

1546377

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 62-50

РОМАНОВА ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА

СИНТЕЗ НЕЗАВИСИМОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗВЕНЬЯМИ
МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

05.02.05. - Роботы, манипуляторы и робототехнические системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1994

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Медведев В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Градецкий В.Г.

кандидат технических наук, с.н.с.
Зенкевич С.Л.

Ведущая организация - Институт космических исследований РАН

Защита диссертации состоится " 5 " декабря 1994 г.
в ____ ч. на заседании специализированного совета К 053.15.06.
"Машиностроение" в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я
Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы в 2-х
выслать по указанному

С диссертацией мож
Н.Э.Баумана.

Автореферат разосл

Ученый секретарь
специализированног
к.т.н., с.н.с.

Объем I п.л. Тираж
Подпи

1546377

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Различные сферы деятельности человека, такие как исследование в космическом пространстве, под водой, в ядерной энергетике, комплексная автоматизация технологических процессов и др., предполагают проведение работ, непосредственное участие в которых человека нецелесообразно или полностью исключено. Для их выполнения используются автоматы, манипуляционные роботы (МР), робототехнические комплексы.

Вызванный непрерывным процессом расширения и углубления деятельности в этих областях рост требований к точности и скорости движения современных манипуляционных систем в условиях переменных нагрузок и отсутствия полной информации о состоянии исполнительных механизмов и окружающей среды определяют необходимость дальнейшего совершенствования средств и методов управления манипуляторами.

Для достижения предельно возможных точностных и динамических показателей МР зачастую необходимо знать и учитывать реальные характеристики объекта управления или той его части, которая в большей степени определяет динамические свойства движущегося манипулятора - его многозвенового исполнительного механизма. Однако такому объекту управления присуще наличие взаимосвязей между степенями подвижности. Проявляющиеся эффекты взаимовлияния звеньев отражаются на показателях переходных процессов в сочленениях МР и зачастую не позволяют добиться требуемого качества управления его исполнительной системой. Поэтому задача синтеза алгоритма автономного управления звеньями МР, предполагающего компенсацию сил взаимодействия степеней подвижности, представляет собой достаточно сложную актуальную проблему робототехники.

В диссертации для решения названной задачи была использована идея русского ученого И.Н. Вознесенского о динамическом разделении сложной технической системы на ряд одномерных подсистем для декомпозиции исполнительной системы МР, описываемой адекватной математической моделью динамики, с последующим построением для каждой сепаратной подсистемы локального регулятора.

Целью работы является создание методики синтеза закона независимого управления движением звеньев такого сложного динами-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1546377

Романова Т.А. Синтез незав

ческого объекта как многозвенный МР на основе адекватной динамической модели исполнительного механизма и перемещаемого груза.

Задачи исследования. Достижение указанной цели предполагает решение следующих основных задач:

1) обоснование методики построения закона управления звеньями МР, обеспечивающего их динамическую независимость;

2) выбор наиболее эффективных методов идентификации параметров исполнительного механизма и перемещаемого груза и создание высокоточного и быстродействующего алгоритма оценивания параметров манипуляционного механизма;

3) построение алгоритма управления звеньями, обеспечивающего желаемые динамические свойства и точность работы МР;

4) экспериментальный анализ на ЭВМ динамических характеристик подсистем МР с системой управления, синтезированной по разработанной методике, для подтверждения эффективности представленной в диссертации адаптивного способа управления;

5) разработка упрощенных способов реализации предлагаемого алгоритма автономного управления движением звеньев МР.

Методы исследования. К основным методам, используемым при выполнении диссертационной работы, относятся аппарата линейной алгебры, методы теоретической механики, теории автоматического управления, теории дифференциальных уравнений, теории чувствительности, математическое моделирование.

Достоверность результатов. Результаты теоретических исследований подтверждены при моделировании управляемых движений звеньев МР базируется на строгом и обоснованном применении математического аппарата.

Научная новизна основных результатов, содержащиеся в диссертации:

- предложена и обоснована методика декомпозиции многосвязной исполнительной системы МР, отличительными особенностями которой по сравнению с существующими методами динамического разделения многомерной технической системы являются простота реализации и устойчивость работы;

- методика формирования закона автономного управления подсистемами МР распространена на случай задания модели динамики в линеаризованной стационарной и дискретной стационарной формах,

а также при справедливости гипотезы о "замораживании" параметров на случай описания динамики МР моделью с переменными параметрами;

- предложено эффективное решение задачи оценивания параметров нелинейной модели динамики исполнительской системы МР и перемещаемого груза

Практическая ценность. Использование предложенных алгоритмов управления позволяет улучшить качественные показатели управляемых процессов за счет устранения нежелательных эффектов взаимовлияния. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут применяться при автоматизации процесса проектирования систем управления МР. Построенные в диссертации алгоритмы независимого управления пригодны для синтеза систем управления объектами манипуляторного и других типов, что подтверждает внедрение результатов работы.

Реализация результатов работы Результаты диссертации использовались и внедрены в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва) при проектировании систем управления лесозаготовительными машинами манипуляторного типа , а также в ЦКБ аппаратостроения (г. Тула) при создании алгоритма управления пространственным механизмом с разомкнутой кинематической цепью.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации были доложены и обсуждены на Шестой Четаевской конференции, - Казань, 1992; на Второй Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук", - Москва, 1994; на заседании кафедры " Робототехнические системы " МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, на заседаниях кафедры "Автоматические системы и робототехника" МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 1994.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано четыре печатные работы, три работы находятся в печати.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 219 страницах машинописного текста и включает в себя введение, четыре раздела с выводами, заключение, список литературы из 102 наименований и приложения с результатами решения прикладной задачи и актами о внедрении результатов исследования. Работа содержит 63 рисунка, 2 таблицы и 15 страниц приложения с 6 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, формулируется цель и основные задачи исследования, кратко излагается содержание работы, приводятся сведения о реализации результатов диссертации.

Первый раздел посвящен обзору подходов к синтезу системы управления приводами МР, основные методы которых изложены в работах Е.П. Попова, В.С. Кулешова, Н.А. Лакоты, П.Д. Крутько, В.С. Медведева, А.Г. Лескова, А.С. Ющенко, Е.И. Юревича, А.В. Тимофеева, Ф.Л. Черноусько, К. Ли, С. Дубовски, Дж. Лу, Д. Слотине, М. Вукобратовича, М. Такегаки, Д.Е. Уитни и др. Для краткой характеристики существующих алгоритмов управления они условно разделены по заложенному в них принципу на три группы: кинематические, динамические, адаптивные. Особое внимание уделено методам, основанным на принципе адаптации и используемым в робототехнике. Здесь же отмечаются отличительные особенности предлагаемого в работе адаптивного подхода к организации раздельного управления звеньями МР, сущность которого состоит в следующем. В процессе движения МР по данным о параметрах модели динамики исполнительного механизма, полученным в контуре оценивания массо-инерционных параметров звеньев, осуществляется настройка регулятора, обеспечивающего компенсацию взаимных связей между подсистемами и, следовательно, управляющего каждой степенью подвижности как независимой. Блок-схема такой системы управления представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: ИП - система исполнительных приводов МР; ИМ - исполнительный механизм МР, состояние которого характеризуется обобщенными координатами звеньев q , скоростями $\dot{q}$ и ускорениями $\ddot{q}$ их изменения; М - модель динамики исполнительной системы; АО - алгоритм оценивания неопределенных параметров p исполнительного механизма по данным с рассогласования e между вектором τ моментов, развиваемых системой приводов ИП, и вектором моментов $\hat{\tau}$ на выходе модели М; УУ - устройство управления, вырабатывающее управляющие сигналы u на входы системы ИП для отработки задающего воздействия g ; АН - алгоритм настройки параметров P управляющего устройства, опирающийся на знание

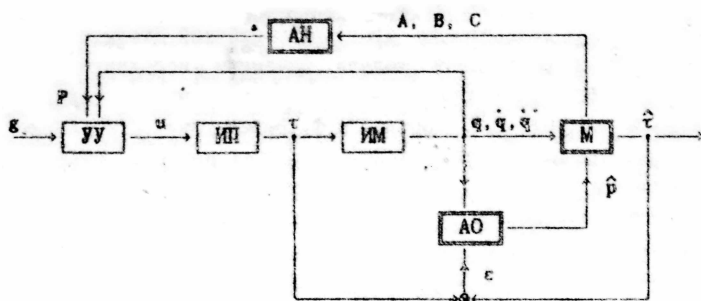


Рис. 1. Блок-схема системы управления МР

коэффициентов уравнения состояния (матрицы A и B) и уравнения наблюдения (матрица C) линеаризованной стационарной модели динамики исполнительного механизма.

В 1.2 формулируется задача, направленная на разработку метода синтеза системы автономного несвязанного управления степенями подвижности МР - метода, основанного на предварительном динамическом разделении исполнительного механизма на ряд отдельных подсистем с последующим построением для каждой одномерной подсистемы локального регулятора. Взаимосвязь между звеньями исполнительного механизма проявляется в виде моментов сил инерции, а также моментов кориолисовых и центробежных сил, возникающих в одном сочленении как следствие движения других звеньев. Поэтому для решения начальной задачи декомпозиции исполнительного механизма система управления МР должна вырабатывать помимо прочих такие сигналы на приводы звеньев, которые создают моменты, направленные на компенсацию моментов сил взаимодействия между звеньями.

Поскольку точность компенсации сил взаимодействия, а следовательно, и качество управления степенями подвижности зависит от достоверности знания величин моментов сил взаимодействия, то необходима математическая модель, предоставляющая точные данные о динамических характеристиках объекта управления. Это определяет актуальность исследований, проведенных во втором разделе и нацеленных на построение высокоточного и быстродействующего

алгоритма оценивания параметров исполнительного механизма.

Второй раздел диссертации представляет краткий аналитический обзор методов формирования модели динамики исполнительного механизма МР. Различные методы построения динамических моделей, изложенные в работах Е.П. Попова, А.Ф. Верещагина, С.Л. Зенкевича, Е.И. Кривича, М.Вукобратовича и других авторов, отнесены к трем основным группам: 1) методы, основанные на уравнениях Лагранжа второго рода; 2) методы, базирующиеся на фундаментальных теоремах механики; 3) методы, использующие принцип наименьшего принуждения Гаусса и "энергию ускорений". Проведенный в работе анализ показал, что приемлемыми для решения поставленной задачи являются методы первой группы.

Полученные таким способом уравнения движения исполнительного механизма опираются на знание номинальных значений параметров кинематических цепей и механизмов передачи движения, в то время как требуемая при синтезе закона автономного управления звеньями полнота отражения реальных динамических свойств МР в его математической модели достигается при использовании наиболее точных оценок параметров рабочего механизма. Поэтому второй параграф данного раздела посвящен проблеме оценивания параметров модели динамики манипулятора, используемой при решении задачи синтеза системы управления. В 2.2.1 даны основные понятия и определения, связанные с проблемой идентификации параметров МР, а в 2.2.2 на основании результатов исследований, содержащихся в работах Я.Э. Ципкина, Н.С. Райсмана, А.В. Тимофеева, Л.И. Ты-веса, П. Эйккоффа, К.Ю.Острема, К. Вонг, Л. Льюнга, П. Янга и др., приведены алгоритмы трех известных методов параметрической идентификации: рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК), рекуррентного метода стохастической аппроксимации (РМСА) и автономного метода функций чувствительности (МФЧ).

Для выявления наиболее предпочтительного способа оценивания параметров манипуляционного механизма в 2.2.3. проведен анализ свойств перечисленных методов идентификации, проявляющихся в процессе оценивания истинных значений параметров звена двухзвенного МР. Результаты анализа послужили основой для разработки наиболее эффективной методики достижения высокоточных оценок массо-инерционных параметров МР при решении задачи повышения точности его математической модели. Предложенная методика

состоит в следующем. На начальном этапе движения манипулятора производится оценивание параметров последнего звена с помощью автономного МЧЧ. На следующем этапе по имеющейся информации о параметрах последнего звена с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов выполняется раздельное оценивание параметров остальных динамически независимых звеньев манипулятора. Такая поэтапная процедура оказывается предпочтительной, поскольку обладает преимуществами обоих методов идентификации. В процессе управления движением звеньев эффективность этой процедуры возрастает, так как увеличивается скорость сходимости оценок параметров разделенных моделей и повышается устойчивость этой процедуры. Таким образом, улучшению качественных показателей процедуры идентификации способствует одновременное действие компенсирующего взаимовлияние закона управления исполнительной системой, этапы построения которого являются содержанием раздела 3.

Третий раздел работы освещает вопросы, связанные с проблемой синтеза системы независимого управления звеньями МР, и включает в себя решение таких задач как

- 1) определение условий декомпозируемости исполнительной системы МР,
- 2) построение алгоритма раздельного управления степенями подвижности манипулятора.
- 3) синтез закона независимого управления звеньями на основе линеаризованной модели динамики манипуляционной системы, заданной в стационарной и в дискретной стационарной формах,
- 4) синтез системы автономного управления степенями подвижности МР в условиях отсутствия полной информации о состоянии исполнительной системы.

При справедливости гипотезы о "замораживании" параметров это решение опирается на линеаризованную в окрестности опорной точки траектории стационарную модель динамики n -звенного объекта управления, принятую в работе в форме уравнений Лагранжа второго рода

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) = \tau \quad (1)$$

и с учетом динамики несвязанных исполнительных приводов звеньев преобразованную к виду

$$\dot{X} = AX + BU,$$

$$Y = CX.$$

(2)

Показано, что недиагональные элементы D_{ij} матрицы $D(q)$, определяющей инерционность звеньев, и компоненты h_i вектора $h(q, \dot{q})$ ($i=1, n$) характеризуют соответственно момент сил инерции и суммарный момент кориолисовой и центробежной сил, возникающие в i -ом сочленении при движении в других сочленениях. Коэффициенты c_i отражают действие на i -ое сочленение сил тяжести звеньев с номерами, больше i .

В работе найдены условия и предложен способ компенсации действия взаимных сил инерции, кориолисовых, центробежных и гравитационных, основополагающий принцип которого схож с идеей известных методов декомпозиции многомерных динамических систем - приведение исходной модели системы в пространстве состояний к канонической форме Ляунбергера, к блочной форме Хессенберга, к действительной форме Шура с последующим выбором обратной связи по координатам состояния или по выходным координатам. Краткий обзор и анализ методов декомпозиции, которые изложены в работах Б.С. Моргана, П.А. Фалба, И.Дж. Гилберта, У. Воловича, Д. Люэнбергера, А. Ванечека, Р.В. Пейтела, М. Уонема, проведены в 3.1. Анализ вычислительных аспектов названных методов показал, что в ряде случаев их процедуры могут быть численно неустойчивы и/или требовать значительных вычислительных затрат, связанных с большим числом операций обращения, умножения матриц, а также выбора матриц ортогональных преобразований. Это недопустимо при расчете управляющих воздействий для тако. многосвязной динамической системы высокого порядка как манипулятор.

В 3.2 проведено построение алгоритма одновременного решения задачи динамического развязывания и задачи желаемого размещения юлосов замкнутой исполнительной системы МР на комплексной плоскости, лишенного подобных недостатков.

Здесь же отмечены особые, важные для синтеза алгоритма структурные свойства матриц коэффициентов уравнений движения (2) исполнительной системы n -звенного МР, характеризуемой числом r переменных состояния и числом k_1 координат состояния i -ой подсистемы с одним входом ($i=1, n$). Эти особенности состоят в следующем. В блочной матрице состояния системы

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \in R^{r \times r} \quad \text{диагональные блоки} \quad A_{ii} \in R^{k_i \times k_i}$$

содержат элементы, отражающие собственные связи между переменными состояния 1-ой подсистемы, а ненулевые элементы недиагональных блоков $A_{ij} \in R^{k_i \times k_j}$ являются коэффициентами перекрестных связей между 1-ой и j-ой подсистемами ($i, j = \overline{1, n}$), которые входят в уравнение второй производной от обобщенной координаты i-го звена.

Блочная матрица несвязанных входов МР такая, что

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nn} \end{bmatrix} \in R^{r \times n}, \quad B_{ii} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ b_{i1} \end{bmatrix} \in R^{k_i \times 1}, \quad B_{ij} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \in R^{k_i \times 1},$$

$$j, i = \overline{1, n}, \quad j \neq i.$$

$C = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n]^T \in R^{n \times 1}$ - блочная матрица коэффициентов уравнения наблюдения в системе (2), первая строка i-го блока которой содержит только один ненулевой элемент, соответствующий измеряемой координате перемещения i-го звена.

Причем исполнительная система МР полностью управляема и обладает свойством полной наблюдаемости, т.е. матрицы A, B и C удовлетворяют условиям:

$$\text{rank} [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{r-1}B] = r;$$

$$\text{rank} [C^T \ A^T C^T \ (A^T)^2 C^T \ \dots \ (A^T)^{r-1} C^T] = r.$$

Далее поставленная выше задача формализуется следующим образом: требуется найти такой закон управления МР

$$U = -PX + G, \quad (3)$$

где $P \in R^{n \times r}$ - искомая матрица коэффициентов обратных связей,

при котором матрица $A - BP$ в уравнении замкнутой системы $\dot{X} = (A - BP)X + BG$ имеет заданные собственные значения и отдельные ее подсистемы являются автономно управляемыми.

Для решения задачи в 3.2.1 с учетом особых свойств матриц B и C путем введения новых переменных состояния Z, связанных с переменными X равенством $Z = TX$, и осуществления линейного преобразования $\tilde{A} = TAT^{-1}$, $\tilde{B} = TB$, $\tilde{C} = CT^{-1}$ модель динамики исполнительной системы (2) приведена к специальному виду

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= \tilde{A}Z + \tilde{B}U, \\ Y &= CZ,\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \dots & \tilde{A}_{1n} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \dots & \tilde{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{n1} & \tilde{A}_{n2} & \dots & \tilde{A}_{nn} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tilde{B}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \tilde{B}_n \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \beta_{i(1)} \end{bmatrix}, \\ \tilde{A}_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1(1)} & \alpha_{1(2)} & \alpha_{1(3)} & \dots & \alpha_{1(k_1)} \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{ij(1)} & \alpha_{ij(2)} & \alpha_{ij(3)} & \dots & \alpha_{ij(k_j)} \end{bmatrix}, \\ i &= \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n};\end{aligned}$$

$T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]^T \in \mathbb{R}^{k \times r}$ - матрица преобразования координат много-
связной системы, 1-ый блок которой представляет собой матрицу

$$T_1 = \begin{bmatrix} c_{1(1)} & c_{1(1)}A & c_{1(1)}A^2 & \dots & c_{1(1)}A^{k_1-1} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{k_1 \times r};$$

$c_{1(1)} \in \mathbb{R}^{1 \times r}$ - первая строка блока C_1 матрицы наблюдений C .

К виду (4), названному стандартным, можно привести исходную модель системы, если матрица T , устанавливающая взаимно однозначное соответствие между переменными x и z , является невырожденной, т.е. $\text{rank}[T] = r$. В работе показано, что последнее равенство выполняется, система является полностью наблюдаемой.

В 3.2.2 для системы, заданной моделью динамики в стандартной форме (4), в пространстве новых переменных построен компенсирующий закон управления

$$U = -\tilde{L}Z + G, \quad (5)$$

при котором матрица $\tilde{A} - \tilde{B}\tilde{L}$ в уравнении замкнутой системы

$$\dot{Z} = (\tilde{A} - \tilde{B}\tilde{L})Z + \tilde{B}G$$

имеет блочно-диагональную структуру и требуемые собственные значения. А именно:

$$\tilde{A} - \tilde{B}\tilde{L} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{d_{11}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tilde{A}_{d_{22}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \tilde{A}_{d_{nn}} \end{bmatrix} = \tilde{A}_d, \quad (6)$$

где $\tilde{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ - желаемая матрица замкнутой исполнительной системы в Z -пространстве, каждая квадратная диагональная подматрица которой имеет вид

$$ad_{i1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_{i(1)} & -\gamma_{i(2)} & -\gamma_{i(3)} & \dots & -\gamma_{i(k_i)} \end{bmatrix};$$

$\gamma_{i(j)}$ ($j=1, k_i$) - коэффициенты желаемого характеристического полинома i -ой подсистемы;

$L \in \mathbb{R}^{n \times r}$ - матрица коэффициентов обратных связей по переменным Z , равная $L = -\tilde{B}(\tilde{A}d - \tilde{A})$;

$\tilde{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ - матрица, полученная путем транспонирования матрицы B и инвертирования ее ненулевых элементов.

Таким образом многосвязная система, заданная уравнениями (2), распадается на n сепаратных подсистем, каждая из которых обладает требуемыми динамическими характеристиками.

С целью определения параметров регулятора P осуществлен переход от управления в пространстве Z координат к управлению в пространстве X переменных состояния согласно выражению

$$U = -LZ + G = -LTX + G = -PX + G. \quad (7)$$

В 3.2.3 принят во внимание тот факт, что в системе управления МР некоторые координаты состояния (например, токи в цепях якорей двигателей) могут быть недоступны измерению и сформированы математические модели замкнутой системы автономного управления звеньями МР, содержащей как эквивалентный наблюдатель состояния, так и модифицированный наблюдатель пониженного порядка.

Во время движения манипулятора вдоль некоторой траектории его инерционные характеристики, а также силы, действующие на звенья, непрерывно изменяются. Поэтому для решения задачи синтеза алгоритма управления с нестационарной моделью динамики в 3.3 предложено воспользоваться методом "замораживания" параметров и привести задачу к описанной в 3.2, а именно: в каждый фиксированный момент времени вычислять управляющие воздействия на приводы звеньев по данным о параметрах линеаризованной в окрестности опорной точки модели динамики, а также по данным о

реальном состоянии исполнительной системы и требуемом положении степеней подвижности в последующий момент времени. Такая методика легла в основу проведенной в работе процедуры моделирования динамики управляемых звеньев промышленного манипулятора РМ-ОІ и подробно описана в следующем разделе диссертации.

В четвертом разделе получены результаты моделирования на ЭВМ динамики управляемого исполнительного механизма, анализ которых подтверждает работоспособность и эффективность предложенного в третьем разделе метода автономного управления звеньями МР, и разработаны способы упрощенной реализации названного метода, отличающиеся меньшими вычислительными затратами и, следовательно, сниженными требованиями к управляющей ЭВМ.

Для достижения этих результатов в 4.1 построена нелинейная модель и получена линеаризованная стационарная модель динамики трех звеньев манипулятора РМ-ОІ (колонна, плечо, локоть).

В 4.2 на основе изложенной в разделе 3 методики синтеза закона независимого управления подсистемами МР и метода "замораживания" параметров линеаризованной модели манипуляционной системы построен алгоритм синтеза системы управления звеньями и разработано программное обеспечение на базе вычислительного пакета МАТЛАВ для проведения на ЭВМ моделирования динамики замкнутой и разомкнутой исполнительной системы.

В 4.3 приведены результаты моделирования на ЭВМ, представляющие собой временные характеристики подсистем манипулятора РМ-ОІ по координатам положения и скорости звеньев, а также токов в цепях якорей двигателей. В качестве примера на рис. 2 изображены графики переходных процессов в подсистемах трех звеньев (1- колонна, 2- плечо, 3- локоть) под действием ступенчатого сигнала на входе первой подсистемы. Они свидетельствуют об отсутствии эффектов взаимовлияния, т.е. при подаче задающего воздействия на вход одной подсистемы реакция на выходе других подсистем отсутствует. Токи, возникающие в приводах неподвижных звеньев создают моменты, направленные на компенсацию моментов сил инерции, кориолисовых и центробежных сил, возникающих в сочленениях неподверженных действию задающих сигналов звеньев в ответ на движение управляемого звена. Полученные логарифмические частотные характеристики подсистем МР с разомкнутой главной обратной связью также говорят об их динамической независимости.

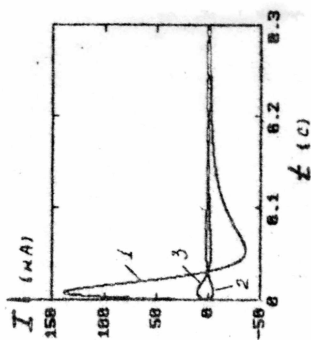
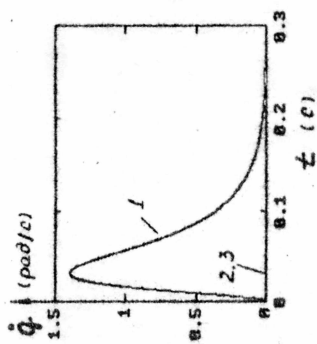
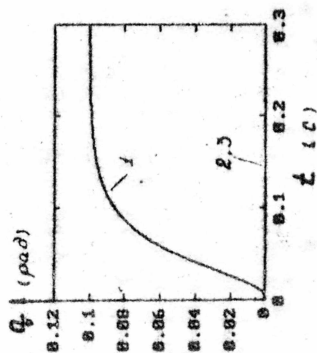


Рис. 2

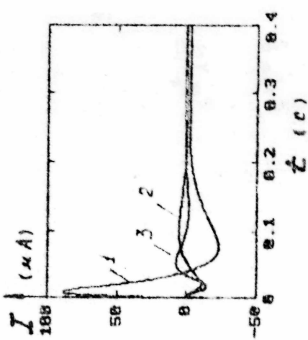
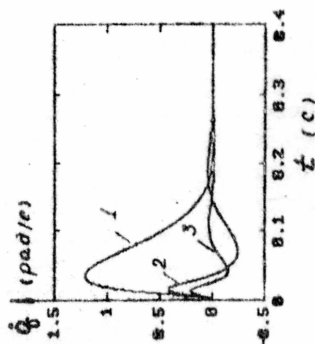
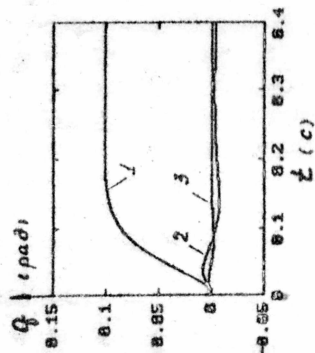


Рис. 3

Для сравнения в работе получены результаты моделирования процессов в управляемых подсистемах МР без компенсации сил взаимодействия между степенями подвижности. На рис. 3 представлены кривые переходных процессов в подсистемах при подаче управляющего воздействия на вход первой подсистемы. Видно, что взаимовлияние подсистем ведет к изменению характера переходного процесса, а именно: увеличивается время переходного процесса, значительно снижается точность в установившемся режиме, проявляется колебательный характер движения при заданных вещественных корнях характеристических уравнений подсистем замкнутой исполнительной системы.

С целью изучения возможности применения алгоритма независимого управления степенями подвижности к исполнительному механизму МР, а также для оценки точности управляемых движений проведено моделирование равномерного движения в точку программной траектории и движения по типовым программным траекториям. Результаты показали, что разработанные алгоритмы обеспечивают устойчивость движения, его желаемые характеристики и достаточную точность отслеживания программной точки: максимальная величина ошибки составляет $0,0015$ рад.

При движении МР вдоль программной траектории происходят изменения параметров системы управления, а следовательно, и параметров регулятора. Поэтому для сокращения затрат машинного времени на расчет величин управляющих воздействий на каждом интервале дискретности желательно производить настройку параметров регулятора с помощью упрощенной процедуры. Для этого в 4.4 предложены градиентный способ расчета коэффициентов обратных связей, приближенный алгоритм настройки и метод настройки параметров регулятора по данным о предварительно рассчитанных коэффициентах обратных связей, хранящихся в памяти ЭВМ.

В приложении к диссертационной работе приведены результаты исследования процессов в подсистемах промышленного манипулятора РМ-ОГ в условиях оценивания таких переменных состояния, как токи в цепях якорей двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие новые результаты:

1) предложена и обоснована методика синтеза алгоритма управления МР, обеспечивающего устранение динамического взаимовлияния степеней подвижности;

2) метод формирования независимого закона управления звеньями МР распространен как на случай описания математической модели динамики в линеаризованной непрерывной стационарной форме, так и на случай задания модели в дискретной стационарной форме;

3) предложена и апробирована методика выполнения процедуры синтеза автономного управления степенями подвижности МР, динамика которых описывается моделью с переменными параметрами;

4) найдено эффективное решение задачи оценивания параметров нелинейной модели движения МР с укрепленным в схвате грузом, проявляющихся в процессе оценивания параметров звеньев;

5) выполнено моделирование на ЭВМ движения звеньев МР под действием синтезированного закона управления по программным траекториям различного типа, в точку программной траектории, а также получены переходные характеристики звеньев как в случае компенсации сил взаимодействия между степенями подвижности, так и без компенсации;

6) предложены различные способы упрощенной реализации алгоритмов автономного управления манипулятором в реальном масштабе времени.

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1) использование предложенного адаптивного способа организации управления при проектировании системы автономного управления звеньями МР позволяет:

а) упростить синтез системы управления манипуляционным механизмом при наличии взаимосвязей между переменными состояния подсистем;

б) учесть нестационарность и неопределенность параметров МР и перемещаемого груза;

в) реализовать алгоритм автономного управления звеньями при отсутствии информации обо всех координатах вектора состояния исполнительной системы в условиях ее наблюдаемости;

2) алгоритмы независимого управления движением звеньев обеспечивают требуемую точность работы МР: максимальная величина ошибки отслеживания программной точки не превышает 0,0015 рад;

3) пренебрежение взаимосвязями между звеньями приводит к искажению динамических свойств МР;

4) в условиях компенсации сил взаимодействия между степенями подвижности задача управления расположением собственных значений матрицы замкнутой исполнительной системы МР имеет единственное решение;

5) предложенные способы реализации закона автономного управления звеньями МР позволяют осуществить формирование управляющих воздействий на ЭВМ в реальном масштабе времени с ошибкой менее 0,001 рад.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Романова Т.А., Медведев В.С. Алгоритмы оценивания параметров манипулятора // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1992. - № 3. - С. 94-105.

2. Романова Т.А., Медведев В.С. Об алгоритмах оценивания параметров динамической системы // Тезисы докладов пятой Четаевской конференции. - Казань, 1992. - С. 42-43.

3. Романова Т.А., Медведев В.С. Синтез алгоритма независимого модального управления многомерной системой // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1994. - № 2. - С. 42-53.

4. Романова Т.А., Медведев В.С., Далай Б.С. Метод синтеза алгоритмов независимого управления многозвенным исполнительным механизмом манипулятора // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Тезисы Второй Междунар. конф., в 7-ми т. / Под ред. И.Б. Федорова, К.С. Колесникова, А.О. Карпова. - М., 1994. - Т. 6. - С. 36-37.

Кроме того, находятся в печати:

Романова Т.А., Медведев В.С. Синтез алгоритмов управления, обеспечивающих независимость подсистем многомерного объекта // Известия РАН. Техническая кибернетика. - 1995. - № 1.

Романова Т.А., Медведев В.С., Далай Б.С. Синтез алгоритмов управления манипуляционным роботом // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 1995. - № 1.

Romanova T.A., Dalay B.S., Medvedev V.S. The control system synthesis for multi-degree of freedom manipulators // Proceedings of De Montfort University. - Leicester, 1995.