

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

УДК 621.9:519.8

АБДУЛЛАЕВ АЛИБЕК КОДИРАЛИЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ
ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ташкент - 2010

Работа выполнена в Институте математики и информационных технологий АН РУз

Научный руководитель доктор технических наук
Онорбоев Боходир Очилбоевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Рахматуллаев Марат Алимович

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
Рузикулов Акбар Расулович

Ведущая организация - Ташкентский государственный
технический университет

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в ____ часов на заседании специализированного совета Д 015.17.02 при Институте математики и информационных технологий АН РУз по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института математики и информационных технологий АН РУз.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь специализированного
совета

Исмаилов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. На сегодняшний день в Республике Узбекистан в целях улучшения качества производимого товара, обеспечения внутреннего и внешнего рынка конкурентоспособным товаром и использования местных материалов большое внимание уделяется привлечению внешних инвестиций, модернизации технического и технологического перевооружения производства. День за днем усиливаются требования к качеству товара, производимого автоматическими средствами производства на крупных предприятиях. При автоматизации производства особый интерес представляют роботы, в частности промышленные роботы (ПР). Этот интерес обусловлен как ведущим положением ПР при определении уровня автоматизации производства, так и возможностью их привлечения к выполнению различных функций с малыми издержками в условиях переменного производства и рыночных отношений. В связи с этим всестороннее исследование ПР является требованием сегодняшнего дня.

Известно, что ПР бывают на подвижном и неподвижном основании (последние в литературе называются еще манипуляторами). Движение ПР на подвижном основании делится на две составляющие: движение основания и движение исполнительного механизма. Исполнительный механизм ПР состоит из различных звеньев. С увеличением их количества ПР приобретает вид более сложной технической системы. В зависимости от конструкции движение ПР должно отвечать трем критериям: безопасность, достижимость и устойчивость. При управлении многозвенными подвижными ПР обеспечение этих требований усложняется, так как отдельные звенья должны совершать движение параллельно, а другие – последовательно. Кроме того, в таких случаях наблюдаются уменьшение быстродействия и позиционная точность механизмов, а также увеличиваются издержки. Эти факторы влияют на качество и себестоимость товара. В связи с необходимостью эффективного использования ПР возникает проблема разработки математического и программного обеспечения. Более точное описание движения и учет переменности динамических коэффициентов в модели при математическом обеспечении управления позволяют увеличить позиционную точность движения ПР. Необходимость решения таких научных и практических задач, каковыми являются разработки подобного математического и программного обеспечения, указывает на актуальность темы данной диссертационной работы.

Степень изученности проблемы. Модели движения и управления ПР обычно разрабатываются с учетом двух составляющих системы: основания и исполнительного механизма ПР. Соответственно система управления ПР также состоит из двух частей. Для основания управление будет прямым (непосредственным), а для исполнительного механизма – управление с

обратной связью. Была изучена опубликованная за последние 10-15 лет литература, которая отражает многочисленные достижения в данном направлении. Анализ показывает, что существует ряд недостатков исполнительных механизмов, управляемых системой с обратной связью.

1. При движении робота совместно с деталью в существующих моделях сила тяжести детали учитывается только при расчете последнего звена – захватывающего элемента, а при расчете остальных промежуточных звеньев данный фактор не учитывается.

2. Нелинейность воздействия образуемых при движении ПР силовых факторов на соединения не учитывается; движения промежуточных звеньев описываются дифференциальными уравнениями второго порядка, как показывает анализ литературы, с постоянными коэффициентами. Согласно практике эти дифференциальные уравнения должны учитывать переменность коэффициентов.

3. Первичная ошибка движения ПР на подвижном основании определяется с использованием способов логического дерева возможностей (ЛДВ) и статистического испытания. ЛДВ является коротким и простым способом, который обеспечивает позиционную точность робота на основе законов распределения дискретных первичных ошибок. Но этот способ имеет свои недостатки. В нем модель не явная и принятие решения опирается на знания и выводы лица, которое принимает решение. Во время манипуляции не все параметры учитываются, а логические перемещения звеньев представляются в древообразном виде. ЛДВ более соответствует звеньям, которые совершают последовательное движение. Оно не применимо для звеньев, совершающих движение одновременно.

4. Основная цель, преследуемая от привлечения роботов в производственный процесс, заключается в точном и быстром выполнении всех операций процесса и своевременном обеспечении потребителя качественным продуктом или полуфабрикатом. Особенно это заметно, например, в процессах механической обработки в отрасли машиностроения. При составлении уравнений движения робота учитывают внешние силы, но пренебрегают внутренними силами. Так, например, при движении робота с деталью необходимо учитывать как внешние, так и внутренние силы.

Разработка способов управления исследуемыми объектами, лишенных перечисленных выше недостатков, является одной из актуальных проблем в области исследования.

Связь диссертационной работы с планами НИР.

Диссертационная работа входит в план следующих НИР:

Проект А-14-013. Разработка программных средств диагностирования и

управления компонентами сложных ТС в процессе формообразования деталей на основе IDEF методологии (2006-2008гг.);

Проект А-17-Ф008: Разработка моделей, алгоритмов и программных средств интеллектуального управления и проектирования производственных систем.

Цель исследования. Разработка математических моделей и алгоритмов оптимального управления функционированием промышленных роботов на подвижном основании для обеспечения точности траектории движения и позиционирования.

Задачи исследования:

- исследовать имеющиеся модели движения и способы управления ПР на подвижном основании;
- разработать модель движения ПР на подвижном основании и на ее основе создать математическую модель оптимального управления;
- разработать математические модели, которые позволяют увеличить быстродействие и позиционную точность при выполнении ПР на подвижном основании сложной манипуляции;
- разработать алгоритмы и программные средства общего управления ПР на подвижном основании.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является ПР на подвижном основании, предметом исследования – математическое моделирование и оптимальное управление функционированием рассматриваемых ПР.

Методы исследования. Методы моделирования технологических процессов, теории оптимального управления и механизмов машины.

Гипотеза исследования. Разработка моделей и алгоритмов управления ПР на подвижном основании для получения наилучших динамических показателей с целью повышения быстродействия и позиционной точности манипуляционных операций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- уравнение динамики движения ПР на подвижном основании и построенная на его основе математическая модель оптимального управления;
- математическая модель, обеспечивающая быстродействие сложного пространственного движения исполнительного механизма ПР с учетом переменности динамических коэффициентов;
- математическая модель, которая обеспечивает позиционную точность ПР на подвижном основании;
- обобщенный алгоритм оптимального управления исполнительным механизмом ПР при выполнении сложных манипуляций.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- проведен системный анализ существующих методов управления и моделей промышленных роботов на подвижном основании и определена динамическая ошибка в траектории его движения;
- составлены уравнения движения основания, промежуточных звеньев и захватывающего элемента, на их основе разработана математическая модель оптимального управления;
- решена задача быстродействия с учетом условий наложенных на коэффициенты в динамическом уравнении оптимального управления промышленных роботов на подвижном основании;
- предложена простая и удобная математическая модель для увеличения позиционной точности оптимального движения промышленных роботов на подвижном основании;
- построены обобщенные алгоритмы управления промышленных роботов на подвижном основании и на их основе созданы программные средства расчета оптимальной траектории исполнительного механизма промышленных роботов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость диссертационной работы заключается в определении и оценке динамических ошибок ПР на подвижном основании при выполнении сложных пространственных операций, разработке и теоретическом обосновании их математических моделей и алгоритмов оптимального управления целесообразными траекториями движения исполнительных механизмов посредством увеличения быстродействия и позиционной точности.

Практическая значимость диссертационной работы выражается в возможном использовании программных средств оптимального управления исследованными роботами во всех отраслях народного хозяйства, которые снабжены робототехническими системами, что приводит к минимизации времени производства и экономии энергетических ресурсов.

Реализация результатов. Разработанные на основе математической модели оптимального управления ПР на подвижном основании алгоритмы и программное средство внедрены в Акционерном обществе «Технолог». На примере внедрения в процессе сборки агрегатов доказано, что значительно увеличиваются быстродействие и позиционная точность управляемого ПР; их можно использовать в процессе механической обработки. Годовая экономическая эффективность внедрения на одном ПР составляет 535 тысячи сум (по ценам 2009 года).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: научно-технической и производственной конференции «Проблемы разработки и использования авиакосмической

техники» (Ташкент, 2004); республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий» (Ташкент, 2008); семинаре лабораторий «Управление в технических системах», «Моделирование сложных систем» и научном семинаре при специализированном совете Д. 015.17.02 при Института математики и информационных технологий АН РУз (2010).

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в шести работах, в том числе в трех журнальных статьях. Отдельные результаты диссертационной работы включены в научные отчеты Института математики и информационных технологий АН РУз.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 108 наименований. Общий объем работы – 122 страниц компьютерного текста, включая 21 рисунок и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы. Дано краткое описание основного содержания диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору теоретических и практических результатов по разработке и эффективному использованию робототехнических систем. Перечислены основные научные направления, связанные с затрагиваемой в работе проблемой. Приведены существующие недостатки при управлении ПР и на их основе сформулированы цель и задачи исследования. Намечены способы решения поставленных задач.

Согласно выбранной теме исследования проведен всесторонний анализ существующих фундаментальных и прикладных исследований по моделированию и управлению процессами с участием робототехнических систем. Анализ литературы показал, что своеобразные преимущества результатов по моделированию и управлению движением ПР на подвижном основании, относящиеся к точности системы движения, модели движения и системы управления, следующие:

1. Система движения идентификационная.
2. Система управления детерминирована.
3. Движение описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$\tau(t) = D(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t)),$$

где $\tau(t)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) обобщенных сил, создаваемых силовыми приводами в сочленениях ПР;

$q(t)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) присоединенных переменных ПР;

$\dot{q}(t)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) обобщенных скоростей;

$\ddot{q}(t)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) обобщенных ускорений;

$D(q)$ – симметрическая матрица размерностью $(n \times n)$;

$h(q, \dot{q})$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) кориолисовых и центробежных сил;

$c(q)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) гравитационных сил.

4. Преимущества данной модели движения выражаются в следующем:

- коэффициенты модели зависят от функций синусов и косинусов и, благодаря возможности определения произвольной степени их производных, уравнение допускает линеаризации;

- линейный вид уравнения прост, в связи с этим при изучении свойств управляемости достаточно обращаться к простому критерию Кальмана.

5. Недостатками модели являются следующие:

- при движении робота с деталью сила тяжести учитывается только при моделировании движения последнего звена – захватывающего элемента; при моделировании движения остальных промежуточных звеньев данный силовой фактор не учитывается;

- в модели не учитывается нелинейный характер воздействия образующихся при движении робота сил на соединительные узлы;

- если учесть тот факт, что система управления исполнительного механизма ПР построена в виде обратной связи, то движения промежуточных звеньев должны быть описаны дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами.

Не учтенные при построении модели движения эти факторы также оказывают влияние на математическую модель оптимального управления роботом. В результате этого возникает взаимное несогласие траекторий движения – динамические ошибки – и уменьшается позиционная точность.

На основе анализа современных проблем рассматриваемой научной области предложен новый подход к решению возникающих задач.

Во второй главе работы в качестве примера приведены основные характеристики и пространная конфигурация трехзвенного ПР. Описаны подвижность, маневренность ПР и приведены формулы для определения сервисных коэффициентов применительно трехзвенного ПР. Модели движения ПР на подвижном основании представлены в двух видах – на основе кинематики и динамики. При составлении уравнений кинематического движения учтены варианты подвижного и неподвижного оснований робота.

Динамическая модель состояла из совокупности моделей движения основания и исполнительного механизма.

Приведены формулы расчета динамических ошибок движения ПР. Получены формулы для математического ожидания и дисперсии попадания в геометрию фигуры, которая характеризует рабочую зону захватывающего элемента и применена для трехзвенного робота.

Приведены ограничения, налагаемые при выполнении ПР операции сложной пространственной манипуляции. Эти ограничения обусловлены конструкцией ПР, необходимостью предотвращения столкновения с технологическим препятствием и тем, что траектории звеньев не должны пересекаться между собой. Такие условия характерны для многозвенного ПР на подвижном основании.

Движение ПР на подвижном основании включает движение основания и движение исполнительного механизма.

Движение основания ПР описывается уравнением

$$\tau(t) = Hu - S\dot{q}(t) + Gq_m(t) + Gq(t), \quad (1)$$

а движение исполнительного механизма -

$$\tau(t) = D(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t)). \quad (2)$$

В силу равенства левых частей уравнений (1) и (2) приравниваем их правые части:

$$D\ddot{q} + h\dot{q} + c = Hu - S\dot{q} + Gq_m + Gq$$

или

$$D\ddot{q} + (h + S)\dot{q} + c - Gq = Hu + Gq_m, \quad (3)$$

где H, S, G – диагональные постоянные матрицы;

q_m – постоянное равновесное состояние пружин в шарнире.

Уравнение (3) называется динамическим уравнением ПР на подвижном основании. На основе данного уравнения задача управления ПР делится на две части: первая – проектирование траектории оптимального движения основания и исполнительного механизма; вторая – перемещение робота по проектированной траектории.

В процессах проектирования, моделирования и управления можно пользоваться как декартовой, так и обобщенной системой координат.

Использование обобщенных координат имеет ряд преимуществ:

- при непосредственном управлении процессом движения ПР можно задавать значения переменных;
- проектирование, моделирование и управление движением ПР ведутся в реальном времени;
- моделирование и управление движением ПР просты и удобны в обобщенных координатах.

Единственным недостатком использования обобщенной системы координат является сложность определения положения захватывающего элемента и звеньев в процессе движения ПР, что может привести к технологической несостоятельности проекта. Кроме того, последовательность векторов $\{q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)\}$ в пространстве обобщенных переменных формируется без ограничений. Это может привести к большим ошибкам при управлении исполнительным элементом ПР.

При использовании декартовой системы координат в процессах проектирования, моделирования и управления условия, удовлетворяющие требованию к траектории, задаются в декартовых координатах, в то же время реализация ограничений на силы и моменты производится в обобщенной системе координат. То есть формирование и решение оптимизационной задачи требует использования обеих систем координат. Если участки траектории аппроксимированы полиномами малого порядка, переход из одной системы координат в другую осуществляется без затруднений. Если же использованы полиномы высокого порядка, то возникают осложнения при переводе из одной координаты в другую.

В третьей главе диссертационной работы анализированы существующие ЛДВ и способы статистического испытания по управлению ПР на подвижном основании и выявлены их недостатки. Доказано, что движения звеньев ПР, согласно данным практики, необходимо описать дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, а не дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, как это принято в теории. Выявлены неточности этих уравнений. Приведены способы определения коэффициентов, которые необходимы для оптимального управления ПР. Приведены два способа определения значений коэффициентов: как при наличии груза в захватывающем элементе, так и при его отсутствии. Решена задача быстрогодействия исполнительного механизма ПР на подвижном основании для условий слабого, сильного и критического демпфера. Проведен анализ существующих математических моделей, направленных на увеличение позиционной точности ПР на подвижном основании, и выявлены их неточности. Предложен подход, лишенный подобных неточностей.

Известно, что уравнение движения ПР строится на основе уравнений Лагранжа и законов ньютоновской механики. При постоянных значениях коэффициентов дифференциальные уравнения движения промежуточных звеньев имеют вид

$$a_i \ddot{y}_1(t) + b_i \dot{y}_1(t) + c_i y_1(t) = \tau_i(t), \quad (4)$$

где a_i – коэффициент колебаний i – го сочленения;

b_i – коэффициент демпфирования i – го сочленения;

$\tau_i(t)$ – вектор (размерностью $(n \times 1)$) обобщенных сил, создаваемых

силовыми приводами в i – м сочленении ПР.

При непрерывно меняющихся значениях коэффициентов уравнения принимают вид

$$\alpha_i(t)\ddot{y}_2(t) + \beta_i(t)\dot{y}_2(t) + \gamma_i(t)y_2(t) = \tau_i(t). \quad (5)$$

Из равенства значений правых частей последних уравнений следуют уравнения

$$a_i\ddot{y}_1(t) + b_i\dot{y}_1(t) + c_i y_1(t) = \alpha_i(t)\ddot{y}_2(t) + \beta_i(t)\dot{y}_2(t) + \gamma_i(t)y_2(t) \quad (6)$$

или

$$a_i\ddot{y}_1(t) + b_i\dot{y}_1(t) + c_i y_1(t) - (\alpha_i(t)\ddot{y}_2(t) + \beta_i(t)\dot{y}_2(t) + \gamma_i(t)y_2(t)) = 0.$$

Динамические коэффициенты этих уравнений называются коэффициентами удержания ПР в равновесном состоянии и при использовании обозначений

$$y_1(t) - y_2(t) = e(t), \quad \dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t) = \dot{e}(t), \quad \ddot{y}_1(t) - \ddot{y}_2(t) = \ddot{e}(t)$$

уравнения (6) принимают вид

$$k_i'\ddot{e}(t) + k_i''\dot{e}(t) + k_i'''e(t) = 0. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) характеризуют задачу локального минимума относительно коэффициентов.

Если решения уравнений являются асимптотически устойчивыми, то значения разностей $y_1(t) - y_2(t)$, $\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)$, $\ddot{y}_1(t) - \ddot{y}_2(t)$ будут ограниченными.

Задачу быстродействия ПР на подвижном основании можно сформулировать только относительно его исполнительного механизма.

На основе уравнений (4) и (5) построится задача управления.

Вводя обозначения $\bar{u}_i(t) = \frac{\tau_i(t)}{a_i}$, $\bar{b}_i = \frac{b_i}{a_i}$, $d_i = \frac{1}{a_i}$, уравнения (4) и (5)

запишем в виде

$$\ddot{y}_1(t) + \bar{b}_i\dot{y}_1(t) + d_i y_1(t) = \bar{u}_i(t); \quad (8)$$

$$\ddot{y}_2(t) + \xi_i(t)\dot{y}_2(t) + \zeta_i(t)y_2(t) = u_i(t). \quad (9)$$

Почленное вычитание уравнений (8) и (9) приводит к следующему:

$$\ddot{y}_2(t) - \ddot{y}_1(t) + \xi_i(t)y_2(t) - \bar{b}_i\dot{y}_1(t) + \zeta_i(t)y_2(t) - d_i y_1(t) = u_i(t) - \bar{u}_i(t). \quad (10)$$

Обозначения, использованные в уравнении (7), позволяют представить (10) в виде

$$\ddot{e}(t) + k_i''\dot{e}(t) + k_i'''e(t) = \delta u_i(t). \quad (11)$$

Для нахождения оптимальных значений динамических коэффициентов уравнений (11) приведем постановку задачи оптимального управления.

В начальный момент времени исполнительный механизм находится в состоянии $e = e_0(0)$ $\dot{e} = \dot{e}_0(0)$ и требуется такое управление $u(t)$, которое переведет ИП в заранее заданное конечное состояние:

$$e(t) = e_0(t), \quad \dot{e}(t) = \dot{e}_0(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (12)$$

При этом требуется, чтобы время переходного процесса было наименьшим.

Тогда цель управления сводится к минимизации функционала

$$J(e_0, u(t)) = \int_{t_0}^T f^0(e(t), u(t), t) dt. \quad (13)$$

При условиях (12) и по закону $\dot{e}(t) = \int (e(t), u(t), t) \quad u \in U, \quad t_0 \leq t \leq T,$

где $f(\dots)$ - непрерывно дифференцируем со своими производными;

$u(t)$ - кусочно – непрерывная функция на отрезке $[t_0, T]$.

В зависимости от значений динамических коэффициентов уравнения (11) ожидается два разных состояния:

- 1) если при произвольном значении времени выполняется условие $k_i'' - k_i'''^2 < 0$, то имеет место состояние слабого демпфера;
- 2) если при произвольном значении времени выполняется условие $k_i'' - k_i'''^2 \geq 0$, то имеет место состояние сильного и критического демпфера.

Если в уравнении (11) вводится обозначение $\delta u_i(t) = v_i(t)$, то удовлетворяется условие $|v_i(t)| \leq 1$. Положим, что для каждого значения времени выполняются условия $k_i'' > 0, k_i''' > 0$. Тогда уравнение (11) принимает векторный вид:

$$\dot{e} = z, \quad \ddot{e} = \dot{z},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_i''' & -k_i'' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v.$$

Для этого уравнения составим функцию Гамильтона

$$H = \eta_1 z + \eta_2 (-k_i''' z - k_i'' e) + \eta_2 v$$

и сопряженную систему

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = -\frac{\partial H}{\partial e} = -k_i''' \eta_2, \\ \dot{\eta}_2 = -\frac{\partial H}{\partial z} = -\eta_1 + k_i'' \eta_2. \end{cases}$$

Известно, что

$$\eta_2 \neq 0, \quad \eta_1 = k_i'' \eta_2 - \dot{\eta}_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{\eta}_1 = k_i'' \dot{\eta}_2 - \ddot{\eta}_2,$$

$$k_i'' \dot{\eta}_2 - \ddot{\eta}_2 = k_i''' \eta_2$$

$$\dot{\eta}_2 - k_i'' \dot{\eta}_2 + k_i''' \eta_2 = 0.$$

Находим решение последнего уравнения:

$$\eta_2 = c_1 e^{k_i'' t} \sin(\omega t + c_2), \quad \eta_1 = -\int c_1 k_i''' e^{k_i'' t} \sin(\omega t + c_2) dt.$$

Здесь $c_1 \neq 0$, c_2 – произвольные постоянные; $\omega = \sqrt{k_i''' - (k_i'')^2}$.

Так как максимальное и минимальное значения функции управления достигаются на границах рассматриваемой области, то уравнения (11) можно заменить системой уравнений

$$\dot{e} = z, \quad \dot{z} = -k_i''' e - k_i'' z - 1, \quad (14)$$

$$\dot{e} = z, \quad \dot{z} = -k_i''' e - k_i'' z + 1. \quad (15)$$

Для каждого значения времени решение уравнения (11) сравнивается с решением уравнения (4). Чтобы уравнение (14) адекватно описало движение ПР по заданной траектории, величины $\delta u(t)$ и $e(t)$ должны стремиться к нулю. Но эти условия противоречат изменению динамических коэффициентов.

Для уравнения (11) синтезирующее решение функции $\psi(e, z)$ определяется следующим образом:

$$\ddot{e}(t) + k_i'' \dot{e}(t) + k_i' e(t) = \Psi(e, z),$$

$$\text{где } u = \text{sign } \psi(e, z) = \begin{cases} -1, & \text{если } z > 0, \text{ для уравнения (14),} \\ 1, & \text{если } z < 0, \text{ для уравнения (15).} \end{cases}$$

Таким образом, решена задача быстрогодействия для состояния слабого демпфера.

Решения уравнений (14) и (15) остаются без изменения. Траектории их решений расположены во второй и четвертой четвертях декартовой системы координат.

При проектировании движения ПР, кроме его быстрогодействия, важным показателем является позиционная точность. Для повышения позиционной точности захватывающего элемента ПР предлагаем использовать иной подход, согласно которому рабочая зона ПР дополняется до формы параллелепипеда. Параллелепипед заполняется девятью более мелкими параллелепипедами со стороны вершин и вокруг точки пересечения главных диагоналей. Размеры этих параллелепипедов известны. На этой основе сформулированы начальные и граничные условия для уравнения, направляющего движения разработанного ПР.

В четвертой главе обсуждено практическое применение результатов диссертационной работы. На рисунке представлена схема математического и программного обеспечения оптимального управления ПР на подвижном основании. При этом изучение движения ПР состоит из трех этапов – стратегии, тактики и исполнения.

На тактическом этапе изучается кинематика робота. Подробно рассмотрены прямые и обратные задачи кинематики. На исполнительном этапе изучены динамика ПР, задачи динамических коэффициентов, увеличения быстрогодействия и позиционной точности представлены в виде дифференциальных уравнений, которые решены методом Рунге-Кутты.

Для практического применения рассмотрен четырехзвенный ПР, ошибки движения которого выявлены и оценены в работе. При реальном движении ПР определены динамические коэффициенты и решена задача быстрогодействия исполнительного механизма. Исходная траектория движения ПР сравнена с траекторией, которая получена при применении теоретических результатов.

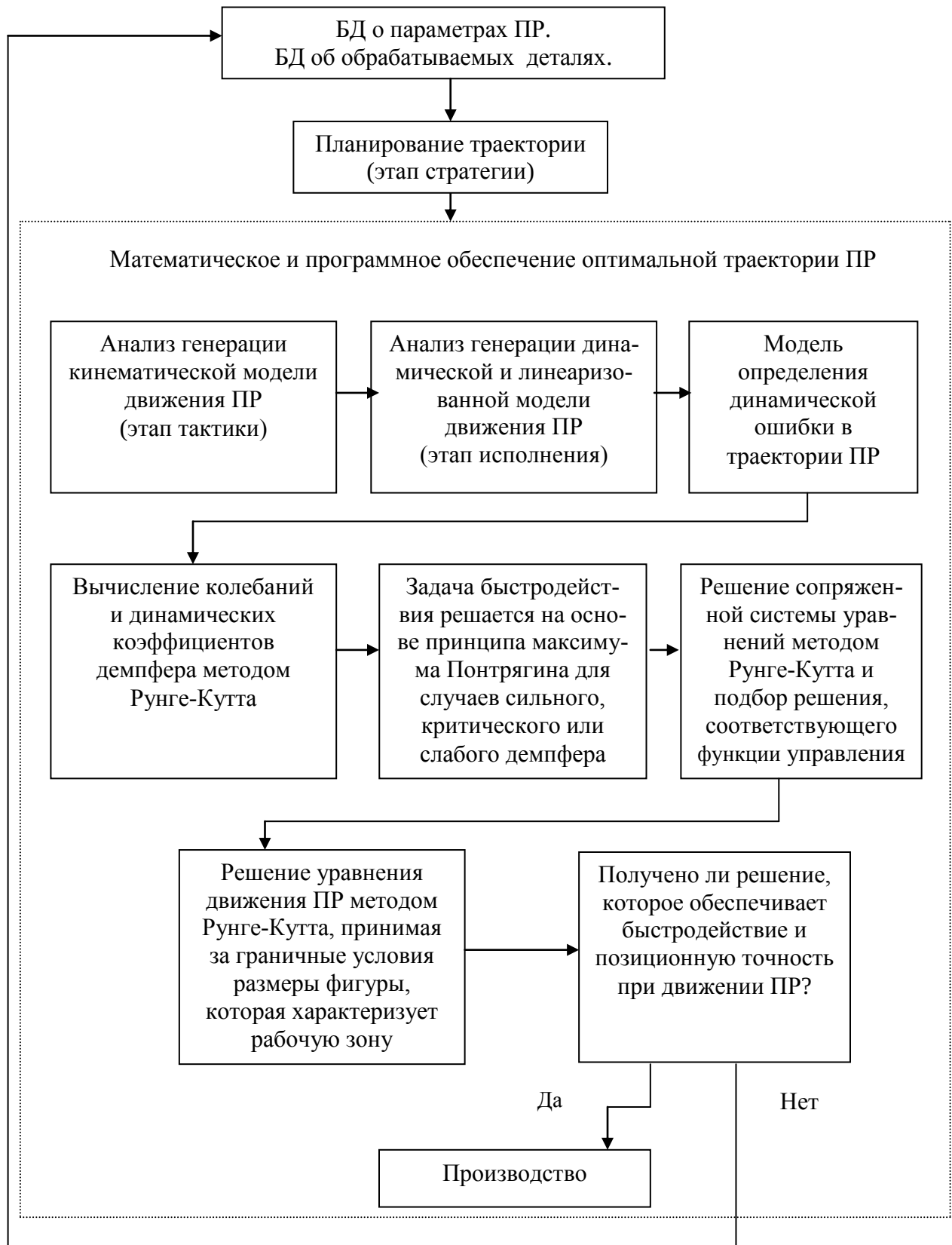


Схема математического и программного обеспечения оптимальной траектории МР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные положения и результаты, полученные в рамках диссертационной работы, сводятся к следующему.

1. В результате проведенного системного анализа робототехнических систем выявлено, что существующие математические модели и управление не обеспечивают высокую степень быстродействия и позиционную точность ПР на подвижном основании.

2. Получено уравнение функционирования ПР на подвижном основании при осуществлении сложной пространственной операции и на его основе разработана математическая модель оптимального управления.

3. На основе теоретических и экспериментальных результатов построены модели для обеспечения локального минимума ошибок в уравнениях относительно коэффициентов.

4. Решена задача быстродействия применительно исполнительного механизма ПР на подвижном основании. Решение получено на основе принципа максимума Понтрягина для трех условий – слабого, сильного и критического демпфера динамических коэффициентов.

5. Разработанные математические модели и алгоритмы управления с переменными коэффициентами позволили повысить точность позиционирования конечного звена ПР с различными условиями нагружения на 3,1-3,4% и улучшить технико – экономические показатели и надежность функционирования ПР на подвижном основании.

6. Разработаны обобщенный алгоритм и программное средство на основе математической модели оптимального управления ПР на подвижном основании. Обобщенный алгоритм состоит из стратегических, тактических и исполнительных этапов.

Результаты диссертационной работы внедрены в АО «Технолог» с экономическим эффектом, равным 535 тыс. сум в год от одного ПР.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И., Абдуллаев А.К., Сиддигов Р.У. Узгарувчан тузилмали саноат роботларини бошқариш модели//Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». - Ташкент, 2007. - №2. - С.8-12.

2. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И., Абдуллаев А.К. Асоси ҳаракатланувчан саноат роботларининг бошқарув масалаларига доир//Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики».- Ташкент, 2008. - №1. – С.19-23.

3. Абдуллаев А.К. Самолётсозликда кулланилувчи роботнинг бошқарув объекти сифатида математик модели ва дастурий таъминотини куришишлари// Авиаконот техникасини яратиш ва ишлатиш муаммолари: Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. – Ташкент, 2008. – С.41-42.
4. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И., Абдуллаев А.К. Самолётсозликнинг технологик жараёнларида кулланилувчи асоси ҳаракатланувчан саноат роботининг динамик тенгламаси ҳақида// Авиаконот техникасини яратиш ва ишлатиш муаммолари: Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. – Ташкент, 2008. – С.43-45.
5. Онорбоев Б.О., Абдуллаев А.К., Сиддиқов Р.У. Робототехника тизимларини бошқаришда позицион аниқлик ва сезгирликни ошириш масалалари// Современное состояние и пути развития информационных технологий: Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. –Ташкент, 2008. – С.209-212.
6. Абдуллаев А.К. Асоси ҳаракатланувчан саноат роботи ҳаракатининг математик модели//Научн-технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2008. - №4 – С. 27-32.

Техника фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Абдуллаев Алибек Қодиралиевичнинг 05.13.01 – Тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш ихтисослиги бўйича «Асоси ҳаракатланувчан саноат роботлари ҳаракатини оптимал бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмлари» мавзусидаги диссертациясининг

Р Е З Ю М Е С И

Таянч сўзлар: мураккаб тизим, саноат роботи, тезкорлик, позицион аниқлик, кучсиз, кучли ва критик демпфер.

Тадқиқот объектлари. Асоси ҳаракатланувчан саноат роботи (СР) қаралган.

Ишнинг мақсади. Асоси ҳаракатланувчи СР ҳаракат траекторияси ва позицион аниқлигини таъминлаш учун оптимал бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот методлари. Технологик жараёнларни математик моделлаштириш усуллар, оптимал бошқарув ва машина механизмлари назарияси усулларида фойдаланилган.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги. Асоси ҳаракатланувчан СРнинг мавжуд ҳаракат моделларининг хатоликлари аниқланган. Роботнинг ҳаракат тенгламаси қайта қурилган ҳамда ундан фойдаланиб, СРнинг тезкорлигини ва позицион аниқлигини ошириш орқали оптимал бошқаришнинг математик моделлари, алгоритмлари ва дастурий воситалари ишлаб чиқилган.

Амалий аҳамияти. Тадқиқ қилинувчи роботларни оптимал бошқаришнинг дастурий воситасидан халқ хўжалигининг робототехник тизимлар билан жиҳозланган барча тармоқларида тезкорлик ва позицион аниқликни ошириш орқали умумий ишлаб чиқариш вақтини минималлаштиришда ҳамда энергетика ресурсларини тежашда фойдаланиш мумкин.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги. Асоси ҳаракатланувчан СРни оптимал бошқариш учун математик моделлар асосида ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурий восита «Технолог» акционерлик жамиятида қўлланилган. Қўллаш агрегат-йиғув жараёнлари мисолида амалга оширилган бўлиб, СРни бошқаришда тезкорлик ва позицион аниқлик сезиларли ошганлиги, бундан ташқари, ишланмалардан механик ишлов бериш жараёнларида ҳам фойдаланиш мумкинлиги аниқланди. Йиллик иқтисодий самараси бир СР учун 535 минг сўмни ташкил қилди (2009 йил нархларида).

Қўлланиш соҳаси. Ишлаб чиқилган математик моделлар ва алгоритмлардан халқ хўжалигининг робототехник тизимлар билан жиҳозланган бошқа тармоқларида оптимал бошқариш мақсадида фойдаланиш мумкин.

РЕЗЮМЕ

диссертации Абдуллаева Алибека Кодиралиевича на тему: «Математические модели и алгоритмы оптимального управления функционированием промышленных роботов на подвижном основании» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

Ключевые слова: сложная система, промышленный робот, быстродействие, позиционная точность, сильный, слабый и критический демпферы.

Объект исследования: промышленные роботы (ПР) на подвижном основании.

Цель работы: Разработка математических моделей и алгоритмов оптимального управления функционированием промышленных роботов на подвижном основании для обеспечения точности траектории движения и позиционирования.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы были использованы методы моделирования технологических процессов, теории оптимального управления и механизмов машины.

Полученные результаты и их новизна: определена ошибка существующей модели движения ПР на подвижном основании, вновь построено уравнение его движения, на основе которого разработаны математические модели, алгоритмы и программные средства, позволяющие увеличить быстродействие и точность позиционирования ПР.

Практическая значимость: программные средства оптимального управления исследованными роботами, благодаря увеличению быстродействия и позиционной точности, могут быть использованы во всех отраслях народного хозяйства, которые снабжены робототехнической системой, что способствует минимизации общего времени производства и экономит энергетические ресурсы.

Степень внедрения и экономическая эффективность: разработанные математические модели алгоритмы и программное средство оптимального управления ПР на подвижном основании внедрены в Акционерном обществе «Технолог». В процессе сборки агрегатов значительно увеличиваются быстродействие и позиционная точность управляемого ПР. Годовая экономическая эффективность внедрения на одном ПР составляет 535 тысячи сум (по ценам 2009 года).

Область применения: разработанные математические модели и алгоритмы могут быть использованы при оптимальном управлении в различных отраслях народного хозяйства, которые снабжены робототехническими системами.

RESUME

Thesis of Abdullaev Alibek Kodiralievich on the scientific degree competition of the doctor of sciences (philosophy) in 05.13.01 – “System analysis, management and information professions”

subjects:

"Mathematical models and algorithms of optimum governing an operation of earning one's living robots on rolling base"

Key words: complex system, industrial robot, speed, positional accuracy, strong, weak and critical air-cushions.

Subject of research: earned one's living (PR) on the rolling base.

Purpose of work: Define and value a dynamic inexactness of motion path and develop mathematical models and algorithms of optimum management, allowing enlarge a speed and PR positional accuracy on the rolling base.

Methods of research: methods of mathematical modeling of technological processes, theories of probability, mathematical statistics, algebras, theories and theory of optimum management.

The results obtained and their novelty: Determined mistake existing motion models PR on the rolling base, newly built equation of its motion, on the base which designed mathematical models, algorithms and software programs, allowing enlarge a speed and PR positional accuracy.

Practical value: Software programs of optimum governing the explored robots, due to increasing a speed and positional accuracy, can be used in all branches of public facilities, which provided with by the system that promotes minimization of general time of production and spare an energy facility.

Degree of embed and economical effectivity: Developed on the base mathematical optimum management models PR on the rolling base algorithms and software programs are introduced in the Join-stock company "Technologist". On the example of introduction in the process of assembly of units proved that are vastly enlarged speed and positional accuracy operated by PR; their possible use mechanical processing in the process of. Annual cost-performance of introduction on one PR forms 535 thousand (on prices 2009).

Field of application: Developing mathematical models and algorithms can be used under optimum governing the different branches of public facilities, which provided with by systems.