на основе максимально сложных математических моделей, в которых учитывается как можно больше влияющих факторов. Из этого как будто следовал некорректный вывод, что задачи анализа точности в робототехнике, приводимые к простым математическим моделям, не представляют интереса.

Последовательная реализация этих представлений приводила к тому, что центр тяжести переносился на процедуры составления больших систем дифференциальных уравнений движения. Новизна теоретических исследований определялась преимущественно тем, что в математических моделях учитывалось все большее число факторов и вводилось все большее число параметров. Составление уравнений даже с учетом

упругости звеньев, погрешностей геометрических параметров, погрешностей в кинематических парах механизмов, зазоров, свойств следящих приводов и т.п. принципиальных трудностей не представляет. В настоящее время системы нелинейных дифференциальных уравнений для типовых промышленных роботов при математическом моделировании обычно имеют порядок 10-20, но бывает и значительно больше. При этом проблема задания большого числа параметров систем этих дифференциальных уравнений лишь в небольшой части решалась теоретически, определение многих коэффициентов по существу требовало больших объемов целенаправленных экспериментальных исследований, что крайне редко реализовывалось на практике. Кроме того, использование максимально полных громоздких математических моделей при численных расчетах динамических процессов приводило к тому, что анализ результатов с выявлением отдельного влияния факторов требовал серьезной самостоятельной научно-исследовательской работы.

В восьмидесятых годах, в связи с разработкой комплекса государственных стандартов «Роботы промышленные» явно обнаружилось противоречие между сложными процедурами расчета показателей точности и требованиями представления в технической документации этих показателей немногими, простыми по форме и достаточно просто контролируемыми нормируемыми характеристиками. Если для ПР с цикловым управлением эти трудности, по крайней мере в основном, были преодолены, то для ПР с контурным управлением были даже неясны пути сближения теоретических исследований с идеологией испытаний и нормирования показателей точности. Представляется, что такое сближение практически возможно на пути не формального усложнения математических моделей, а их обоснованного упрощения.

Применительно к нормированию показателей точности оказался важным вид автоматического управления. В семидесятых-восьмидесятых годах XX века программное управление (иногда его называли

жесткопрограммным) не только роботами, но и другого автоматического и автоматизированного оборудования противопоставлялось более совершенным: адаптивным, интерактивным, интеллектуальным. Предполагалось, что со временем сферы применения жесткопрограммного управления будут сужаться, а более совершенных – расширяться.

Однако опыт последующего периода показал, что реальные возможности и эффективность применения того или иного вида систем автоматического управления в значительной мере определяется не возможностями запоминания и воспроизведения очень сложных программ, не адаптивностью и наличием элементов искусственного интеллекта, а надежностью преимущественно в условиях стабильности и определенности конкретных требований к выполняемым операциям.

На крупносерийных и среднесерийных машиностроительных и приборостроительных производствах с хорошо отлаженными производственными циклами и стабильным качеством заготовок и комплектующих наибольшее распространение получили самобалансирующиеся манипуляторы с автоматическим уравниванием груза и ПР с программным (жесткопрограммным) управлением. Проблема точности оказалась наиболее сложной при контурном управлении, когда задаются траектории движения рабочего органа, законы изменения углов его ориентации, а также линейные и, возможно, угловые скорости.

Объектом рассмотрения в данной диссертации являются ПР с автоматическим контурным программным управлением, к точности перемещения рабочих органов которых предъявляются высокие требования. Предполагается, что для рабочих точек рабочих органов (например, лазерных головок для резки листового материала, сварочных электродов, резцов, силовых головок с инструментом для фрезерования или гравировки и т.п.) тем или иным способом задаются программные траектории. По этим траекториям и скоростям перемещения из решений

обратной задачи геометрии рассчитываются законы координированного изменения во времени обобщенных координат механизма манипулятора ПР и выходных звеньев приводов. Эти программы должны с высокой точностью отрабатываться приводами по степеням подвижности.

В данной диссертации исследование точности представляется целесообразным строить на основе обобщения и доработки разработанной в два последних десятилетия общей методологии нормирования и наглядного представления показателей статической точности ПР. Чтобы получать результаты в обозримом виде, необходимо максимально простое описание динамики ПР, которое позволяло бы достаточно просто описывать динамические погрешности и устанавливать их зависимость от основных параметров ПР. Поэтому задачи разработки приближенных методов анализа динамики роботов, при ориентации на оперативное получение результатов с возможностью простого оценивания влияния различных факторов и требований нормирования являются актуальными.

Основной целью в диссертации является разработка и опробование такого приближенного метода анализа динамических погрешностей воспроизведения программных траекторий рабочим органом ПР, который не требует интегрирования систем дифференциальных уравнений движения, а позволяет оценивать отклонения формы и параметров программных траекторий только по кинематическим параметрам. При этом динамические характеристики системы в целом, независимо от сложности, задаются немногими коэффициентами.

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

- представить в систематизированном виде основные подходы и методы представления и нормирования погрешностей позиционирования и отработки программных траекторий рабочих органов ПР;

- на основе приближенного представления передаточных функций приводов в виде суммы немногих первых членов степенного ряда

сформулировать процедуры и расчетные методики приближенного определения динамических погрешностей при отработке программных траекторий ПР с контурным управлением;

- для типовых кинематических схем манипуляторов ПР с двумя и тремя переносными степенями подвижности по коэффициентам скоростных ошибок рассчитать законы изменения динамических погрешностей рабочих органов при отработке простейших (прямолинейных и круговых) гладких программных траекторий;

- сформулировать и определить пути компенсации систематических погрешностей отработки программных траекторий;

- применительно к различным сферам применения роботов выверить и систематизировать терминологию на французском языке.

Основные положения, выносимые на защиту:

- при анализе показателей точности манипуляционных роботов, когда ставится задача максимально полного представления свойств погрешностей с учетом большого числа влияющих факторов, целесообразно использовать опыт нормирования статических показателей точности станков, другого автоматического оборудования в машиностроении и средств измерений в метрологии;

- при оценках точности воспроизведения плавных программных траекторий рабочими органами ПР с контурным управлением использование только первых слагаемых разложения в ряд передаточных функций приводов с постоянными коэффициентами ошибок позволяет исключить процедуры интегрирования дифференциальных уравнений и основываться только на результатах расчета кинематических параметров программного движения;

- использование коэффициентов динамических погрешностей позволяет значительно упрощать процедуры идентификации динамических характеристик роботов с контурным управлением и

допускает логичное и достаточно простое обобщение результатов на случай наличия нелинейностей;

- описание динамики с помощью систем коэффициентов динамических погрешностей ПР, в первую очередь, коэффициентов скоростных ошибок позволяет аналитически и наглядно графически представлять характерные искажения типовых программных траекторий и оценивать максимальные отклонения;

- использование выражений для динамических погрешностей при их расчете по коэффициентам ошибок предоставляет возможности их достаточно простого аппроксимирования и выработки корректирующих поправок.

Методы исследования. При построении математических моделей и при решении задач геометрии, кинематики и динамики манипуляторов использовались методы теоретической и аналитической механики, теории механизмов. При обосновании предлагаемого метода описания динамических погрешностей приводов использованы основные положения теории автоматического управления. При проведении на компьютере численных расчетов использовались универсальные программы *Mathcad* и *Mathlab*.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- предложен конструктивный путь построения упрощенной универсальной математической модели динамики манипулятора ПР с контурным управлением для случаев воспроизведения гладких траекторий и плавных движений;

- предложенный способ оценки динамических погрешностей обобщен на случай нелинейных характеристик элементов систем автоматического управления манипулятором;

- для типовых кинематических схем манипуляторов определен характер искажений программных траекторий, обусловленный

динамическими погрешностями, пропорциональными составляющим скорости;

- сформулированы и обоснованы способы формирования поправок на программные законы движения, компенсирующих динамические погрешности, которые рассчитываются по разработанным математическим моделям.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научных семинарах кафедры «Автоматы» СПбГПУ 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 простые способы расчета динамических погрешностей манипуляторов ПР с контурным управлением и оценки их максимальных значений, что позволяет обоснованно выбирать параметры программных движений и достаточно просто формировать в устройствах управления корректирующие поправки, значительно уменьшающие остаточные погрешности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации 115 страниц, в тексте имеется рисунков.

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 постановке задач оценивания точности позиционирования и отработки программных траекторий манипуляторами ПР с учетом большого числа влияющих факторов. Для ПР с цикловым

программным управлением известны общепринятые подходы к нормированию и представлению показателей точности позиционирования в конечных положениях (в статике). Погрешности по линейным перемещениям и углам поворота рассматриваются как векторы. Каждая из погрешностей имеет систематическую и случайную составляющие. Далее частные погрешности, обусловленные различными факторами целесообразно классифицировать по большому числу независимых или слабо связанных признаков. Несмотря на большое число исследований, посвященных анализу погрешностей роботов, принципы нормирования показателей точности роботов окончательно не проработаны. В данной диссертации показано, что при формализованном представлении показателей точности позиционирования необходимо учитывать такие факторы, как ориентация осей координат, положение и ориентация рабочего органа в рабочей зоне и т.д. При нормировании дополнительно необходимо учитывать такое свойство, как стабильность. Констатируется, что применительно к погрешностям отработки программных траекторий при контурном управлении (в динамике) имеются серьезные трудности. При определении характеристик динамических погрешностей требуются приближенные методы расчета, которые позволили бы получать оценки динамических погрешностей отработки программных траекторий и максимальных значений отклонений реальных траекторий от программных в аналитической форме. В заключение первой главы формулируются основные задачи исследования в диссертации.

Вторая глава посвящена формулировке и обоснованию предложений по приближенному расчету законов изменения динамических погрешностей отработки программных траекторий рабочих органов ПР с контурным управлением. Предполагается, что манипулятор, как управляемая электромеханическая система стационарна, линейна относительно погрешностей отработки программных траекторий, приводы по степеням подвижности динамически развязаны, так что можно

пренебрегать воздействием сил статических и динамических нагрузок, программные движения на участках выполнения технологических операций являются медленными, а траектории движений являются гладкими, параметры следящих приводов и цепей коррекции выбраны так, что обеспечены достаточно большие запасы устойчивости и переходные процессы аperiodичны. Анализ реальных данных по роботам показывает, что с приемлемой точностью эти упрощения можно принять.

Сначала рассматривается один из следящих приводов манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности. Для этого привода определяется программный закон изменения параметра выходного звена. Входным параметром считается программа по перемещению выходного звена механизма, а выходом считается погрешность отработки траектории. записывается дробно-рациональная передаточная функция для суммарной погрешности

$$W(p) = P(p)/Q(p) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0)(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0)^{-1} \quad (1)$$

Дробно-рациональное выражение передаточной функции $W(p)$ формально может быть записано в виде степенного ряда

$$W(p) = c^{(0)} + c^{(1)} p + c^{(2)} p^2 + \dots \quad (2)$$

Этому соответствует представление ошибки $e(t)$ воспроизведения программы $u(t)$

$$e(t) = - [c^{(0)} u(t) + c^{(1)} du(t)/dt + c^{(2)} d^2 u(t)/dt^2 + \dots] \quad (3)$$

При относительно медленных и плавных изменениях $u(t)$ достаточно ограничиваться первыми слагаемыми выражения (3). Слагаемое $- c^{(0)} u(t)$ представляет собой статическую погрешность, в нее могут быть включены составляющие, обусловленные большим числом факторов (в том числе неидеальностью механизма, упругими прогибами и пр.). По существу именно статические погрешности лучше всего изучены, результаты широко представлены в специальной литературе.

В данной диссертации принимается, что динамическая погрешность для каждого привода с достаточной точностью определяется слагаемым -

$c^{(1)} du(t)/dt$, которое пропорционально скорости и часто квалифицируется, как скоростная ошибка. Коэффициент $c^{(1)} = T^{(1)}$ имеет размерность и смысл постоянной времени и характеризует эквивалентное запаздывание. Имеется в виду, что для разных приводов эти постоянные времени различаются, что приводит к погрешностям обработки программных траекторий. Если система имеет астатизм второго порядка, то $c^{(1)} = 0$ в динамической погрешности основным является следующее слагаемое с коэффициентом $c^{(2)}$.

Далее во второй главе рассматриваются геометрические задачи определения и нормирования погрешностей обработки программных траекторий механизмами манипуляторов с несколькими степенями подвижности. Приводятся и описываются различные способы задания этих показателей точности, проведено их сравнение и доказано, что различие между ними невелико. В заключение главы определена и обоснована вычислительная процедура расчета динамических погрешностей обработки программных траекторий. Она приведена ниже на рис. 1.

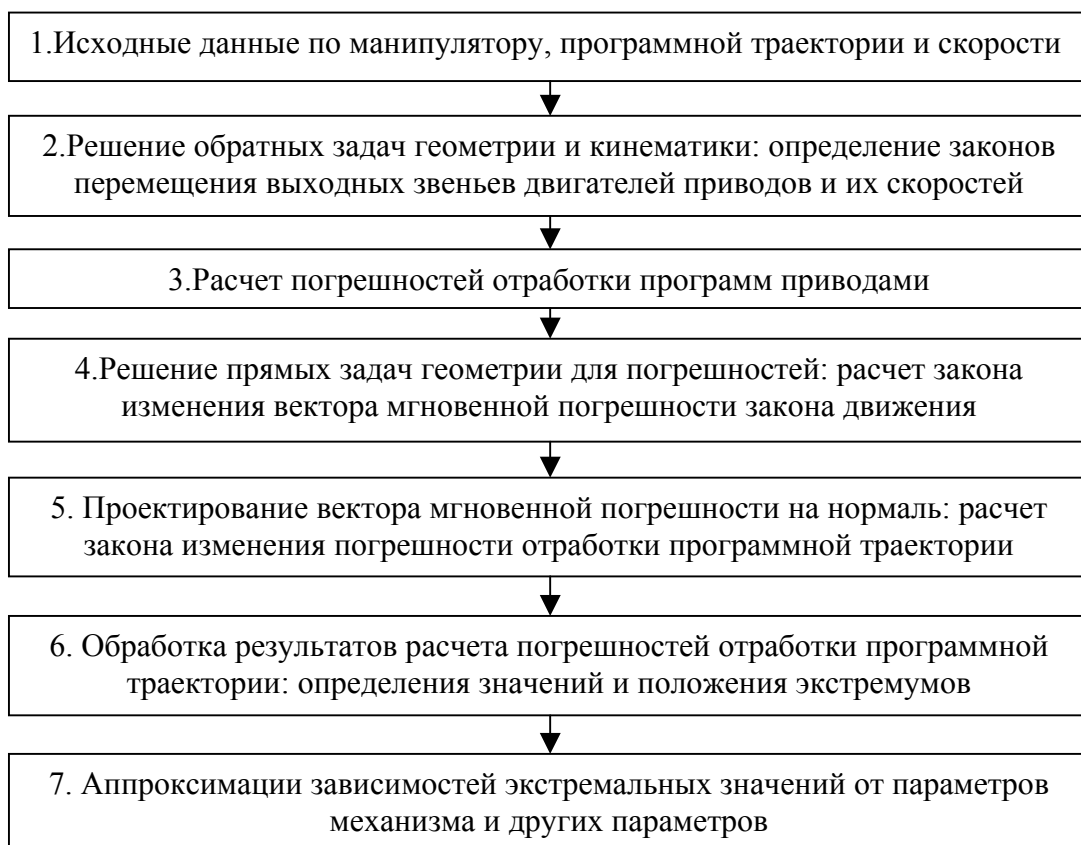


Рис. 1.

На основе расчетов формулируются окончательные рекомендации по выбору способа определения и представления динамических погрешностей отработки программных траекторий. Предложенная блок-схема алгоритма, включающая заключительный этап вычисления компенсирующих поправок на скоростные погрешности, позволяет унифицировать вычислительные процедуры на базе универсального программного обеспечения. Реализующая этот алгоритм программа была использована в третьей главе при выполнении конкретных расчетов.

В третьей главе разработанный автором метод приближенного расчета динамических погрешностей отработки типовых программных траекторий (прямолинейных и круговых) при учете только ошибок приводов, пропорциональных (с коэффициентами c_i , в общем случае различными) составляющим скоростей выходных звеньев приводов, применен для плоских механизмов манипуляторов, работающих соответственно в прямоугольной, полярной и ангулярной системах координат.

Для воспроизведения прямолинейной и круговой траекторий механизмом манипулятора, работающего в прямоугольной системе координат (рис.2.а), получены расчетные формулы для смещения по нормали реальных траекторий относительно программных. Для такого манипулятора при воспроизведении прямолинейной траектории с постоянной скоростью при различии коэффициентов скоростных ошибок c_1 и c_2 двух приводов имеет место параллельное смещение на постоянную величину (рис.2.б), зависящую от угла ориентации. Показано, каким образом проще всего формировать поправки, компенсирующие динамические погрешности. Максимальное смещение имеет место при угле наклона 45^0 . Направление смещения изменяется при изменении направления движения. Для того же манипулятора динамические погрешности воспроизведения круговой программной траектории приводят к эллиптичности (рис.2.в), наклон большой оси эллипса

составляет или 45^0 или 135^0 и изменяется при изменении направления обхода. Рассматриваемая динамическая погрешность четыре раза обращается в нуль, а в промежутках принимает экстремальные значения.

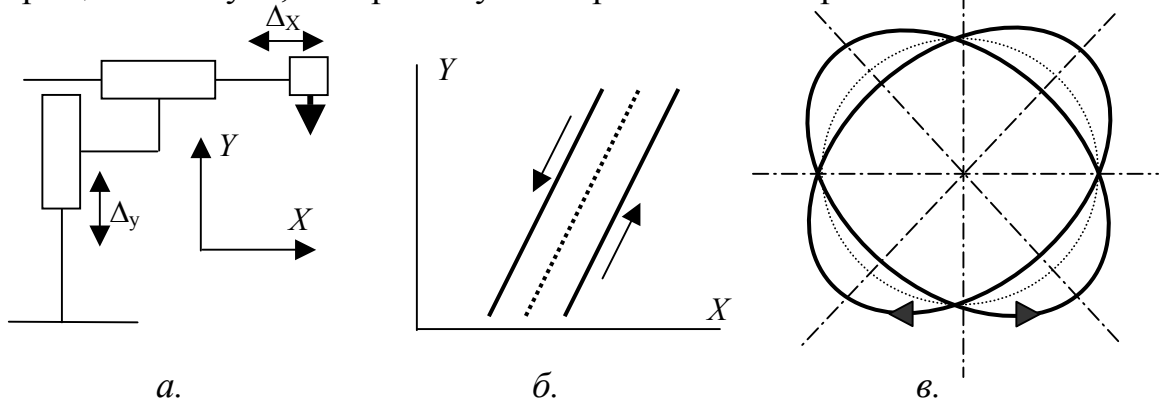


Рис.2.

Кратко рассмотрены случаи воспроизведения замкнутого или незамкнутого контура, представляющего собой ломаную. Сформулирована и формализована задача анализа точности при учете случайности влияющих факторов. Показано, что большинство выводов и количественных оценок сохраняется для трехстепенного манипулятора, работающего в прямоугольной системе координат.

Далее рассмотрен манипулятор, работающий в цилиндрической системе координат (рис. 3 а).

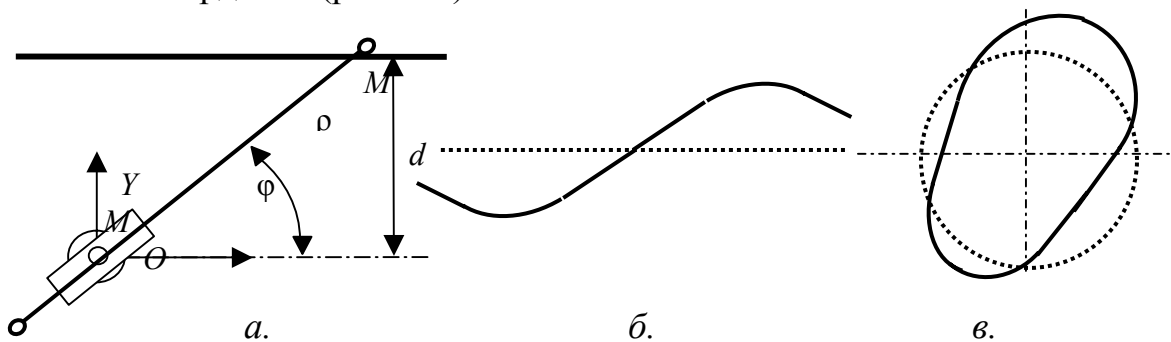


Рис.3.

Для этого манипулятора при воспроизведении прямолинейной траектории с постоянной скоростью при различии коэффициентов скоростных ошибок c_1 и c_2 двух приводов получена система уравнений для законов изменения динамических погрешностей по траектории.

Погрешность по мере движения сначала увеличивается, достигает максимума, затем убывает, проходит через нуль и далее повторяется

центрально-симметрично (рис.3.б). Характер погрешностей при воспроизведении круговой траектории для того же манипулятора, работающего в цилиндрической системе координат (рис.3.в), имеет существенные особенности, наблюдается более или менее значительный отход от эллиптичности. Важно, что погрешности отработки программных траекторий существенно зависят от их положения в рабочей зоне. Значительно сложнее решаются вопросы формирования компенсирующих поправок на динамические погрешности.

Аналогичное исследование проведено для манипулятора, работающего в ангулярной системе координат и имеющего две вращательные кинематические пары. При этом существенным является фактор неортогональности сетки направлений малых перемещений при раздельной работе приводов. Получена система уравнений для погрешностей воспроизведения прямолинейных и круговых траекторий, на примерах показано, что для данной схемы факторы расположения и ориентации отрезков воспроизводимых траекторий оказываются более существенными, чем для других схем манипуляторов.

В Приложении приводится составленный автором краткий трехязычный (русско-англо-французский) словарь терминов в области робототехнике, характеризующих назначение роботов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации, формулируются следующим образом.

1. Разработаны и обоснованы предложения по нормированию погрешностей позиционирования и отработки программных траекторий промышленными роботами с учетом большого числа классифицированных влияющих факторов.

2. Обосновано положение, что для описания свойств и нормирования динамических погрешностей воспроизведения программных траекторий целесообразно использовать наиболее простые математические модели динамики манипуляторов.
3. При воспроизведении гладких программных траекторий роботами с контурным автоматическим управлением оценки динамических погрешностей предложено производить по коэффициентам скоростных ошибок приводов. При этом не возникает необходимость интегрирования дифференциальных уравнений движения, а указанные погрешности непосредственно выражаются через кинематические величины (составляющие скорости).
4. Проведенный анализ показал, что при неоднозначности выбора способа отсчета отклонений по нормали к программной траектории количественное различие между результатами расчетов различными способами мало, и поэтому обоснован выбор в пользу наиболее простой процедуры.
5. Установлено, что свойства динамических погрешностей для манипуляторов, работающих в различных системах координат, описываются сходными уравнениями, но существенно различаются по свойствам.
6. Аналитически и расчетно показано, что для механизма манипулятора, работающего в прямоугольной системе координат, характерно зависящее от угла ориентации смещение при воспроизведении прямолинейной программной траектории и эллиптическое искажение круговой траектории.
7. Для манипулятора, работающего в цилиндрической (на плоскости – в полярной) системе координат, характерно изменение знака отклонения по длине отрезка прямолинейной траектории, а при воспроизведении круговой траектории при сохранении

эллиптичности имеют место дополнительные искажения формы, чем большие, чем больше радиус траектории.

8. Для манипулятора, работающего в ангулярной системе координат, существенен фактор неортогональности главных направлений, в результате чего дополнительные искажения программных траекторий значительно изменяются по рабочей зоне.
9. Задачи коррекции программных траекторий для уменьшения динамических погрешностей решаются просто только для немногих частных случаев (прямоугольная система координат, прямолинейность траектории) смещением программной траектории, в большинстве случаев как правило необходимо использовать кусочно-линейные или кусочно-круговые аппроксимации.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аннаби М.Х., Челпанов И.Б. Визуализация показателей точности движения по программным траекториям // Труды СПбГПУ. Материалы VI Всероссийской конференций по проблемам науки и высшей школы. Фундаментальные исследования в технических университетах.- Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2002.- С.96-97.
2. Аннаби М.Х., Челпанов И.Б. Задачи и приближенные методы исследования погрешностей отработки траекторий промышленными роботами при контурном управлении // Труды СПбГПУ. Материалы VI Всероссийской конференций по проблемам науки и высшей школы. Фундаментальные исследования в технических университетах.-Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2002.-С.97-98.
3. Аннаби М.Х., Челпанов И.Б. Исследование точности воспроизведения программных траекторий роботами при учёте скоростных ошибок// Труды СПбГПУ. Материалы VII Всероссийской конференций по проблемам науки и высшей школы. Фундаментальные исследования в

технических университетах.-Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2003.- С.197-198.

4. Аннаби М.Х., Челпанов И.Б. приближенный метод исследования погрешностей отработки траекторий промышленными роботами : Учебное пособие.- Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2003.-32с.
5. Аннаби М.Х., Челпанов И.Б. Типаж роботов и нормирование их точностных характеристик : Учебное пособие.-Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ.-2003.- 36с.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать

Объем в п.л.

Тираж 100.

Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,

в типографии Издательства СПбГПУ.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Отпечатано на ризографе RN-2000FP

Поставщик оборудования фирма ``Р-ПРИНТ``

Телефон: (812) 110-65-09

Факс: (812) 315-23-04