

Министерство образования и науки РФ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Владимирский государственный университет

И.Н. Егоров

Позиционно-силовое управление
робототехническими
и мехатронными устройствами

Монография

Владимир 2010

УДК 621.865.8
ББК 32.816
Е30

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зам. заведующего кафедрой проблем управления
Московского института радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)
В.М. Лохин

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой робототехники и мехатроники
Московского государственного технологического университета «Станкин»
Ю.В. Подураев

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Егоров, И. Н.

Е30 **Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами : монография / И. Н. Егоров ; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 192 с. ISBN 978-5-9984-0116-9**

Посвящена решению проблемы управления робототехническими и мехатронными устройствами с последовательной и параллельной кинематикой при выполнении технологических операций с наложенными связями. Показаны новые области применения роботов, робототехнических и мехатронных систем с силомоментным оцувствлением и позиционно-силовым управлением. Рассмотрены вопросы компоновки их исполнительных устройств, построения алгоритмов и структур систем позиционно-силового управления при выполнении технологических операций в условиях нестационарности и неопределенности позиционно-силового взаимодействия рабочих органов с объектами работы. Приведены результаты цифрового моделирования.

Предназначена для специалистов в области создания технологических роботов, робототехнических и мехатронных устройств. Может быть в известной мере использована и как учебное пособие для студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся по направлениям 220200 – автоматизация и управление, 220401 – мехатроника.

Рекомендована для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 127. Табл. 1. Библиогр.: 129 назв.

УДК 621.865.8
ББК 32.816

ISBN 978-5-9984-0116-9

© Владимирский государственный университет, 2010

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ.....	12
И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ КАК ОБЪЕКТОВ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ	12
§ 1.1. Анализ параллельных кинематических структур манипуляционных систем робототехнических и мехатронных устройств.....	12
§ 1.2. Мехатронные и робототехнические устройства на базе манипуляционных систем с параллельной структурой	22
§ 1.3. Мобильные робототехнические комплексы вертикального пуска и посадки беспилотных летательных аппаратов.....	26
§ 1.4. Манипуляционные системы робототехнических комплексов лазерной обработки с параллельной кинематикой.....	31
§ 1.5. Системы перемещения технологических мобильных роботов в трубопроводах с переменным поперечным сечением.....	41
Глава 2. ОСНОВЫ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ И МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	52
§ 2.1. Общие вопросы управления робототехническими и мехатронными устройствами с силомоментным очувствлением	52
§ 2.2. Системы позиционно-силового управления робототехническими и мехатронными устройствами	58

§ 2.3. Координатно-параметрическое управление движением лазер-робота.....	76
§ 2.4. Управление сборочными роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов.....	87
§ 2.5. Система позиционно-силового управления перемещением мобильного робота в трубопроводе с переменным сечением.....	101
Глава 3. СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ	109
§ 3.1. Анализ рабочих пространств и структур электроприводов мехатронных систем с параллельной структурой	110
§ 3.2. Анализ динамики электроприводов мехатронных систем в режиме позиционного управления	122
§ 3.3. Анализ динамики и синтез двухканальных приводов с независимым позиционно-силовым управлением.....	133
Глава 4. СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ СТЮАРТА ПУСКОВОГО КОМПЛЕКСА	150
§ 4.1. Системы копирующего управления движением и ориентацией выходного звена платформы Стюарта.....	151
§ 4.2. Системы полуавтоматического управления движением и ориентацией подвижной платформы мехатронной системы	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	175
ПРИЛОЖЕНИЕ	177
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	180

*Посвящается светлой памяти
друга и учителя
профессора В.С. Кулешова*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одно из приоритетных научно-технических направлений – создание мехатронных и робототехнических систем, основанных на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

Мехатронные и робототехнические устройства выполняют технологические операции со связанным объектом: механическую обработку, сборку, манипулирование объектами с ограниченной подвижностью, обход контура объектов с незаданной поверхностью при идентификации, контроле и бесконтактной обработке изделий, что приводит к необходимости оснащения их системами силомоментного очувствления и позиционно-силового управления.

В настоящей работе рассмотрены робототехнические и мехатронные системы при выполнении операций лазерной обработки, внутритрубопроводной диагностики, сборки и одно из актуальных направлений развития современных мехатронных систем – мобильные робототехнические комплексы для вертикального пуска и посадки беспилотных летательных аппаратов.

Вопросы силомоментного очувствления и позиционно-силового управления рассмотрены как в научной, так и учебной литературе отечественных и зарубежных учёных: «Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами» (М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчанский), «Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях» (Д.М. Гориневский, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер), «Системы силомоментного очувствления роботов» (Г.В. Письменный, В.И. Солнцев, С.А. Воротников), «Электроприводы манипуляционных роботов с силомоментным очувствлением» (И.Н. Егоров), «Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы» (В.С. Кулешов, Н.А. Лакота,

В.А. Андрюнин, В.П. Дорохов, И.Н. Егоров и др.), «Проектирование следящих систем двустороннего действия» (И.Н. Егоров, Б.А. Жигалов, В.С. Кулешов и др.), «Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами» (С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко), «Информационные устройства роботов» (С.А. Воротников), «Управление роботами и робототехническими системами» (Е.И. Юревич), «Управление робототехническими системами с силовой моментной обратной связью» (И.Н. Егоров, А.А. Кобзев, Ю.Е. Мишулин, В.А. Немонтов) и др.

В монографии обобщён многолетний опыт исследований преподавателей, докторантов и аспирантов кафедр робототехники и автоматизированных производств, автоматических и мехатронных систем и автоматизации технологических процессов и производств Владимирского государственного университета в области разработки основ теории позиционно-силового управления технологическими роботами, мехатронными и робототехническими системами общепромышленного и специального назначения. Автор глубоко признателен коллегам по совместным исследованиям – Р.С. Вишнякову, А.А. Кобзеву, Ю.Е. Мишулину, В.Н. Кравченко, А.А. Назарову, В.А. Немонтову, Н.А. Новиковой, Н.Г. Рассказчикову, В.П. Умнову и А.В. Ифанову, которые внесли большой вклад в разработку и изучение систем позиционно-силового управления, начатые в 1960-е годы под руководством В.С. Кулешова. Особенно следует отметить результаты совместных исследований последних лет, проведенных с аспирантами Казым Хуссейном Т., Матлуб Муханадом М., Кадхим Дхиргаамом А. (республика Ирак), которые внесли большой вклад в исследования, суть которых изложена в монографии. Часть материалов настоящей книги содержится в их диссертациях, выполненных совместно и под научным руководством автора книги. Полученные результаты опубликованы в совместных печатных работах.

Автор признателен профессорам В.М. Лохину и Ю.В. Подураеву за полезные замечания и советы, которые способствовали улучшению содержания рукописи.

Монография состоит из предисловия, введения, четырех глав и приложения.

Во введении рассмотрены общие вопросы управления мехатронными и робототехническими устройствами. Показана область применения в этих устройствах систем силовой моментной обратной связи и позиционно-силового управления.

Гл. 1 посвящена рассмотрению компоновки и особенностей мехатронных и робототехнических систем с параллельной структурой различного технологического назначения как объектов позиционно-силового управления.

В гл. 2 рассматриваются понятия, виды и структурно-алгоритмическая организация систем позиционно-силового управления движением оптической головки лазер-роботов; роботов с силовым и визуальным осязанием, выполняющих сборочные операции на движущемся конвейере; систем перемещения мобильного робота в трубопроводе с переменным поперечным сечением и адаптацией поджатия колесных модулей к поверхности трубопровода.

В гл. 3 рассмотрены вопросы анализа рабочих пространств, решения обратных задач, структурного синтеза и динамики исполнительных позиционно-силовых электроприводов мехатронных систем с прямой и обращенной параллельной структурой в условиях действия внешних сил и связей.

Гл. 4 посвящена рассмотрению алгоритмов и структур систем дистанционного и дистанционно-автоматического позиционно-силового управления ориентацией и движением выходного звена платформы Стюарта как пускового стола при выполнении операций вертикальной посадки беспилотного летательного аппарата.

В приложении приведены сведения об авторских свидетельствах И.Н. Егорова и его коллег, полученных при разработке и исследованиях систем управления и приводов роботов, рассмотренных в монографии.

Предназначена для специалистов, занимающихся проблемами современной мехатроники и робототехники. Она может быть использована и как учебное пособие для студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся по направлениям «Автоматизация и управление», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Мехатроника и робототехника».

ВВЕДЕНИЕ

Одно из актуальных направлений развития мехатроники и робототехники – создание робототехнических и мехатронных устройств, предназначенных для выполнения технологических операций со связанным объектом в условиях неопределенности и нестационарности позиционно-силового взаимодействия рабочего органа (РО) с неструктурированной внешней средой (объектом работ (ОР)) при существенном изменении совершаемой при этом работы A и мощности N как меры этого взаимодействия.

В общем случае выполнение роботом технологических операций, требующих перемещения и ориентации РО при действии ограничений на переменные состояния в виде внешних сил и связей, приводит к необходимости комбинации позиционного и силового управлений. Подобное управление получило в работах Н. Asada, Н. Kazerooni, N. Hogan, M. Liu, M. Vukobratovic, A. West, Ф.М. Кулакова, В.С. Кулешова, В.Л. Афонина, И.Н. Егорова, Ю.В. Подураева, В.Ф. Филаретова, А.С. Ющенко и других авторов следующие названия: импедансное (*impedance control*), позиционно-силовое (*position/force control*), силовое (*force control*), гибридное ПСУ (*hybrid position / force control*), параллельное позиционно-силовое управление (*parallel position/force control* – ПСУ) и гибридно-импедансное управление (*hybrid-impedance control*).

Автоматические системы, предназначенные для регулирования соотношений при решении траекторных и технологических задач, в работах М.Б. Игнатьева, Е.П. Попова, Л.М. Бойчука и И.В. Мирошника названы соответственно голономными системами и системами координированного, координирующего и согласованного управления.

Основная задача управления при позиционном и силовом доминировании – не отдельное отслеживание пространственной или силовой траекторий, а регулирование соотношения между траекторными параметрами и силой. Это своего рода управляемые связи, накладываемые на изменение регулируемых координат, т.е. в общем случае необходимо говорить об управлении при смешанных ограничениях.

В книге данное управление принято называть позиционно-силовым управлением, которое на исполнительном уровне решает задачи взаимо-

связанного (координированного) управления значением и соотношениями сил (моментов) $F = [FM]^T$, перемещений $S = [S \dot{S} \alpha \dot{\alpha}]^T$ при отработке пространственных или силовых траекторий в режиме автоматического и дистанционного управления роботом. На тактическом уровне ПСУ решает задачи формирования или коррекции алгоритмов управления сменой состояния динамической системы «РО – ОР».

С точки зрения расширения областей применения позиционно-силового управления, приведенных в работах [21, 35, 61-63, 76, 77, 79, 80], в данной книге рассматриваются такие области, как мехатронные системы с параллельной структурой при выполнении технологических монтажно-сборочных операций, операций лазерной обработки, пуско-посадочных операций с беспилотными летательными аппаратами, системы перемещения мобильных роботов в трубопроводах с переменным поперечным сечением.

Применение мехатронных систем не с последовательной, а с параллельной структурой (МСПС) рассматривается исходя из необходимости обеспечения высокой точности функционального управления перемещением и ориентацией выходного звена базовой компоненты мехатронного устройства в трехмерном рабочем пространстве, жесткости и компактности этого устройства при действии динамических нагрузок.

В качестве базовых рассматриваются компоненты с вертикальным расположением продольной оси: столы для монтажа сотовых сегментов экрана подземных туннелей и строительных конструкций; несущие конструкции многокоординатного сборочного и механообрабатывающего оборудования; мехатронные исполнительные системы для установки субтильных тепловыделяющих сборок в транспортные контейнеры; пусковые столы робототехнических комплексов вертикального взлета и посадки беспилотных летательных аппаратов с несущими винтами военного и гражданского применения и т.п.

Выходное звено механизмов параллельной структуры связано с основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых оснащена приводом либо налагает некоторое количество связей на движение выходного звена, поэтому к недостаткам МСПС следует отнести меньшее рабочее пространство по сравнению с классическими последовательными структурами, относительно небольшую их манипулятивность и более сложную конструкцию механизма. Платформа Стюарта относится к механизмам с параллельной структурой, поэтому у неё существуют особые положения. Неидеальность связей (наличие сил и моментов сил трения в кинематических парах) приводит к тому, что вблизи особых положений может произойти заклинивание механизма. Таким образом, работоспособ-

ность механизма будет теряться не в самом особом положении, а в некоторой окрестности этого положения.

Кроме того, в процессе работы мехатронных устройств с параллельной структурой возникают так называемые особые положения – внутренние связи, которые ограничивают их рабочие пространства и могут приводить к потере управляемости механизмом.

При выполнении мехатронным устройством монтажно-сборочных операций на выходное звено накладываются внешние связи, действуют активные и реактивные силы, и его движение даже при отсутствии особых положений становится несвободным, вынужденным движением, или движением с ограничениями. Многомерность и взаимосвязанность системы управления приводами кинематических звеньев МСПС, особенно в случае непараллельности подвижной и неподвижной платформ, приводит к необходимости применения цифровых методов решения прямых и обратных задач, исследования динамики процесса управления и проектирования данных механизмов.

Построение кинематических структур механизмов параллельной структуры, исследование их динамических свойств и вопросы проектирования рассмотрены в работах И.И. Артоболевского, Ф.М. Диментберга, В.Л. Афонина, В.В. Бушуева, Е.И. Воробьева, В. Гауфа, В.А. Глазунова, А.Ш. Колискова, М.З. Коловского, А.Ф. Крайнева, Д. Стюарта, К. Ханта и других авторов.

Система управления приводами таких мехатронных устройств должна обеспечивать планирование траектории движения выходного звена с учетом внешних связей, необходимости обхода особых положений или алгоритм управления, позволяющий вывести МСПС из особого положения и не допустить потери управляемости. Один из путей решения данной проблемы – применение позиционно-силового управления.

Значительный вклад в создание и развитие теории и систем ПСУ внесли отечественные и зарубежные ученые: Д.М. Гориневский, Е.Д. Девянин, В.С. Кулешов, Г.В. Письменный, Ю.В. Подураев, В.Ф. Филаретов, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, J.J. Craig, N. Hogan, F.Y. Hsu, M. Iwasaki, S. Jung, O. Khatib, C. Kwan, M. Namvar, M.H. Raibert, B. Siciliano, C.J. Tsaprounis, M. Vukobratovic, D. Wang, T. Yoshikawa и др.

Другое направление развития современной робототехники и мехатроники, рассматриваемое в книге, – создание систем управления мобильными роботами (МБР) для технической диагностики состояния, неразрушающего контроля и ремонтно-восстановительных работ внутри трубопроводов типа газораспределительных сетей. Протяжённость трубопроводов газораспределительных сетей, в том числе региональных газопроводов и газопроводов-отводов среднего и высокого давления (до 0,6 МПа), в Рос-

сии сегодня – более 840 тыс. км, что почти в четыре раза превышает протяжённость магистральных газо-, нефте- и нефтепродукто-трубопроводов вместе взятых. На первом этапе внутритрубной дефектоскопии трубопроводов по РД-51-2-97 определяются особенности и дефекты геометрии (вмятины, гофры, овальности, сплющивания, сужения), вызывающие уменьшение его проходного сечения. С точки зрения управления, выполнение технологических диагностических и ремонтно-восстановительных операций внутри трубопроводов характеризуется переменностью их геометрии и действием внешних связей, обусловленных взаимодействием робота с поверхностью трубопровода.

Применение МБР с позиционно-силовым управлением – один из путей повышения эффективности выполнения операций внутритрубной диагностики и ремонта трубопроводов региональных газопроводов и газопроводов-отводов среднего и высокого давления.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ КАК ОБЪЕКТОВ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

§ 1.1. Анализ параллельных кинематических структур манипуляционных систем робототехнических и мехатронных устройств¹

Классификация кинематических структур манипуляционных систем робототехнических и мехатронных устройств может быть представлена в виде схемы, показанной на рис. 1.1.

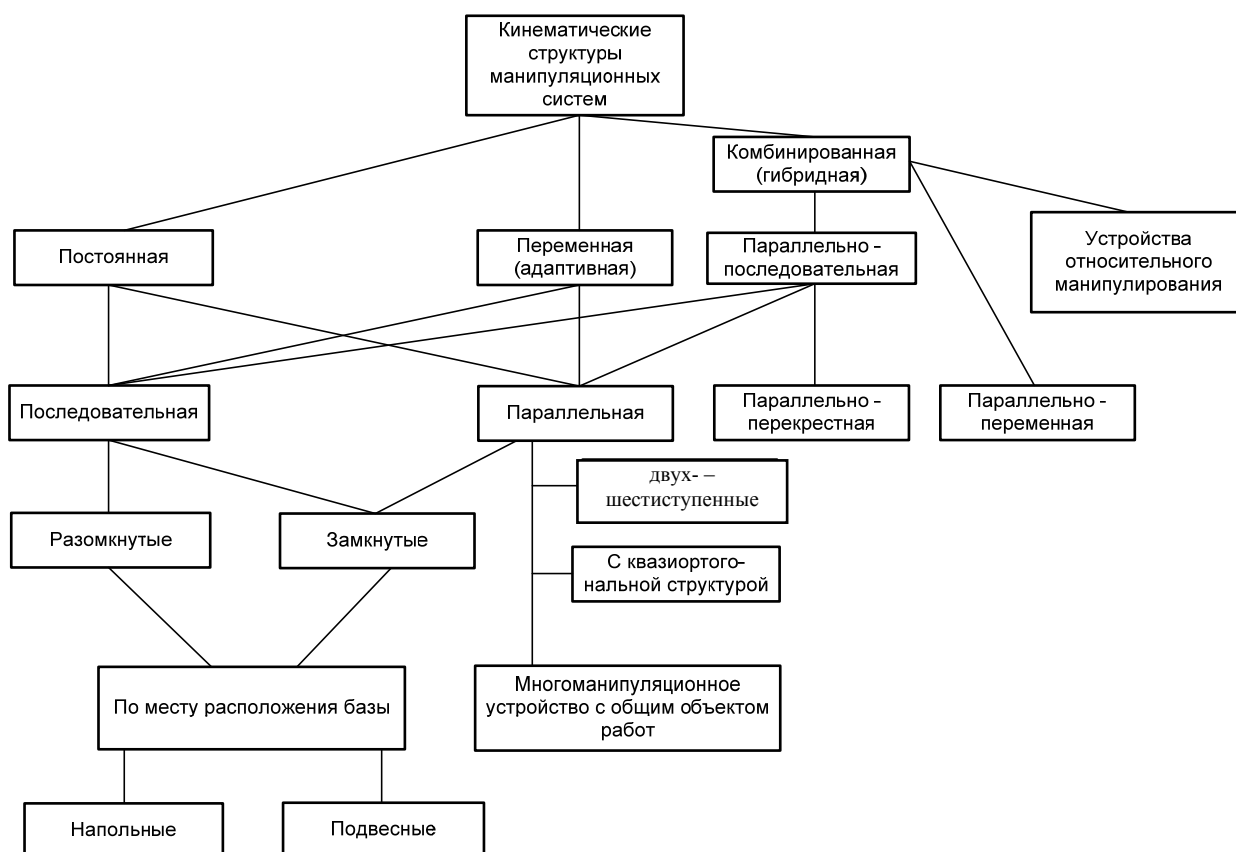


Рис. 1.1. Кинематические структуры манипуляционных систем робототехнических устройств

¹ Параграфы 1.1 - 1.3 написаны совместно с кандидатом технических наук Казым Хуссейном Т. (республика Ирак).

Манипуляционные системы (манипуляторы) с последовательной структурой состоят из нескольких звеньев, последовательно соединенных различными типами соединений. Так как один конец исполнительного устройства (ИУ) неподвижен, а второй свободно движется в пространстве, то их еще называют устройствами с разомкнутой кинематической цепью. При выполнении технологических операций со связанным объектом кинематическая цепь замыкается.

Если к мехатронным и робототехническим системам предъявляются повышенные требования по грузоподъемности, жесткости и точности, то предпочтение по сравнению с механизмами с последовательным расположением звеньев отдается МСПС [17, 57]. Эти механизмы отличаются тем, что выходное звено связано с основанием шестью соединительными кинематическими цепями, каждая из которых содержит одну поступательную пару, снабженную приводом, и две сферические пары. Обобщенными координатами здесь являются расстояния между центрами сферических пар, поэтому данные механизмы получили название l -координатных [47].

Выходное звено МСПС соединено с основанием некоторой кинематической цепью, у которой общее число звеньев – не больше шести. Такая кинематическая цепь при отсутствии локальной внутренней подвижности и линейной зависимости между кинематическими винтами пар налагает D связей на движение выходного звена [3, 47]:

$$D = -6n + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1, \quad (1.1)$$

где n – количество промежуточных звеньев цепи; p_5, p_4, \dots, p_1 – количество одно-, двух-, ..., пятиподвижных пар (подсчет p_5, p_4, \dots, p_1 ведется после замены кинематических соединений эквивалентными кинематическими парами). Если $D = 0$, то присоединяемая цепь не налагает связей на движение выходного звена; при $D < 0$ в присоединяемой цепи имеется подвижность, не связанная с перемещением выходного звена; если $D > 0$, то присоединение цепи приводит к уменьшению числа степеней свободы на D .

Далее будут рассматриваться структуры, у которых $D \geq 0$. При этом структурная формула имеет вид:

$$W = 6 - \sum_{i=1}^k D_i = 6 + \sum_{i=1}^k (6n_i - 5p_{5,i} - \dots - p_{1,i}), \quad (1.2)$$

где W – число степеней свободы механизма; n_i – количество промежуточных звеньев i -й соединительной цепи; $p_{5,i}, p_{4,i}, \dots, p_{1,i}$ – количество одно-, двух-, ..., пятиподвижных пар i -й цепи; i, k – номер и число присоединяемых кинематических цепей.

На основе формулы (1.2) был проведен синтез всевозможных схем механизмов параллельной структуры [17, 70] при $W = 1 \dots 6$, $k = 2 \dots 6$. Эти базовые схемы отличаются набором D_i в соединительных кинематических цепях. Схемы синтезированы из условия, что каждая соединительная цепь либо должна содержать приводную пару, либо налагать некоторое число связей на движение выходного звена. При этом количество соединительных цепей с $D_i = 0$ не превышает число степеней свободы механизма. Синтезированные схемы классифицированы на основе следующих признаков: число степеней свободы механизма W , число соединительных цепей k , общее число степеней свободы и число пар разных классов в каждой соединительной цепи.

Следующий существенный признак, значительно расширяющий классификацию, – количество приводов в каждой соединительной кинематической цепи. Из всего многообразия механизмов параллельной структуры особый интерес представляет класс механизмов, в которых все звенья работают на растяжение-сжатие. В него входят механизмы, все приводы которых должны быть линейными, а оси сопряженных звеньев должны пересекаться в одной точке.

Методика структурного анализа механизмов параллельной кинематики, предложенная К. Хантом, заключается в выделении неподвижного основания механизма, стойки и выходного звена. Затем вводятся кинематические цепи. Классификация осуществляется по числу степеней свободы, которых лишается механизм при вводе каждой цепи, общему числу степеней свободы механизма и числу кинематических ветвей.

Одним из первых таких механизмов была платформа Стюарта, а позднее манипулятор Данилевского. Исследования показали, что, изменяя взаимное расположение центров шарниров основания и выходного звена, можно получить целый ряд МСПС. Разновидности механизмов параллельной структуры подробно рассмотрены в работах В.А. Глазунова, А.Ф. Крайнева, А.Ш. Колискова [12, 13, 17, 47 - 49] и других авторов. Классификация механизмов параллельной структуры может быть представлена в виде схемы, показанной на рис. 1.2.

Топологию кинематических связей параллельных манипуляторов принято описывать рядом букв, кодирующих тип и последовательность кинематических пар, начиная с неподвижной платформы (R – вращатель-

ная пара, P – поступательная пара, S – шаровая пара, U , или RR – карданное соединение). Для того чтобы подчеркнуть, что данная кинематическая пара активная, ее буква подчеркивается.



Рис. 1.2. Классификация МСПС

В области параллельных механизмов с шестью степенями свободы наиболее популярным является $6-UPS$ параллельный механизм с совмещенными шарнирами, обычно называемый платформой Гауфа-Стюарта, или гексаподом (рис. 1.3) [13, 17, 48, 70].

Гексаподы, представленные на рис. 1.3, выполнены на базе шести мехатронных телескопических устройств 2 поступательного перемещения,

например, шариковых винтовых передач (ШВП). Для изменения их длины служат регулируемые электроприводы. Контроль за перемещением осуществляется датчиками положения. Одним концом телескопическое устройство шарнирно соединено с основанием 1 (нижней платформой), (рис. 1.3, *а*), а другим (также шарнирно) – с подвижной верхней платформой 3 (см. рис. 1.3, *а*), на которой расположен исполнительный орган (ИО) (например, инструментальная или измерительная головка, испытуемая деталь и т. д.) Программно задавая различное перемещение каждого винта ($h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$), можно управлять положением ИО по шести координатам ($X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$).

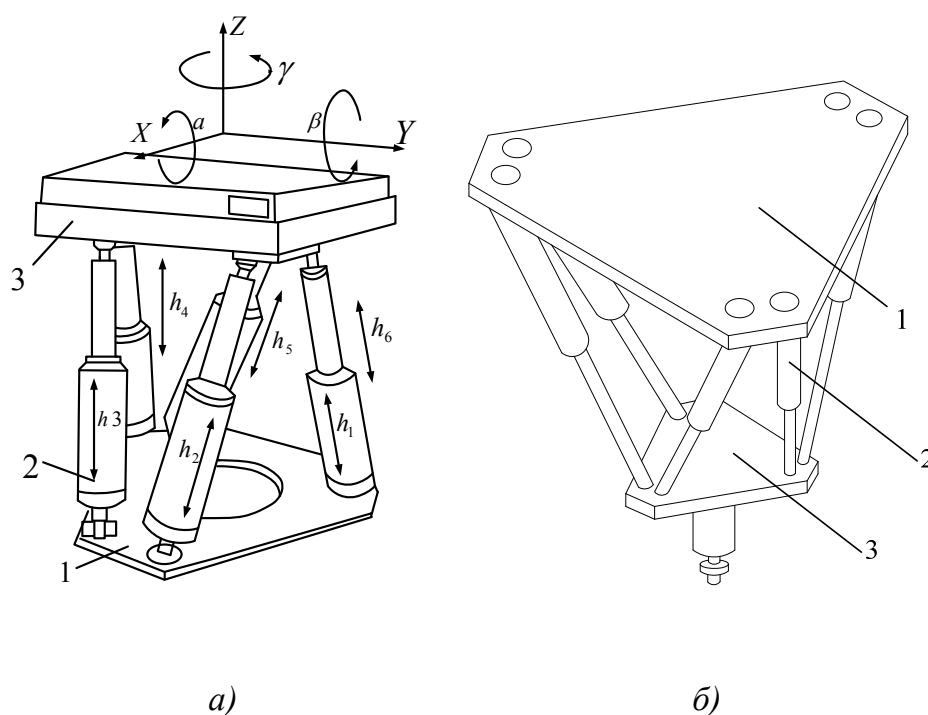


Рис. 1.3. Общий вид платформы Стюарта: *а* – классическая схема; *б* – обращенная схема

Кинематическая схема классической платформы Стюарта с совмещенными шарнирами представлена на рис. 1.4, *а*.

При обращенной схеме (рис. 1.3, *б*) опорный шестиугольник 1 (конструкция, его несущая, не показана) располагается сверху, а треугольная подвижная платформа 3 , находится внизу.

Кинематическая схема (рис. 1.4, *б*), отличающаяся порядком присоединения приводных звеньев к платформе, состоит из треугольного основания и треугольной платформы, соединенных между собой шестью при-

водными звеньями, сгруппированными следующим образом: к точке a платформы присоединены три приводных звена, к точке b одно и к точке c два приводных звена. Подобные МСПС получили название Flagge Parallel Manipulators.

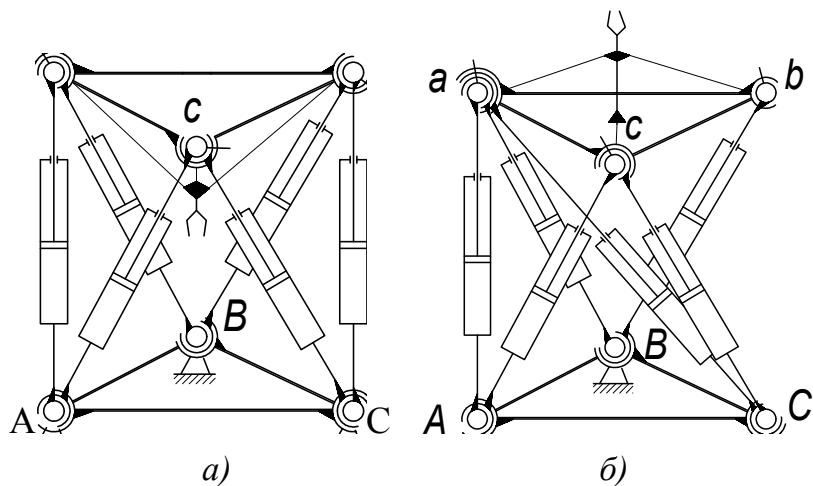


Рис. 1.4. Кинематическая схема платформы Стюарта с совмещенными шарнирами: a – классическая платформа; b – платформа типа Flagge Paralled Manipulators

В схеме, представленной на рис. 1.5, шарниры приводных звеньев разнесены таким образом, что каждое звено соединено только с платформой и основанием.

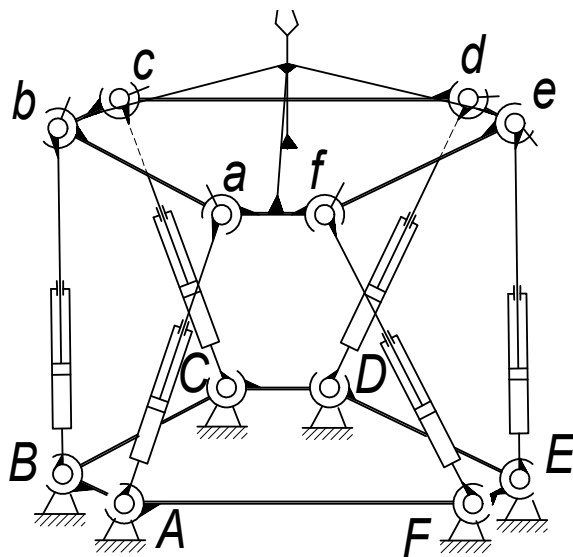


Рис. 1.5. Кинематическая схема с разнесенными шарнирами

Такие манипуляторы имеют меньшую рабочую область, чем классический вариант платформы Стюарта, но при этом обладают рядом преимуществ. Важное достоинство представленной схемы – простота её ре-

лизации и более низкая стоимость, чем в первом случае. Также несложно заметить, что для манипуляторов, построенных по данной схеме, упрощается процесс обхода особых положений. Это достигается путем поворота одного или нескольких приводов вокруг вертикальной оси.

Виды систем приводов платформы Стюарта представлены на рис.1.6.

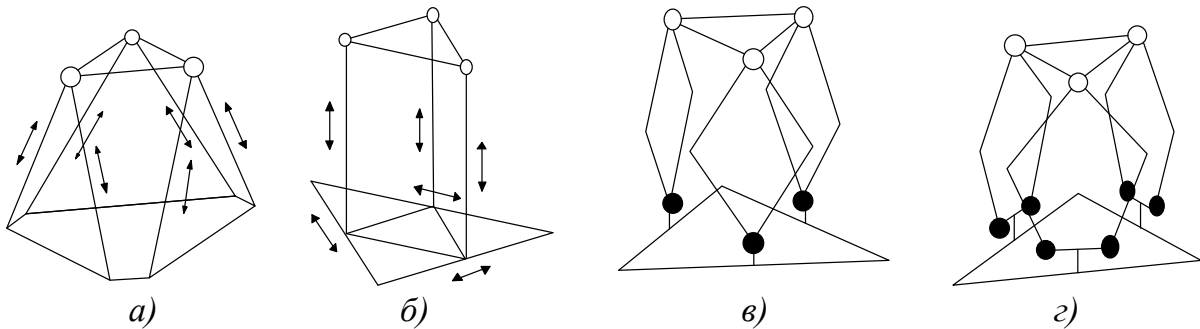


Рис. 1.6. Система приводов платформы Стюарта: а, б – линейные приводы; в, г – приводы вращательного типа

Существует класс схем МСПС с вращательными приводами. Пример такой схемы показан на рисунке. 1.7.

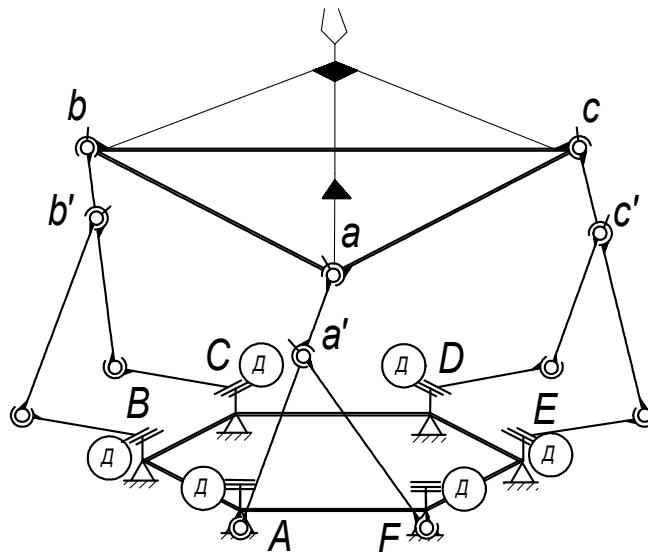


Рис. 1.7. Шестистепенной механизм с вращательными приводами

Валы шести вращательных двигателей, установленных на неподвижном основании, имеют кривошпы, перемещающие нижние концы рычагов, которые попарно соединены друг с другом шарнирами.

Второй по популярности параллельный механизм с шестью степенями свободы – это, несомненно, 6-RUS. Часто U-соединение в цепи заменяют на S-соединение. Это приводит к избыточной степени свободы в каждой

связи, однако, это не изменяет свойства $6-RUS$ параллельного механизма. Точно так же U - и S -соединения каждой штанги можно взаимозаменять без изменения характеристик механизма, поэтому обычно не делают различий между штангами типа RUS , RSS или RSU , и все обозначаются как RUS .

Еще один распространенный вид параллельных манипуляторов – это механизмы с топологией $6-PUS$. По сравнению с платформой Стюарта масса подвижных частей и вероятность столкновения опор у $6-PUS$ механизма меньше. Благодаря использованию линейных приводов $HEXAPOD$ -робот с топологией $6-PUS$ отличается более высокими статическими (особенно механическая жесткость) и динамическими (быстродействие) характеристиками. В случае необходимости размещения на основании и выходном звене элементов кинематических пар приводных цепей возможно увеличение габаритов основания, выходного звена и механизма в целом.

Возможно также исполнение манипуляторов по параллельно-последовательной схеме. Внешний вид одного из вариантов таких манипуляторов – манипулятора Данилевского – приведен на рис. 1.8.

Механизм состоит из основания, на котором при помощи сферических шарниров крепятся шесть поступательных приводов. Штоки приводов сферическими шарнирами присоединены к крестовине, которая, в свою очередь, является базой для установки линейного привода схвата. Достоинства данной схемы, по сравнению со стандартной схемой платформы Стюарта, – увеличенный рабочий объем за счет введения избыточной степени подвижности (поворот или/и выдвигание схвата) и повышенная маневренность манипулятора. Недостатками данной схемы можно считать все недостатки, присущие стандартной схеме платформы Стюарта, а также наличие консольного элемента, что уменьшает жесткость манипулятора, так как звено схвата работает на изгиб.

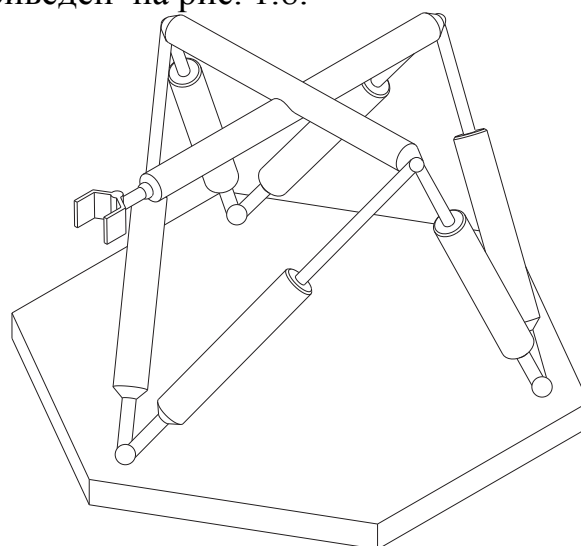


Рис. 1.8. Манипулятор Данилевского

Для МСПС в работах [48, 70] предложены механизмы параллельно-перекрестной и параллельно-переменной структур, представляющие собой гибридные (комбинированные) кинематические структуры.

На рис. 1.9 показаны два механизма параллельно-перекрестной структуры с шестью степенями свободы и шестью кинематическими цепями, три из которых расположены параллельно и три перекрестно.

Возможны два варианта расположения приводов: в первом случае все

двигатели расположены в рабочей зоне (рис.1.9, а); во втором случае двигатели расположены вне рабочей зоны (рис.1.9, б). Сферические кинематические пары могут быть выполнены в виде совокупности вращательных пар.

Такая компоновка может способствовать уменьшению габаритов основания и выходного звена, а также увеличению жесткости. Во втором случае с помощью изменения расположения приводной кинематической пары удастся избежать особых положений и увеличить объем рабочего пространства.

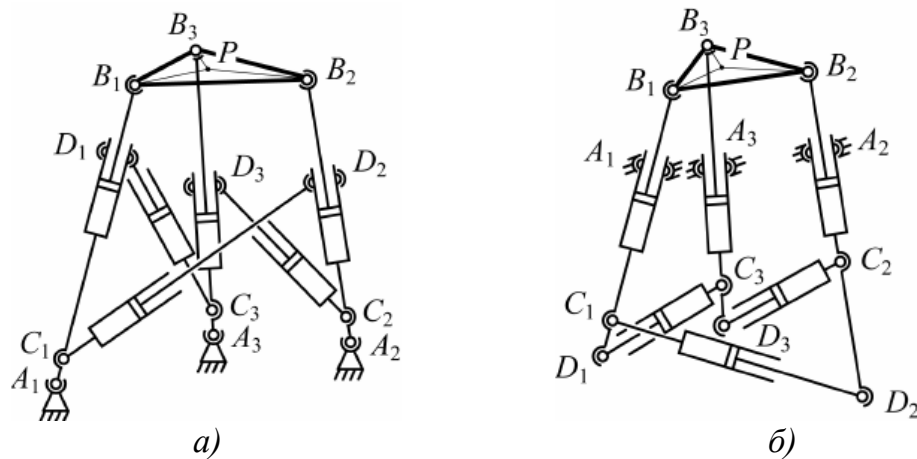


Рис.1.9. Манипуляционные механизмы с параллельно-перекрестной структурой

Параллельно-переменная структура (рис.1.10) применяется в тех случаях, когда предписанные траектории манипулятора пересекают зону, где углы давления приобретают недопустимые значения. Исходная структура (рис.1.9, а) с тремя степенями свободы содержит основание $A_1 A_2 A_3$, выходное звено $B_1 B_2 B_3$ и три одинаковые кинематические цепи, включающие одну вращательную пару A_i , одну поступательную пару C_i и одну сферическую пару B_i ($i = 1, 2, 3$).

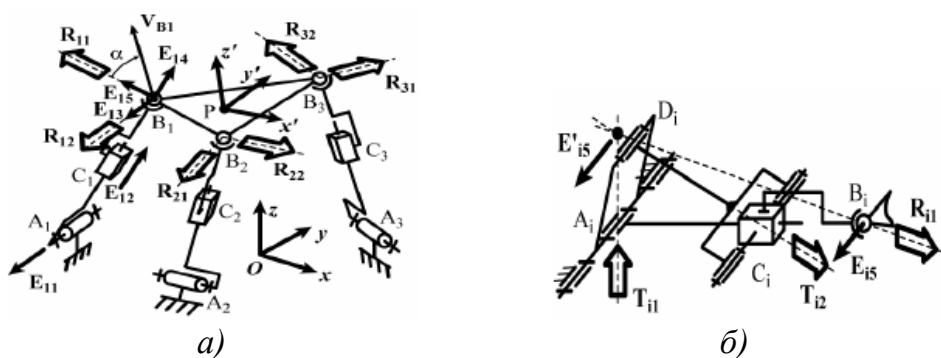


Рис.1.10. Манипуляционные механизмы с параллельно-переменной структурой: а – исходная структура; б – с изменением одной кинематической цепи

Необходимо изменить структуру по крайней мере одной кинематической цепи (рис. 1.10, б). Вращение от двигателя передается на звено A_iD_i ($i = 1, 2, 3$). Переключение осуществляется муфтой. Система силовых винтов связей в этом случае отличается от той, что соответствует исходной структуре (рис. 1.10, а), поэтому углы давления будут иными. Тем самым удастся найти совокупность приводных кинематических пар, обеспечивающих наиболее благоприятные условия функционирования.

Пример схемы многоманипуляционной робототехнической системы, состоящей из трех манипуляторов, работающих с одним общим объектом, представлен на рис. 1.11 [89 – 91]. Подобные системы также относятся к классу механизмов с параллельной структурой.

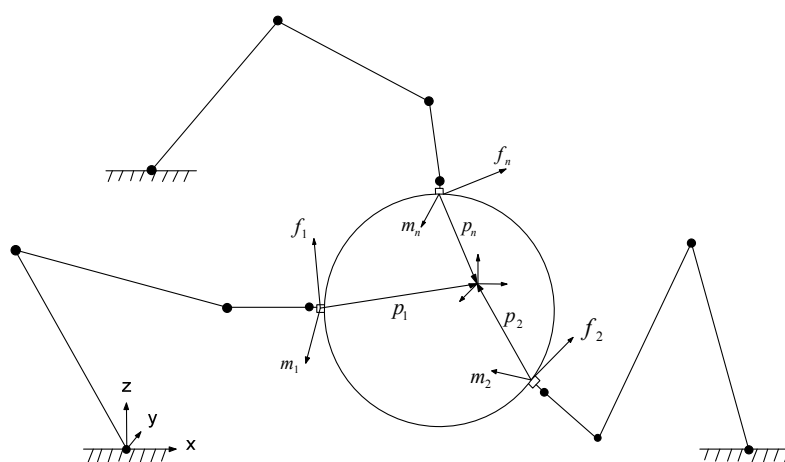


Рис.1.11. Схема многоманипуляционной робототехнической системы механизма с параллельной структурой

Механизмы относительного манипулирования [3, 49] могут обеспечить высокую точность воспроизводимых движений и высокое быстродействие. Их можно использовать для осуществления технологических процессов обработки или сборки изделий, обладающих небольшой массой. Общий структурный признак системы относительного манипулирования – это наличие двух выходных подвижных звеньев $D3$ и $D4$, которые перемещаются двумя манипуляторами, расположенными на одном основании 3 (рис. 1.12).

Область применения МСПС очень широка: современные многокоординатные металлообрабатывающие станки и координатно-измерительные машины; несущие манипуляционные системы лазер-роботов, оптических устройств, телескопов и тренажеров; регулируемые шарнирные фермы строительных механизмов и т.д.

Существенные преимущества механизмов параллельной структуры определяются тем, что они воспринимают нагрузку, подобно пространственным фермам. Выходное звено механизмов параллельной структуры связано с основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых оснащена приводом либо налагает некоторое количество связей на движение выходного звена. К недостаткам МСПС можно отнести меньшее рабочее пространство, ограниченные углы поворота подвижной платформы, более сложную конструкцию механизма и относительно небольшую манипулятивность.

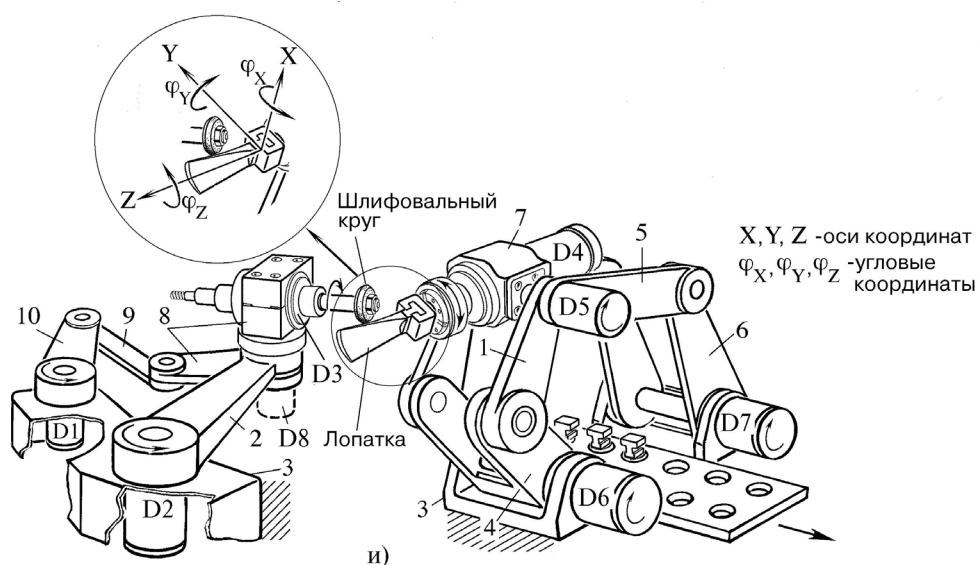


Рис. 1.12. Механизмы относительного манипулирования: (D1 – D8) – исполнительные электродвигатели; (1 – 10) – элементы кинематических цепей

Кроме того, в процессе работы МСПС возникают такие конфигурации кинематической схемы – «особые положения» [14, 17, 19, 56, 97, 99, 109, 111, 113, 114, 117, 123], которые могут привести к потере управляемости механизмом, поэтому система управления такого манипулятора должна не только обеспечивать требования по быстродействию, перерегулированию и т.п., но и избегать особых положений.

§ 1.2. Мехатронные и робототехнические устройства на базе манипуляционных систем с параллельной структурой

В качестве области применения шестистепенных МСПС рассматриваются примеры использования их при монтаже различных конструкций, в сборочных системах и пусковых установках беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с вертикальным стартом, в роботизированных технологических комплексах (РТК) лазерной обработки.

Сборочные робототехнические и мехатронные системы

Применение сборочных роботов, работающих по замкнутой схеме, рассмотрено в работах М. Вукобратовича, А.А. Гусева, Е.А. Девянина, И.Н. Егорова, А.А. Кобзева, Д.Е. Охоцимского, А.В. Тимофеева, Н. Van Brussel, С. Lee, J. Simons, R. Smith, D.T. Pham, P. Watson, D.E. Whitney и других авторов.

Выполнение сборочных операций по замкнутой схеме предполагает оснащение объекта сборки датчиками, позволяющими измерять силы и моменты, возникающие в процессе сборки. Реализацию восприятия сил и использования информации о силах можно обеспечить различными средствами. Здесь выделяется пассивная податливость и активное использование силомоментной информации.

В ряде сборочных роботов используют упругие элементы, установленные в запястье РО и чувствительные к силам, возникающим в месте контакта с внешней средой. Под действием этих сил упругие связи деформируются и обеспечивают малые смещения собираемых деталей, необходимые для правильной их ориентации. В этом случае используют устройства с пассивной податливостью.

Один из методов получения информации о силах и моментах, действующих на РО сборочного робота, – прямое измерение движущих сил и моментов робота с помощью силомоментных датчиков. Применение косвенных методов определения сил и моментов, в том числе с помощью наблюдателей [65], имеет определенные ограничения, связанные с необходимостью применения обратимых приводов и учета неоднородности инерционных сил, упругости элементов приводов штанг, изменения сил трения в степенях подвижности и т.д.

Один из вариантов получения и использования силомоментной информации – применение силомоментного датчика или наблюдателя силы в приводе каждой штанги МСПС сборочного робота, что позволяет осуществлять управление соответствующим приводом. Перспективно применение многокомпонентных силомоментных датчиков, установленных в запястье РО МСПС обращенной кинематики с обработкой информации индивидуальным микропроцессором (рис.1.13).

Шестистепенная сборочная МСПС в виде платформы Стюарта показана на рис.1.14, где приняты следующие обозначения: 1 – неподвижная платформа (база); 2 – шариковинтовые передачи с соответствующими дат-

чиками перемещения и высокомоментными двигателями, осуществляющими осевое перемещение кинематических звеньев (штанг); 3 – подвижная платформа (выходное звено); 4 – дополнительная технологическая платформа; 5 – направляющий конус; 6 технологический объект.

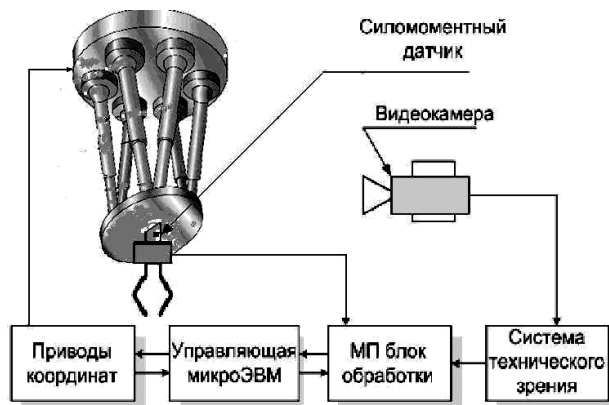


Рис. 1.13. Роботизированная сборочная система

Управление положением и ориентацией выходного звена платформы осуществляется изменением длин штанг. Основной элемент штанги – интегрально встроенный в нее электропривод вращательного или поступательного движения с беззазорной передачей. Жесткое соединение концов штанг с базой и выходным звеном гарантирует отсутствие «мертвого хода». Программно регулируя длину штанг, можно управлять положением выходного звена 3: перемещать его в вертикальном и горизонтальном направлениях, поворачивать в трех плоскостях. В качестве технологического объекта 6 может применяться как объект общепромышленного применения, так и типа беспилотного летательного аппарата с несущим винтом.

Для реализации алгоритмов управления движением выходного звена МСПС при действии связей на РО целесообразно применять позиционно-силовое управление роботом на основе использования информации об обобщенных координатах, скоростях, векторе сил и моментов.

Другой пример применения пространственных МСПС классической компоновки – использование их, например, для монтажа сотовых сегментов в экраны подземных тоннелей (рис. 1.15).

В качестве примера применения МСПС с кинематической обращенной схемой на рис. 1.16 показан роботизированный технологический комплекс подачи тепловыделяющих сборок (ТВС) [35, 77] с целью их аттестации для утилизации или дальнейшего использования на заводах по переработке ядерного топлива. Платформа, выполняющая операции перегрузки топлива, представляет собой мостовую конструкцию, перемещающуюся по

рельсам, вдоль которой движется тележка с лебёдкой. В состав платформы входят также захватный механизм для манипуляции с топливными элементами и двигатели приводов подъёмно-транспортных механизмов.

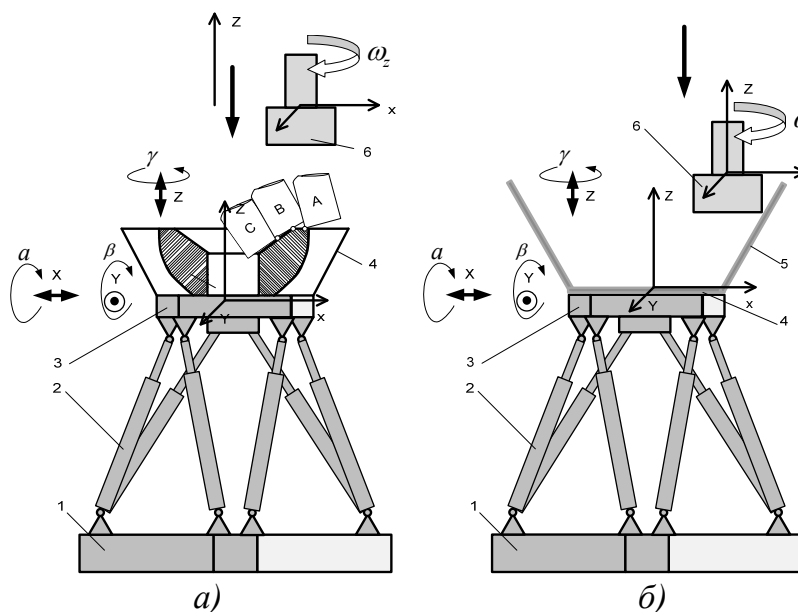


Рис. 1.14. Шестистепенная мехатронная монтажно-сборочная система с параллельной структурой: а – одноканальная адаптация; б – двухканальная адаптация

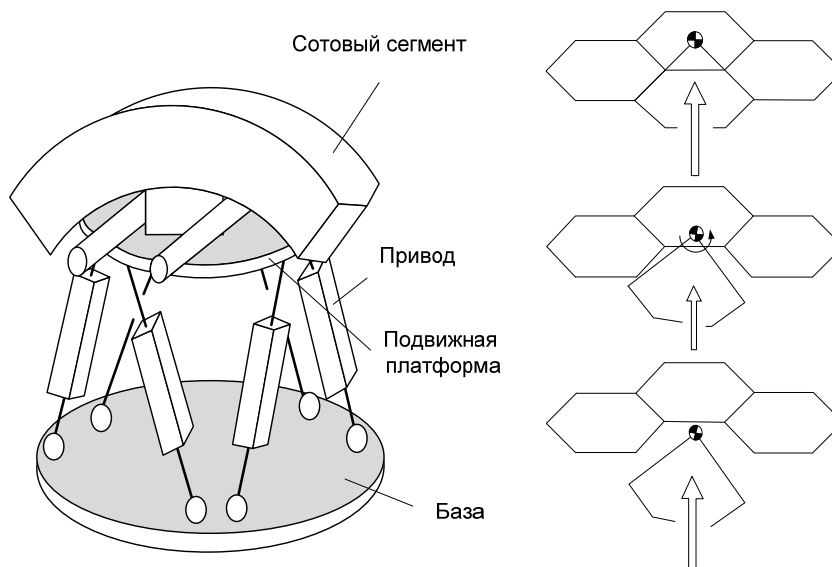


Рис. 1.15. МСПС для монтажа сотовых сегментов

Использование МСПС и силомоментного оцувствления (СМО) робото-технической системы вызвано повышенными требованиями к точности отработки функциональных перемещений в условиях нестационарности геометрии ТВС. Сутбильность объекта и его относительно большие разме-

ры накладывают ограничения на скорости и ускорения при его транспортировке.

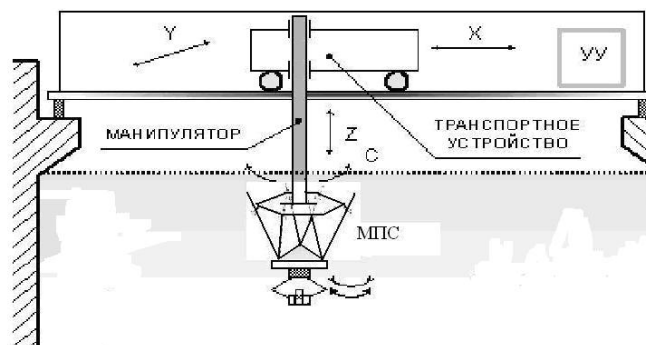


Рис. 1.16. Манипуляционный робот портального типа с исполнительным устройством параллельной структуры

Применение МСПС, выполненной по обращенной схеме, позволяет решить проблему особых положений классической схемы платформы Стюарта. Ограниченность перемещений шарниров платформы определяется рядом факторов: недопустимостью пересечения звеньев (во многих конфигурациях звенья «мешают» друг другу), недопустимостью особых положений (в которых происходит потеря управляемости), снижением продольной устойчивости при сжимающих усилиях, но в первую очередь конструктивной ограниченностью сверху по длинам приводных звеньев (не более трех метров) и по ходам штанг (до полутора метров), а также по линейным скоростям перемещений. Известно, что для обычных линейных приводных звеньев отношение максимального расстояния между осями шарниров на концах к минимальному не превышает 1:4.

§ 1.3. Мобильные робототехнические комплексы вертикального пуска и посадки беспилотных летательных аппаратов

В общем случае беспилотным летательным аппаратом (БЛА) называют любой летательный аппарат без экипажа с дистанционным или автономным управлением: все управляемые ракеты, планирующие авиабомбы и исследовательские летательные аппараты [86 – 88, 128]. В начале 1980-х годов появился новый класс беспилотных аппаратов – миниатюрные и относительно дешевые дистанционно пилотируемые летательные аппараты (мини ДПЛА).

В отечественной литературе за ними утвердились аббревиатуры

ДПЛА и БЛА, в англоязычной — UAV (Unmanned Aerial Vehicle) и прозвище «drone». По массе запускаемого объекта БЛА подразделяются на микроаппараты весом не менее 5 кг, мини - менее 200 кг, миди – менее 1000 кг и макси – свыше 1000 кг.

После запуска, который может производиться с пусковой установки, взлетно-посадочной полосы или грунта, летательный аппарат выводится на траекторию полета по маршруту в зону непосредственного решения целевой задачи. Основные элементы комплексов для предстартовой подготовки и запуска летательных аппаратов (ЛА) – пусковые устройства и установки (ПУ), состоящие из пускового стола (или направляющих), механизмов наведения, средств горизонтирования, газоотражателей, проверочно-пусковой аппаратуры, источников электропитания и др. По виду старта аппарата ПУ разделяются на установки с вертикальным и наклонным стартом, по подвижности – на стационарные, полустационарные (разборные) и подвижные (мобильные).

Пусковая установка с наклонным стартом БЛА показана на рис. 1.17.



Рис. 1.17. Пусковая установка третьего поколения МС01515L с БЛА

Габаритные размеры установки: длина – 3495 мм; ширина – 920 мм; высота – 750 ... 1400 мм при наклоне от 0° до 15° . Угол пуска – 5° ... 15° . Масса установки и БЛА равны, соответственно, 255 и 20 кг. Максимальное значение взлетной скорости – 15 м/с при ускорении $< 12g$.

Анализ конструкций БЛА с различными видами ПУ и условий их эксплуатации показывает актуальность создания аппаратов с вертикальным стартом и соответствующих мехатронных систем, в том числе робототехнических мобильных комплексов для их запуска и посадки.

В частности, ВМС традиционно в большей степени проявляют интерес к БЛА с вертикальным взлетом и посадкой, способных в автоматическом режиме взлетать и садиться на ограниченных площадках. Требования ВМС, как правило, включают увеличенную продолжительность полета БЛА. Это требует создания достаточно крупного БЛА массой до 800 кг (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Беспилотные летательные аппараты; а – БЛА CL-327; б – Seaatos морского базирования

Исследование поверхности Земли и мониторинг состояния наземных объектов типа лесных и сельскохозяйственных массивов, магистральных газо- и нефтепроводов представляет собой обширную область для применения БЛА. Аналогичные задачи возникают в районах стихийных бедствий.

Один из современных БЛА – аппарат iSTAR фирмы Allied, стартующий со взлётно-посадочной полосы. БЛА iSTAR способен нести 9 кг полезного груза и 5,5 кг топлива. Аппарат оснащён GPS, различными датчиками и видеокамерами. Спрятанный ротор должен обеспечивать слабое шумовое воздействие и малозаметный инфракрасный след. В работах [86 –88] приводятся данные о мобильных пусковых установках для БЛА, в том числе с вертикальным несущим винтом, обеспечивающих взлет-посадку ЛА, транспортировку его в конечный пункт и возможность дозаправки его топливом (рис. 1.19).

С целью улучшения условий эксплуатации пусковая установка оснащена четырьмя лепестками (рис. 1.20).

Находясь в сжатом состоянии, они улучшают условия транспортировки, а при взлете аппарата создают эффект пусковой трубы (рис. 1.20, б). Во время посадки ЛА применение лепестков позволяет увеличить площадь посадочной области ПУ и создать посадочный конус для ориентации аппарата (рис. 1.20, а).

В центре фиксатора запуска находится механизм захвата и освобождения, который крепится снизу ЛА и используется при запуске для удерживания аппарата внизу до тех пор, пока скорость двигателя не достигнет значения, требуемого для взлета аппарата. При пуске ЛА механизм захвата освобождается. Этот механизм также объединяет топливный насос и сопло для заправки ЛА топливом.



Рис. 1.19. Мобильное пусковое устройство для БЛА с вертикальным несущим винтом



а)



б)

Рис. 1.20. Мобильное пусковое устройство с дополнительными лепестками пуска, посадки и транспортировки: а – положение при посадке БЛА; б – положение при транспортировке и пуске БЛА

Когда БЛА садится на фиксатор запуска, множество вращающихся пальцев захватывают посадочное кольцо аппарата и тянут его к центру фиксатора (рис. 1.21). Механизм центрального затвора затем поднимается для сопряжения с соплом заправки для подготовки к заправке и повторного запуска.

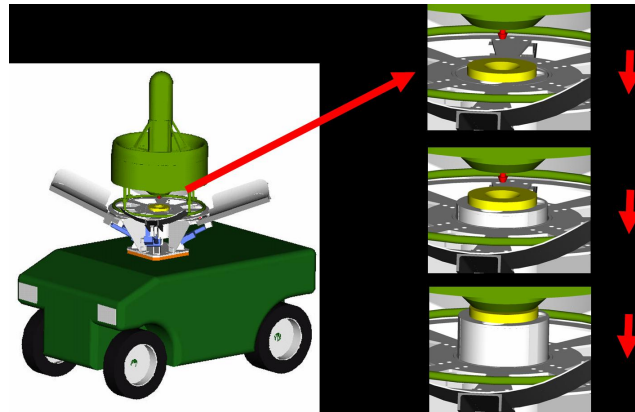


Рис.1.21. Схема фиксирующего механизма

Проблема ориентации и стабилизации горизонтального положения пускового стола решается применением дополнительного трех- – шести- степенного мехатронного устройства с параллельной структурой и соответствующим управлением.

Предложенный в ВлГУ вариант модификации мобильного РТК пуска БЛА показан на рис. 1.22. В качестве пускового стола предложено применить выходное звено платформы Стюарта.

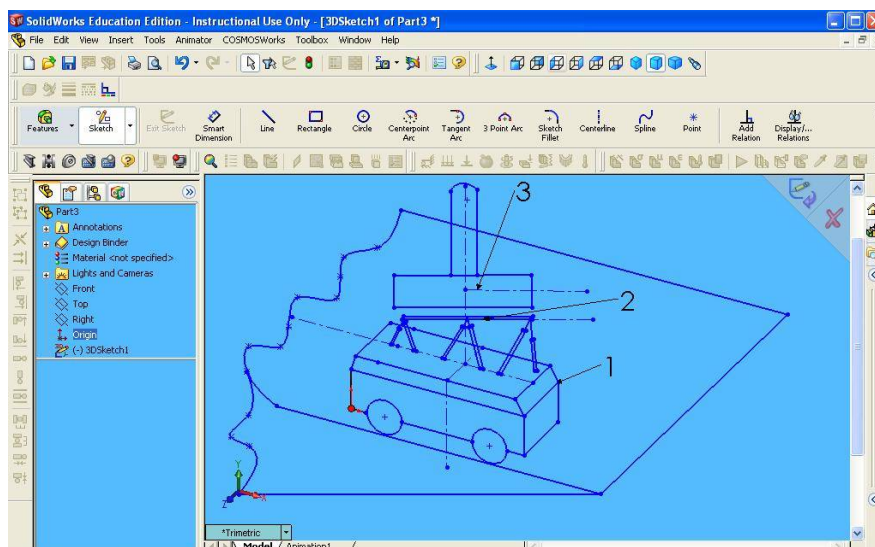


Рис. 1.22. Схема варианта модификации мобильного пускового РТК: 1 - транспортное средство; 2 - пусковой стол; 3 - БЛА

Одна из проблем применения беспилотных (дистанционно-пилотируемых) летательных аппаратов с вертикальным взлетом, относящихся к автономным мобильным роботам, – необходимость стабилизации подвижной платформы пускового стола в горизонтальном положении при произвольном положении базы платформы, расположенной на транспортном средстве.

§ 1.4. Манипуляционные системы робототехнических комплексов лазерной обработки с параллельной кинематикой

Оборудование для лазерной обработки подразделяется на технологический лазер (ТЛ), лазерную технологическую установку (ЛТУ) и роботизированный технологический комплекс лазерной обработки.

Все виды РТК лазерной обработки в зависимости от вида перемещаемого объекта подразделяются на РТК с перемещением: изделия; зеркал систем транспортировки излучения (СТИ) и оптической головки (ОГ); изделия и оптических элементов (СТИ, ОГ).

Компоновка комплексов с манипуляторами изделия на базе двухкоординатных столов и ротационных систем представлена на рис. 1.23. На рис. 1.23, а изделие 1 закрепляется на координатном столе 2 и перемещается во время обработки по двум координатам X и Y. Рядом со столом установлена стойка с консолью 3, на которой закреплен вертикальный манипулятор 4. Для точной установки точки фокуса оптическая головка 5 имеет возможность дополнительного перемещения по оси Z в пределах 50 мм.

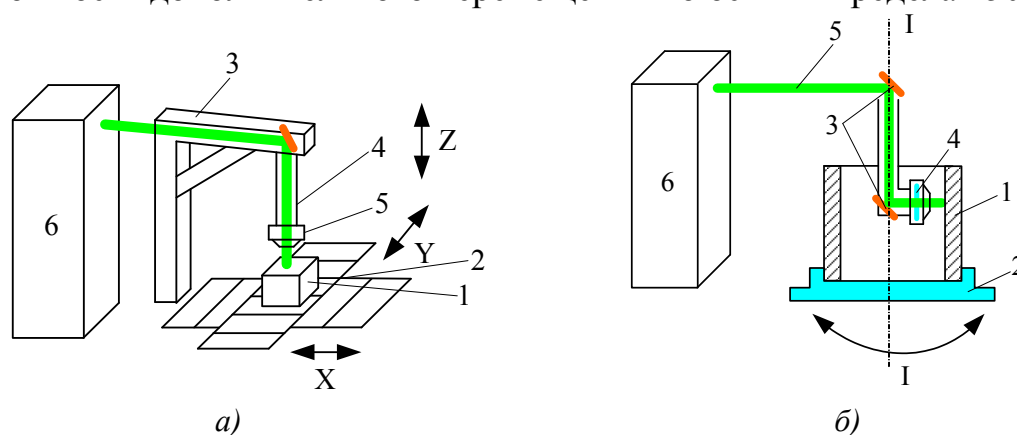


Рис. 1.23. Схема РТК лазерной обработки с манипулятором изделия на базе: а – двухкоординатных столов; б – ротационной системы

При лазерной обработке тел вращения в качестве манипулятора изделия используют ротационные системы горизонтального, вертикального и вертикально-горизонтального типов. В РТК с ротационной системой вертикального типа (рис. 1.23, б) лазерное излучение 5 из ТЛ 6 через систему зеркал 3 и фокусирующую линзу 4 передается на изделие 1, которое вра-

щается относительно вертикальной оси – ротационной системой 2.

РТК со сложным перемещением изделий при постоянной длине оптического тракта реализуются в виде комбинации двухкоординатного стола и ротационных систем (рис. 1.24, а), трехкоординатных и ротационных систем (рис. 1.24, б), манипуляционных роботов (рис. 1.24, в).

При лазерной обработке объектов сложной пространственной конфигурации с нелинейной поверхностью типа металлоконструкций, корпусов судов и бронетехники целесообразно применение многофункциональных лазерных технологических комплексов с СТИ в виде манипулятора оптики (МО) на основе волоконной оптики или системы отклоняющих зеркал, перемещающихся по линейной, вращательной и сложной траекториям. ЛТК с МО последнего типа получили название «лазер-роботы» [23, 36, 37].

Манипулятор лазер-робота представляет собой двухманипуляционную исполнительную систему, которая выполняет две функции: транспортировку излучения от лазерного излучателя до ОГ с помощью МО; вывод ОГ в зону обработки, перемещение и ориентацию ее относительно поверхности объекта обработки (ОО) с помощью транспортного манипулятора (ТМ).

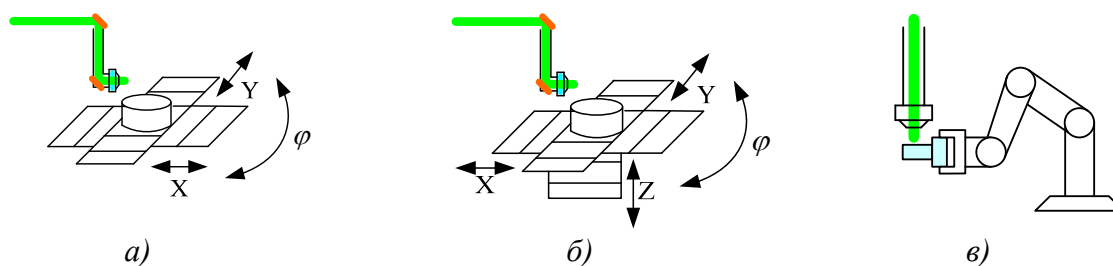


Рис. 1.24. РТК лазерной обработки со сложным перемещением изделий на основе комбинации: а – двухкоординатного стола и ротационных систем; б – трехкоординатного стола и ротационных систем; в – манипуляционных роботов

Структура многофункциональных лазер-роботов

Многофункциональный лазер-робот (МЛР), в общем случае, состоит из источника лазерного излучения (ИИ), манипуляционной исполнительной системы (МИС) в виде совокупности МО и ТМ, системы управления (СУ) информационной системы и вспомогательного технологического оборудования (рис. 1.25) [9, 36, 77].

МО представляет собой совокупность отклоняющих и передающих зеркал, кинематической цепи, соединяющей эти зеркала в случае его автономного исполнения, системы охлаждения зеркал и подачи газов в зону обработки и ОГ, которая является рабочим инструментом (РИ) лазер-робота.

В состав ТМ входят исполнительные кинематические цепи (ИКЦ),

приводы, механизмы передачи и преобразования движения. В ряде случаев применяют два ТМ – основной (ОТМ) и дополнительный (ДТМ), которые предназначены соответственно для выполнения основных и вспомогательных операций. Операции, выполняемые МЛР с одним ТМ, реализуются последовательно, а в случае использования ОТМ и ДТМ они могут осуществляться параллельно. Манипуляционная исполнительная система (МИС) представляет собой совокупность манипулятора оптики и одного или двух транспортных (технологических) манипуляторов, обеспечивающих транспортировку лазерного луча к обрабатываемой поверхности и выполнение комплекса вспомогательных операций, необходимых при лазерной обработке.

В качестве вспомогательного технологического оборудования применяются роботы-манипуляторы загрузки-выгрузки; системы нанесения и контроля поглощающих покрытий, контроля качества обработки, обратной связи по расстоянию до поверхности детали, поиска стыка и определения границ заготовок, контроля ориентации нормали ОГ по отношению к ОО.

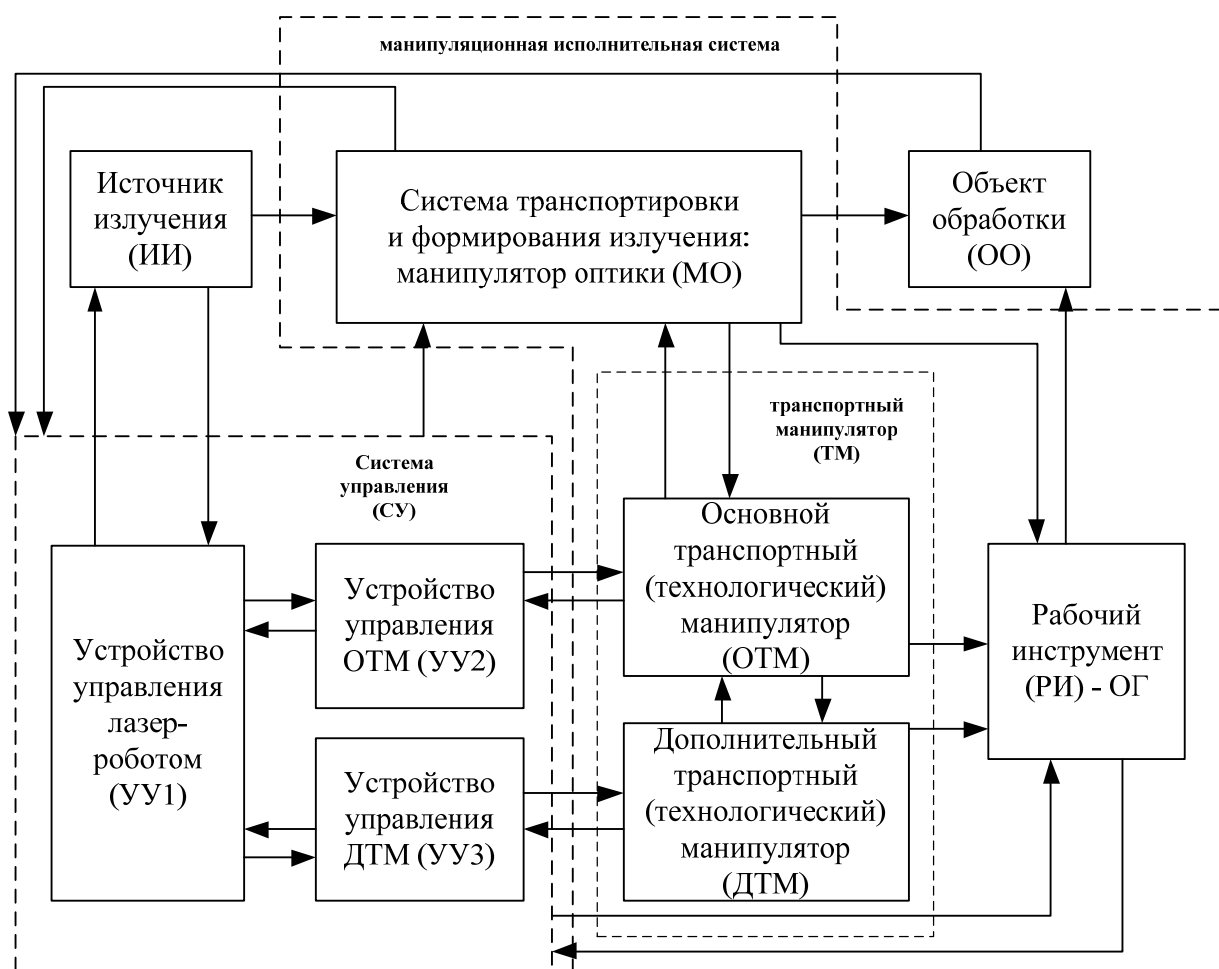


Рис. 1.25. Обобщенная структура многофункционального лазер-робота

Построение манипуляционных исполнительных систем

Варианты технологического построения производственных комплексов лазерной обработки на базе многофункциональных лазер-роботов и примеры построения их манипуляционных исполнительных систем при обработке крупногабаритных объектов представлены соответственно на рис.1.26 и 1.27 [23, 37], где приняты следующие обозначения: 1 – луч лазера; 2 – основной транспортный манипулятор; 21 – технологический манипулятор; 3 – автономный (рис.1.27, а) или встроенный (рис.1.27, а – з) манипулятор оптики; 4 (см. рис.1.27), 5 (см. рис.1.26) – оптическая головка; 5 (см. рис.1.27), 7 (см. рис.1.26) – объект обработки; 6 – дополнительный транспортный манипулятор; 7 (см. рис.1.27) – инструмент для подготовки поверхности к обработке; 7, 8 (см. рис.1.27, б) – датчик системы идентификации поверхности; 8 (см. рис.1.26) – магазин рабочих инструментов; 9 (см. рис.1.26) – устройство фиксации дополнительного манипулятора на объекте обработки; 9 (см. рис. 1.26) – позиция складирования деталей и заготовок.

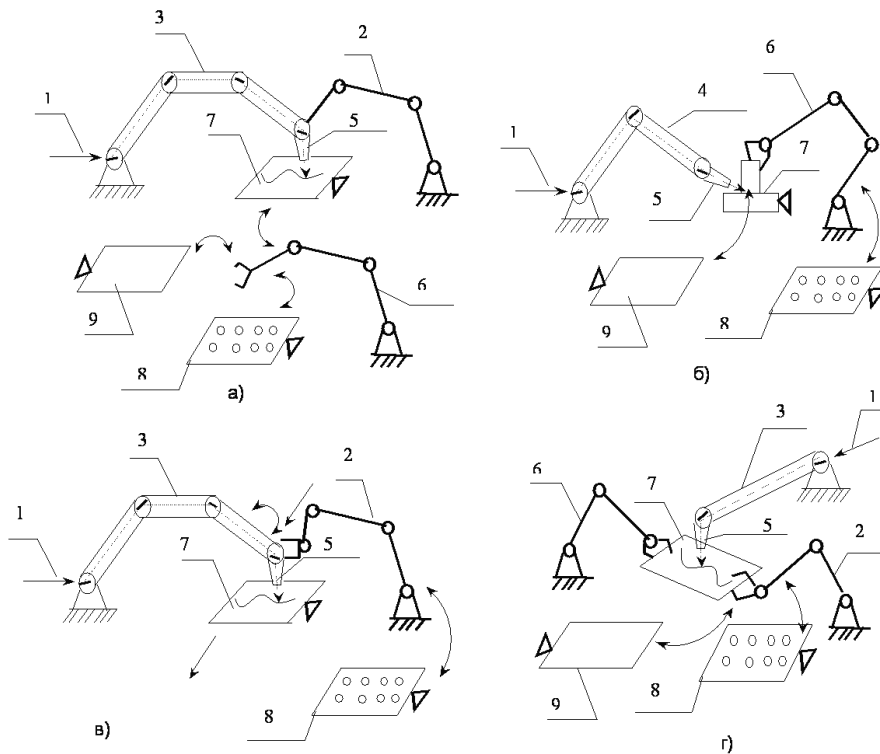


Рис. 1.26. Манипуляционные исполнительные системы многофункциональных лазер-роботов: а, в – МО перемещается ОТМ; б – объект обработки перемещается ДТМ; г – объект обработки перемещается ОТМ

Между манипуляторами МИС существуют взаимосвязи, которые определяются кинематической структурой и условиями выполнения операций. Состояние МИС лазер-роботов можно характеризовать состоянием взаимосвязей между их компонентами, которые представляют собой кинематические и оптические позиционные взаимосвязи и силовые взаимодействия. Процесс управления МИС лазер-роботов по существу – процесс управления указанными взаимосвязями и взаимодействиями.

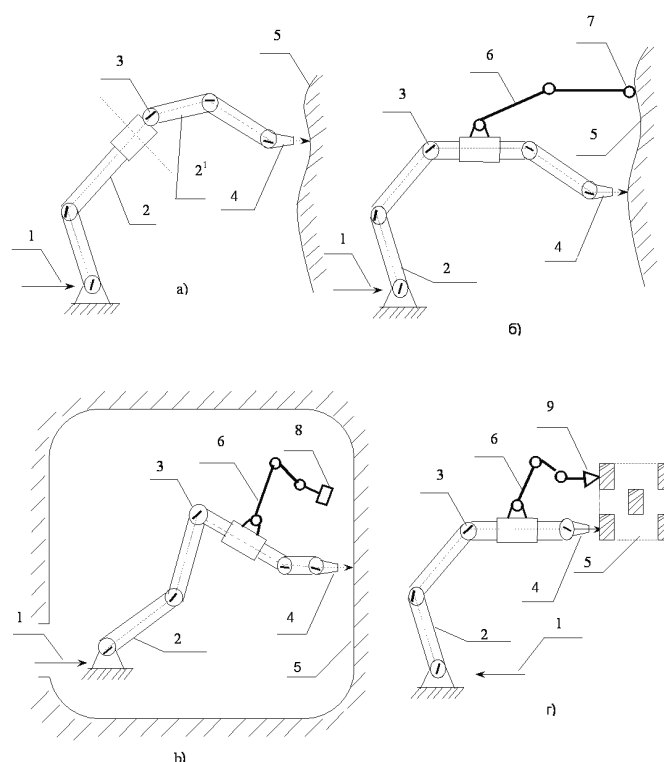


Рис. 1.27. Манипуляционные исполнительные системы лазер-роботов при обработке крупногабаритных объектов: а - с технологическим манипулятором 21; б, в, г – с ДТМ 6

Характерная особенность МИС лазер-роботов – процесс управления положением лазерного луча и точки фокуса в пространстве осуществляется опосредованно в функции состояния манипуляционной системы МО и силовых воздействий на него. Задача управления лазерным лучом не является задачей прямого управления. Другая существенная особенность исполнительных систем МЛР – нестационарность в процессе работы состояния кинематических позиционных взаимосвязей и силовых взаимодействий, обусловленная замыканием или размыканием совокупной кинематической цепи манипуляторов, их взаимодействием с объектом работ, переменностью параметров исполнительных кинематических цепей отдельных манипуляторов.

**Позиционные взаимосвязи и силовые взаимодействия
в манипуляционных исполнительных системах**

МИС лазер-роботов – сложные динамические системы, в которых кинематические и оптические позиционные взаимосвязи и силовые взаимодействия между компонентами имеют явно выраженный нелинейный взаимозависимый двухуровневый характер: на первом уровне – взаимосвязи и взаимодействия между манипуляторами через их кинематические цепи и отдельных манипуляторов с ОО; второй уровень – уровень взаимосвязей и взаимодействий внутри автономных манипуляторов.

Во время движения ОГ силовое и позиционное взаимодействие существуют вместе и являются, по сути, взаимосвязанным позиционно-силовым взаимодействием.

Обобщенная структурная схема взаимосвязей и взаимодействий первого уровня в МИС лазер-роботов представлена на рис. 1.28 [23, 37,77].

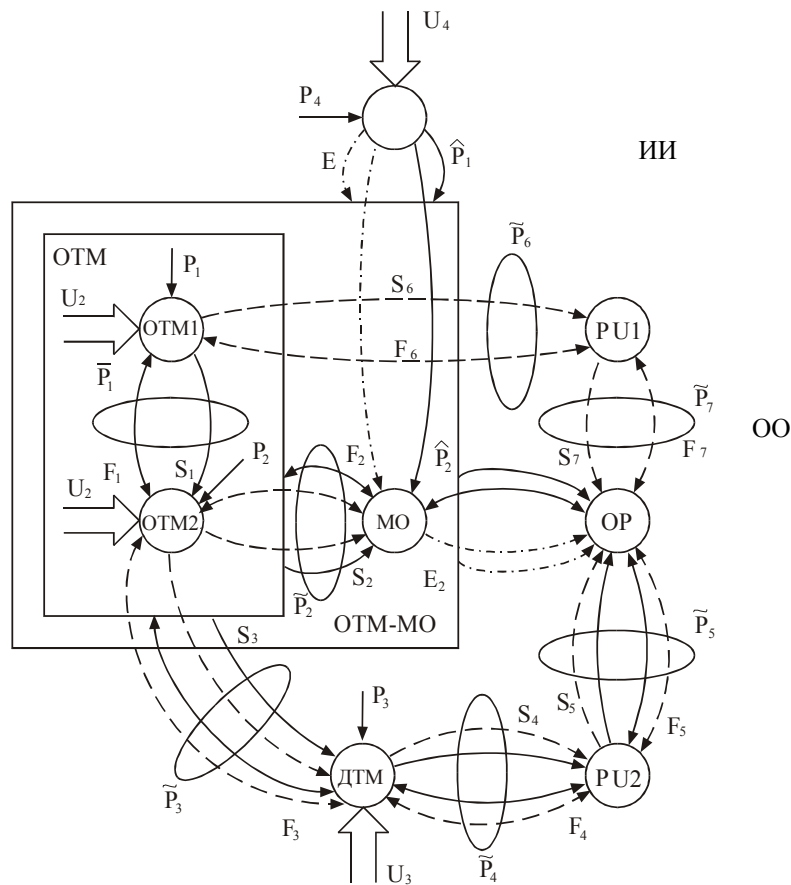


Рис. 1.28. Обобщенная схема позиционных взаимодействий и силовых взаимосвязей в манипуляционных исполнительных системах многофункциональных лазер-роботов

На рис. 1.28 $S_i \longrightarrow$ (---- \blacktriangleright) – стационарная (нестационарная) направленная позиционная кинематическая взаимосвязь; ξ_i – направленная позиционная оптическая взаимосвязь, характеризующая пространственное положение лазерного луча и точки фокуса; $F_i \longleftrightarrow$, \leftarrow ---- \blacktriangleright (---- \blacktriangleright) – стационарное (нестационарное) направленное силовое взаимодействие; $\Rightarrow U_i$ – управляющее воздействие; P_i – мощность, потребляемая от источника питания; \tilde{P}_i – мощность, передаваемая во время движения в результате позиционно-силового воздействия; P_i – мощность лазерного излучения.

Позиционные кинематические S и оптические ξ взаимосвязи, а также силовые взаимодействия F первого уровня между компонентами МИС можно формально представить в виде кососимметрической матрицы M :

$$M = \begin{vmatrix} B1 & SF\xi & SF & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ SF\xi & B2 & SF & 0 & SF & SF & S\xi & 0 \\ SF & SF & B3 & 0 & 0 & 0 & 0 & SF \\ 0 & 0 & 0 & B4 & SF & 0 & S\xi & 0 \\ 0 & SF & 0 & SF & B5 & 0 & SF\xi & SF \\ 0 & SF & 0 & 0 & 0 & B6 & SF\xi & SF \\ 0 & S\xi & 0 & S\xi & SF\xi & SF\xi & B7 & 0 \\ 0 & 0 & SF & 0 & SF & SF & 0 & B8 \\ OO & ПИ1 & ПИ2 & ОТМ1 & ОТМ2 & ОТМ & МО & ДТМ \end{vmatrix}$$

Здесь дополнительно обозначено: 0 – отсутствие непосредственной взаимосвязи или взаимодействия между компонентами; B_i – внутренние взаимосвязи компонентов (взаимосвязи второго уровня).

В каждом конкретном случае построения схема взаимосвязей будет различной, но очевидно, что они имеют взаимозависимый позиционно-силовой характер.

Точность позиционирования конечной точки звеньев МИС лазер-робота для обработки крупногабаритных объектов обеспечивается компенсацией статического прогиба звеньев системой тросовых растяжек. Регулирование натяжения тросовых растяжек осуществляется вручную или автоматически, с помощью специальных электромеханических или мехатронных систем с силмоментным очувствлением.

С точки зрения уменьшения грузоподъемности ТМ и повышения точности перемещения ОГ целесообразно применять разгрузку маломощными моментными приводами. Увеличения кинематической точности и жесткости системы «ТМ – МО» можно добиться использованием механизмов с параллельной структурой.

В частности, при лазерной обработке плоских объектов применяется ТМ с ИУ в виде пятизвенного механизма (рис. 1.29, а) с вращательными парами А, В, С, L, К и отклоняющими зеркалами ОЗ. Исполнительные двигатели M_1 , M_2 расположены в сочленениях А и К, оптическая головка – в точке С.

При обработке крупногабаритных объектов МСПС АВСЛК играет роль основного ТМ – ОТМ. В этом случае первая степень подвижности технологического манипулятора (ТЕМ) располагается в точке С. Для обеспечения пространственного перемещения рассмотренный пятизвенный механизм устанавливается на платформу П, осуществляющую его перемещение или вращение в горизонтальной плоскости (рис. 1.29, б).

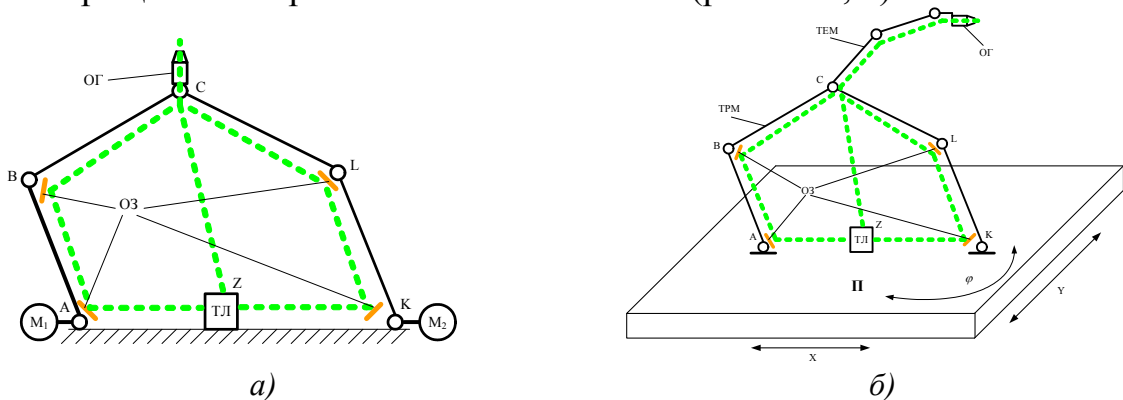


Рис. 1.29. Кинематические структуры лазер-робота на базе замкнутого пятизвенного механизма: а – для обработки плоскостных изделий; б – для обработки крупногабаритных объектов

Лазерное излучение передается вдоль АВС или КЛС (см. рис. 1.29), при постоянной длине оптического тракта. При передаче излучения непосредственно в точку С длина оптического тракта становится переменной.

При частично совмещенных вариантах компоновки ТМ и МО лазерное излучение может передаваться от ТЛ степени подвижности В или L.

В работах [1 – 3, 12 – 14, 56, 59, 68, 75] показано, что в подобных механизмах возможны особые положения (рис.1.30).

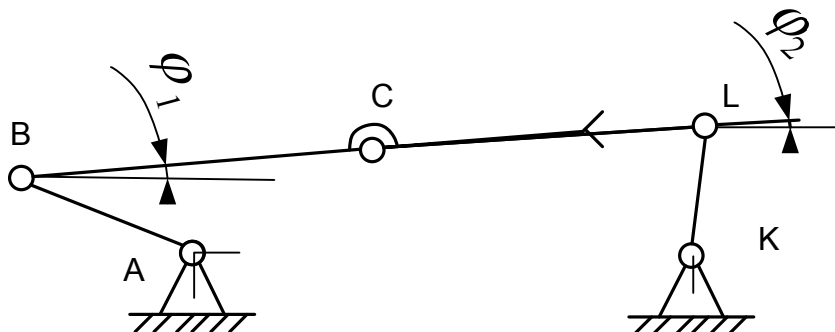


Рис. 1.30. Одно из особых положений исполнительного устройства лазер-робота

Введением дополнительного двигателя в шарнир В (выключив при этом двигатель в шарнире А) удастся вывести исполнительное устройство из особого положения [14, 94, 109, 115]. Эффективность решения задачи вывода МСПС из особого положения можно существенно повысить путем силомоментного очувствления РТК лазерной обработки и применения позиционно-силового управления. Кроме того, это облегчит подготовку поверхности объекта работы к лазерной обработке, непосредственно лазерную обработку объектов с недетерминированной поверхностью, выполнение в случае необходимости сопутствующих основному технологическому процессу механообрабатывающих и монтажно сборочных операций.

Другой вариант манипулятора ОГ – применение трехстепенного МСПС, состоящего из трех одинаковых кинематических цепей, осуществляющих перемещение и ориентацию выходного звена – платформы П по трем угловым координатам q_1 , q_2 и q_3 . (рис. 1.31, а). Оптическая головка установлена либо непосредственно на платформе, либо с использованием дополнительных степеней подвижности ТЕМ (кинематическая цепь ОСД, рис. 1.31, б).

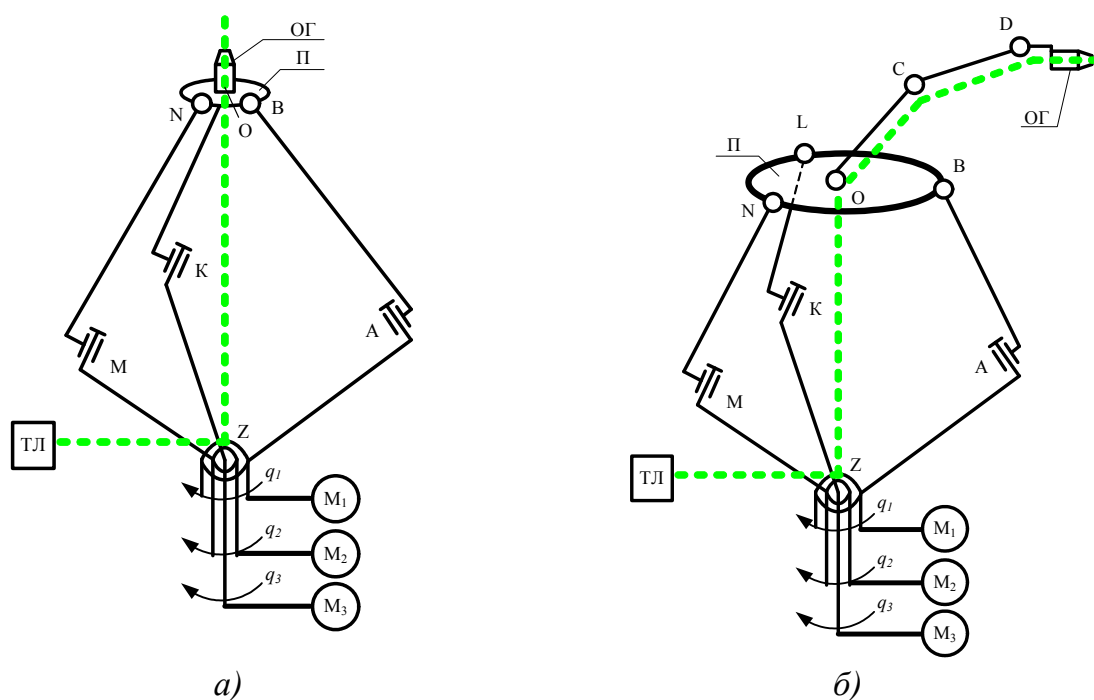


Рис. 1.31. Кинематическая схема лазер-робота на базе трехстепенного механизма параллельной структуры: а – ТМ и МО не совмещены; б – с использованием дополнительных степеней подвижности ОСД

Лазерное излучение передается в ОГ вдоль одной из кинематических цепей или вдоль оси ZO. При передаче излучения по траектории «лазерный излучатель – Z – О» длина оптического тракта в ТМ переменна, а в технологическом – постоянна. При работе ТРМ в режиме перестановок – выведение ТЕМ в зону обработки и фиксация положения звеньев ТМ – длину оптического тракта в процессе лазерной обработки можно считать постоянной.

Выбор третьего варианта замыкания манипуляторов ТМ и МО – полностью несовмещенного (ZС на рис. 1.29, *a*, ZO – на рис. 1.31, *a*) – позволяет полностью устранить проблему перегруженности шарниров манипулятора ОГ совмещением исполнительных механизмов степеней подвижности, отклоняющих и передающих зеркал, системы их охлаждения и подачи газов в зону обработки. Кинематическая цепь в этом случае приобретает избыточность, а контакт с обрабатываемой поверхностью через контактный датчик ОГ (щуп, ролик) приводит к ее замыканию.

Данный вариант кинематической структуры имеет следующие преимущества: более высокий КПД благодаря малому числу перегибов (отражений) луча; расположение приводов на основании обеспечивает более высокую точность позиционирования и разгрузку от сил тяжести, сил инерции приводов и реактивных моментов. Однако в этом случае возникает проблема согласования рабочего пространства манипулятора ОГ и МО с возможностью ортогональной ориентации оси ОГ к обрабатываемой поверхности.

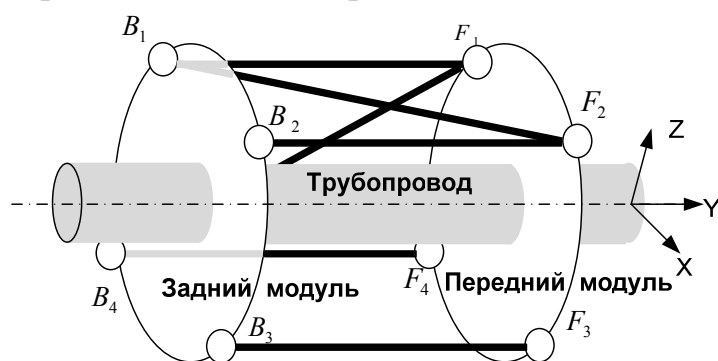
Расчетные схемы и математические модели кинематических структур манипуляционных систем на базе замкнутого пятизвенного механизма и трехстепенного механизма параллельной структуры приведены в работах В.Л. Афонина и В.В. Бушуева.

Особые условия к синтезу исполнительных кинематических цепей манипулятора оптики предъявляет специфика транспортировки лазерного излучения: необходимость обеспечения ортогональности расположения оси сфокусированного отрезка луча к поверхности обработки с соблюдением необходимого зазора между ОГ и этой поверхностью, малые девиации и потери энергии в оптическом тракте. Кроме этого, манипуляторы с параллельной структурой должны соответствовать условиям их согласованной работы: соотношению рабочих зон, отсутствию соударения звеньев и сингулярностей как в случае кинематических цепей автономных манипуляторов, так и в случае образования стационарных или нестационарных замкнутых кинематических цепей.

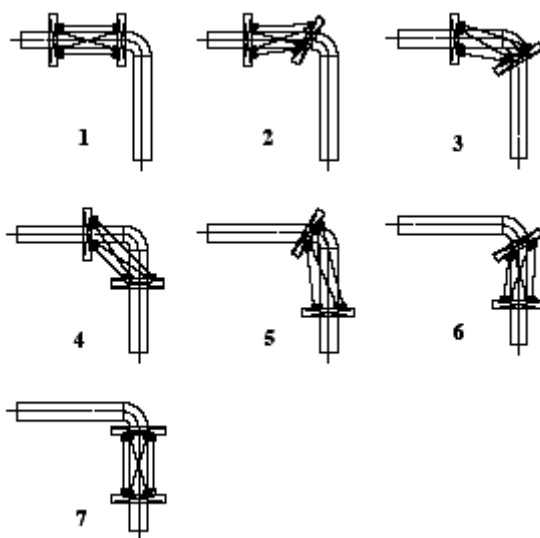
§ 1.5. Системы перемещения технологических мобильных роботов в трубопроводах с переменным поперечным сечением²

Как уже отмечалось, одно из направлений развития современной робототехники и мехатроники, рассматриваемое в монографии, – создание систем управления мобильными роботами (МБР) для технической диагностики состояния, неразрушающего контроля и ремонтно-восстановительных работ в трубопроводах газораспределительных сетей.

Для проведения работ на наружной поверхности трубопроводов значительный интерес представляют МБР (рис. 1.32) на основе МСПС [122].



а)



б)

Рис. 1.32. Система передвижения мобильного робота на основе МСПС: а – кинематическая схема; б – последовательность движения робота при прохождении изгиба трубопровода

² Данный параграф написан совместно с аспирантом Кадхим Дхиргаамом А. (республика Ирак).

Схема обследования внутреннего состояния трубопровода с помощью инспекционного колесного мобильного робота показана на рис. 1.33.

Такие работы, помимо внутритрубной диагностики, позволяют проводить идентификацию местонахождения поврежденного участка с целью его локализации и последующего ремонта; локальный ремонт поврежденных участков трубопроводов или временный ремонт для нормализации ситуации вплоть до проведения основного ремонта.

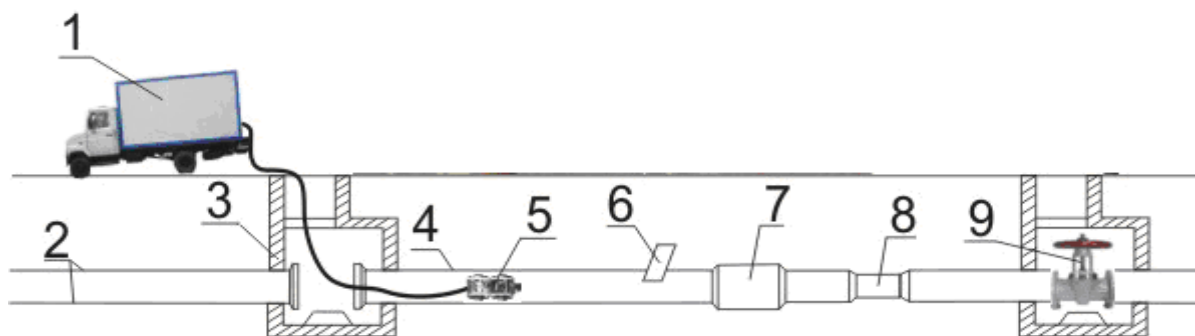


Рис. 1.33. Схема обследования внутреннего состояния трубопровода с помощью мобильного телеробота: 1 – передвижная станция для приема сигналов и управления телероботом; 2 – трубопровод; 3 – колодец; 4 – обследуемый участок трубопровода; 5 – телевизионная камера (телеробот); 6 – врезка в трубопровод; 7 – муфта; 8 – участок трубопровода с уменьшением диаметра; 9 – трубопроводная арматура

Конструкция мобильных технологических роботов значительно отличается от конструкции традиционных промышленных роботов. Подобные роботы представляют собой интеллектуальные многомерные устройства, построенные на мехатронных принципах и технологиях, способные эффективно выполнять программы функциональных движений в изменяющихся условиях трубопроводных систем.

Обобщенная структура МБР состоит из четырех основных частей (рис. 1.34):

- механического устройства (двигателя), конечным звеном которого является рабочий орган – колесный модуль (КМ) или другой вид устройства передвижения;
- блока электроприводов, включающего в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- устройства компьютерного управления, на вход которого поступают команды человека-оператора либо ЭВМ верхнего уровня управления;
- информационного устройства с датчиком проскальзывания, предназначенного для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении МБР и о фактическом состоянии его подсистем.

Подвижные МБР по принципу передвижения внутри трубопроводов разделяются на устройства с «механическим» движителем и с подачей избыточного давления (рис.1.35).



Рис. 1.34. Обобщенная структура мобильных трубопроводных роботов

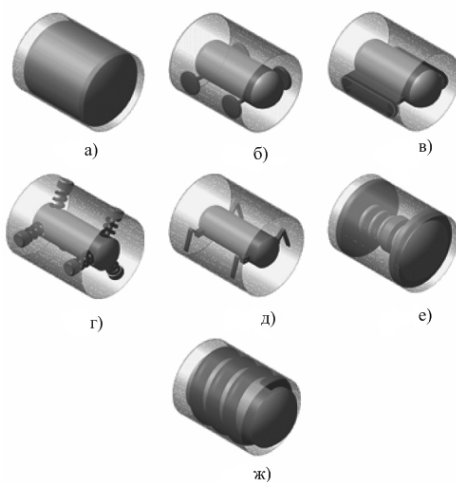


Рис.1.35. Классификация систем передвижения МБР по способу движения в трубопроводах: а – в потоке транспортируемого продукта; б – колесный; в – гусеничный; г – стено-нажимной; д – шагающий; е – ползущий; ж – винтообразный

Тип «*в потоке транспортируемого продукта*» (рис. 1.36, *а*) – один из самых известных коммерческих типов; это пассивный робот, т.к. не имеет приводов движения. Он использует давление, создаваемое жидкостью или газом внутри трубопровода, т.е. рабочее тело (т.е. жидкость или газ) как бы проталкивают его вперед. Обычно такие роботы используются для инспекции больших трубопроводов.

Колесный тип (рис. 1.36, *б*) – самый распространенный тип мобильных роботов автомобильной конструкции.

Гусеничный тип (рис. 1.36, *в*) – аналог колесного робота с использованием в качестве движителя гусениц.

Стено-нажимной тип (рис. 1.36, *г*) – такой тип роботов, который имеет возможность подниматься по вертикальным трубопроводам, что является его большим преимуществом. Роботы такого типа имеют «упругий» механизм, который позволяет им держаться на стенках трубопровода за счет давления, создаваемого этим механизмом, т.е. робот как бы разжимается внутри трубы, обеспечивая надежное сцепление с ее стенками. Другой пример подобного робота – электромагнитный пушпульный робот, разработанный в ИПМ РАН им. А.Ю. Ишлинского под руководством профессора В.Г. Градецкого [16, 81]. Данный внутритрубный миниробот с электромагнитным движителем (приводом) выполнен в виде соленоида с возможным движением штока при закреплении с помощью управляемых упоров корпуса или возможным движением корпуса относительно штока при закреплении посредством управляемых упоров самого штока.

Роботы *шагающего типа* (рис. 1.35, *д*) – конструкции с разным числом конечностей (от многоногих шагающих аппаратов, напоминающих сороконожку, до роботов с 8, 6, 5, 4, 3 и 2 конечностями).

Роботы *ползущего типа* (рис. 1.35, *е*) перемещаются, осуществляя периодические изменения формы корпуса.

Винтообразный тип (рис. 1.35, *ж*) – перемещение этого робота напоминает движение завинчивающегося винта, робот как бы вкручивается (ввинчивается) в трубопровод.

Широкое применение в мобильных роботах различного назначения нашли схемы самоходных систем передвижения типа «шасси (СШ) с изменяемой геометрией (ИГ)». Это связано с тем, что применение СШ с ИГ позволяет существенно повысить функциональные возможности мобильных роботов с традиционными типами движителей – колесными и гусеничными.

Анализ систем передвижения колесных роботов для трубопроводных систем

Колесные мобильные роботы специального применения активно разрабатываются в ОКБ Специальной Робототехники МГТУ им. Н.Э. Бау-

мана, МГУ им. М.В. Ломоносова, КЭМЗ, НПО «Тарис» и зарубежных организациях [102, 103, 110, 112, 121, 126]. Среди отечественных разработок мобильных колесных роботов для инспекции и ремонта трубопроводов наиболее популярны роботы автомобильной конструкции Р100, Р200 и С-200, выпускаемые НПО «Тарис» (Москва) [55, 63, 82]. В МГТУ «Станкин» на кафедре робототехники и мехатроники под руководством профессора Ю.В. Подураева разработан прототип мобильного робота автомобильной конструкции ИРИС-1 для проведения работ в трубопроводных сетях.

Активное поведение колесных роботов в сложном взаимодействии с внутренней поверхностью трубопровода достигается при использовании новых и более сложных кинематических схем, а также развитых систем измерения, осязательства и управления.

С точки зрения реализации управления перемещением МБР в условиях переменности поперечного сечения трубопровода [45], вызванной дефектами геометрии поперечного сечения труб (вмятины, гофры, овальности, сплющивания, складки металла, сужения), целесообразно применение бесконтактных или контактных мехатронных датчиков (рис. 1.36), «ощупывающих» поверхность трубопровода.

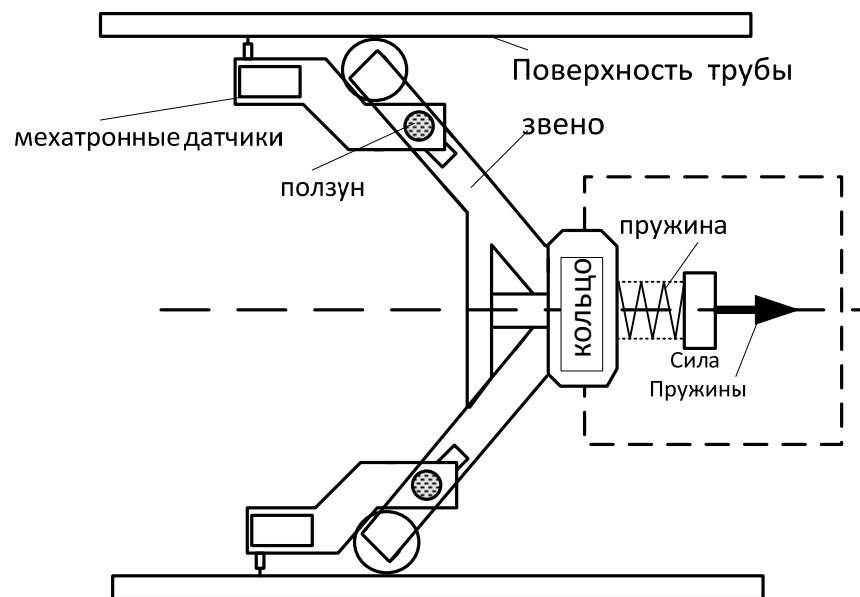


Рис. 1.36. Мехатронный датчик дефектов геометрии трубопровода

Чувствительность датчика дефекта определена геометрией рычага. Три датчика дефекта были установлены на трех отдельных звеньях, расположенных под углом 120° .

Мобильные роботы, перемещающиеся внутри трубопроводов, подразделяются на два типа: с шарнирной полноприводной системой передвиже-

ния и с дифференциальным управлением. Роботы с активным шарнирным суставом, физически подобным змее или кольчатому червю, – одни из самых адекватных механизмов, несмотря на то, что имеют усложненный рулевой механизм. Такие роботы могут двигаться в тройниках и различных разветвителях. Альтернатива роботу шарнирного типа – робот с трехконтактной лучеобразной кинематикой, в которой три отдельных ведущих движителя с дифференциальным управлением их скоростью расположены под углом 120° .

Для исключения проскальзывания ведущих движителей и обеспечения прохождения участков трубопровода с переменным поперечным сечением необходимо за счет увеличения силы давления колеса на трубу и числа секций движителей с трехопорной лучеобразной кинематикой обеспечить высокий коэффициент трения между этими движителями и внутренней поверхностью трубопровода.

С целью создания требуемой величины нормальной силы реакции поверхности в точке контакта с движителем применяют механизмы пассивной или активной адаптации поджатия движителей.

Один из самых типичных примеров этих типов роботов – робот FERRET-1, который передвигается в трубопроводах на трех колесах и имеет складной механизм, позволяющий ему подстраивать свою высоту в соответствии с изменениями диаметра трубы. Другой мобильный робот – MOGRER с трехконтактными ведущими колесами – был разработан таким образом, что мог приспособиться к изменениям диаметра трубы, используя рычажно-пружинную конструкцию. Последние разработки – роботы Explorer CMU, NREC и NASA – имеют сочлененное строение, т.е. составлены из индивидуальных модулей. Конструкция робота Explorer такова, что он способен регулировать силу, с которой давят его колеса на стенки трубопровода. Explorer также может использоваться в трубопроводах диаметром от 6 до 8 дюймов. У робота KANTARO, разработанного для автономной навигации в трубах коллектора, есть новый пассивно-активныйдвигающийся механизм с четырьмя горизонтальными колесами, связанными друг с другом с помощью пружин.

На рис. 1.37 представлен многофункциональный внутритрубный робот [109, 121] с фоточувствительным устройством и дифференциальным приводом для инспекции подземных городских газопроводов с номинальным четырехдюймовым внутренним диаметром.

Три ведущих КМ расположены на складных опорах, которые крепятся к основному каркасу и расположены под углом в 120° друг к другу. Видеосистема CCD установлена в передней части каркаса. Радиус робота мо-

жет меняться в пределах от 85 до 109 мм. Длина робота постоянна (150 мм). Робот может развить 9,8 Н тяговой силы и максимальную скорость 0,15 м/с при собственном весе 0,7 кг.

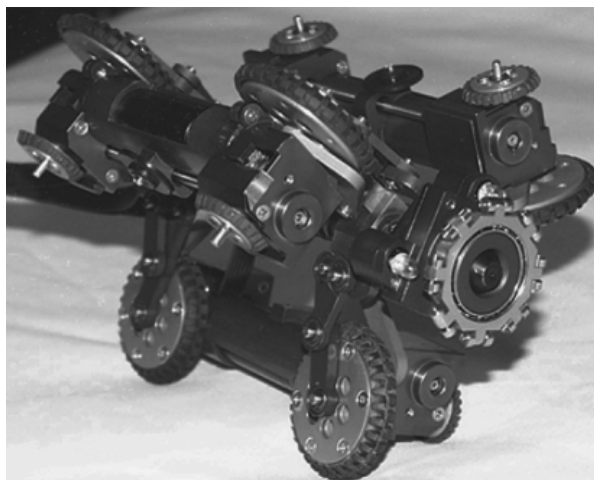
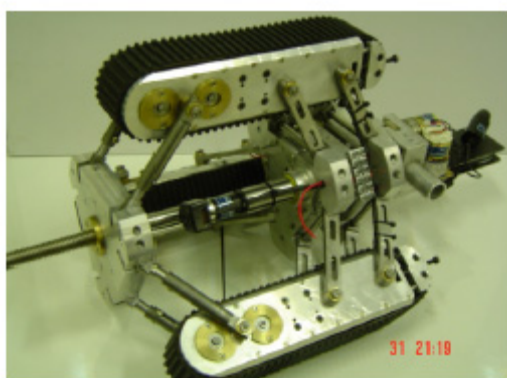


Рис. 1.37. Общий вид робота с тремя отдельными ведущими колесными модулями

Подобный механизм имеется у многозвенного робота Crawler (рис. 1.38) для инспекции трубопровода по перекачке сырой нефти. Робот Crawler с гусеничным движителем работает в диапазоне изменения внутреннего диаметра трубопровода от 250 до 350 мм. Может преодолевать небольшие препятствия на внутренней поверхности трубопровода и проходить через различные виды отводов и разветвителей в системе трубопровода с помощью специального механизма поджатия движителей (МПД) к его внутренней поверхности.



а)



б)

Рис. 1.38. Общий вид гусеничной системы передвижения МБР Crawler с пассивным механизмом поджатия движителя к внутренней поверхности трубопровода: а – раскрытое положение; б – исходное положение

В качестве примера механизмов пассивной адаптации поджатия колесных модулей (МАПКМ) МБР заслуживают внимания механизмы разработанные в Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca (рис.1.39).

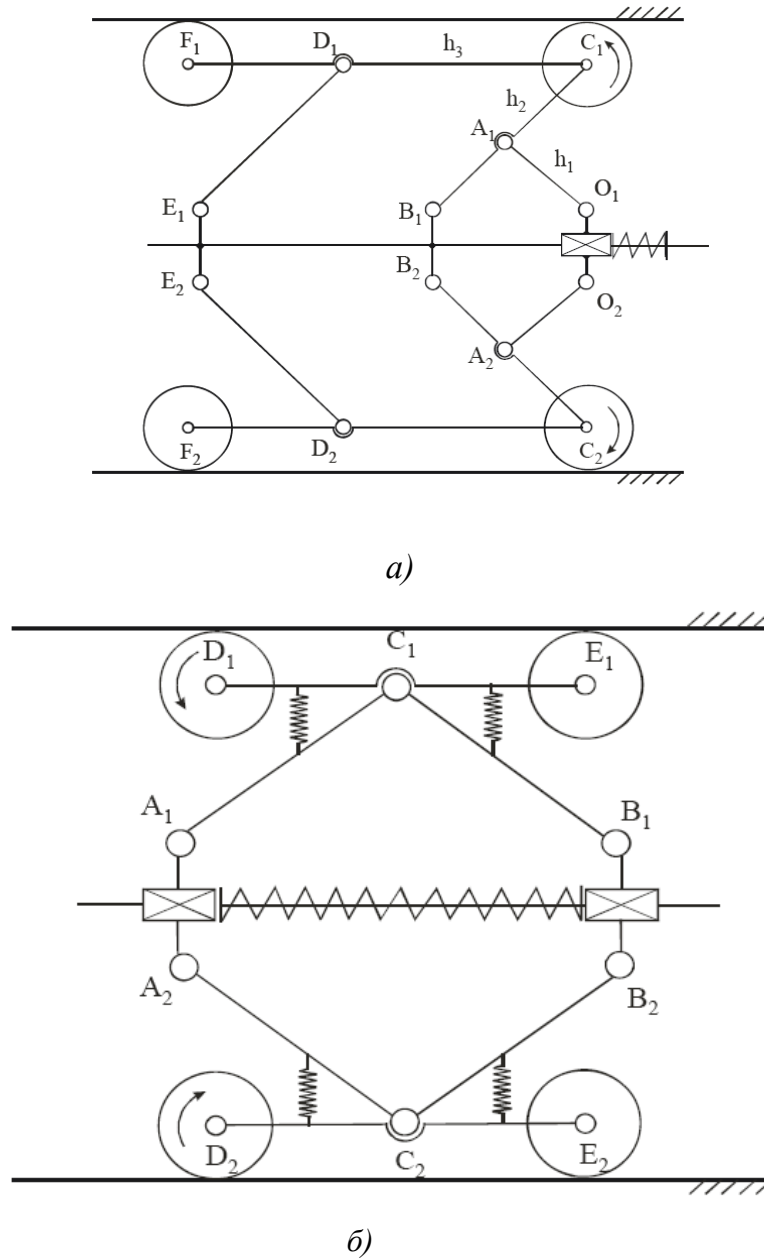


Рис. 1.39. Кинематические схемы МАПКМ: а) – одноредукторный механизм; б) – двухредукторный механизм

Передвижение МБР с МАПКМ, показанных на рис. 1.40, а и 1.40, б возможно только на прямолинейных участках трубопроводов. Увеличение количества секций КМ до трех (рис.1.41) и применения МАПКМ позволя-

нирами D и M; L_2 – длина звена MN; α – угол между звеном CD и осью X; β – угол между звеном MN и осью X; F – осевая сила, обеспечивающая изменение радиального размера робота перемещением параллелограмма ABCD.

Адаптация к изменению поперечного сечения трубопровода осуществляется за счет управляемого углового или линейного перемещения КМ с помощью электромеханических исполнительных механизмов. Изменяя длину базы крепления (рис.1.40, б) механизмов, можно перестраивать диапазон перемещений КМ при изменении диапазона диаметров трубопровода.

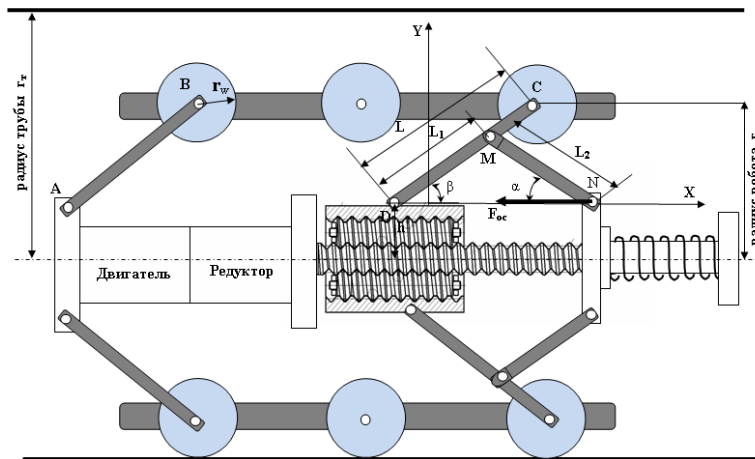


Рис. 1.41. Расчетная схема МБР с механизмом комбинированной адаптации поджатия КМ

Если нормальная сила (рис. 1.41, а)

$$N = \frac{F_T}{3\mu}, \quad (1.3)$$

то силы в каждой опоре, величина радиуса трубопровода и настроечные параметры МАПКМ определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{N \cos \alpha_2 + (\mu N - M_1 g) \sin \alpha_2}{4 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ F_2 = \frac{N \cos \alpha_1 - (\mu N - M_1 g) \sin \alpha_1}{2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases}, \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} r_T = Hf + Lf \sin \alpha_1 + \frac{Ht}{2} \\ r_T = Hr + Lr \sin \alpha_2 + \frac{Ht}{2} \end{cases}, \quad (1.5)$$

$$L = Lr \cos \alpha_2 + Lf \cos \alpha_1 + D, \quad (1.6)$$

где M_1 – масса робота, g – ускорение свободного падения.

С точки зрения плавности работы МАПКМ с мехатронным модулем линейного перемещения в контактных ситуациях взаимодействия колес с препятствиями и поверхностью трубопровода более целесообразно применение механизма поджатия КМ с комбинированной адаптацией. Принцип комбинированной адаптации заключается в одновременном применении пассивной и активной адаптаций (см. рис. 1.41), реализуемых, соответственно, с помощью упругих звеньев и линейного электропривода.

В последнем случае (см. рис. 1.41) адаптация к изменению диаметра трубопровода обеспечивается применением активного МАПКМ на базе мехатронного модуля линейного перемещения, состоящего из корпуса, ролликовинтовой передачи (РВП), бесконтактного двигателя постоянного тока фирмы Maxon [63] и перемещающейся части.

Глава 2. ОСНОВЫ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ И МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

§ 2.1. Общие вопросы управления робототехническими и мехатронными устройствами с силомоментным оцувствлением

В зависимости от типа РТС и сложности выполняемого технологического процесса в иерархической структуре системы управления выделяют четыре уровня управления: высший (четвертый) – уровень искусственного интеллекта, на котором происходит распознавание обстановки, решение задачи принятия решения, накопление опыта работы и самообучение; стратегический (третий) – уровень организации адаптивного управления с помощью ЭВМ, которая расчленяет поставленное задание на элементарные операции (подвести схват к детали, сориентировать схват относительно детали, захватить ее и т.п.); тактический (второй) – уровень, где элементарные операции распределяются на движения отдельных степеней подвижности (СП); исполнительный (первый) – уровень, на котором осуществляются заданные движения отдельных СП. Если на первом и втором уровнях происходит управление состоянием РТС в виде управления движением РО, то на третьем – управление сменой состояний РТС.

Кроме иерархичности структуры системы управления, один из основополагающих принципов управления манипуляционными работами (МР) – комбинированный характер управления, в основе которого лежит сочетание, комбинация нескольких способов управления. Так, например, с точки зрения участия человека в управлении, возможно как ручное, дистанционное или автоматическое управление, так и их сочетание – интерактивное (автоматизированное, дистанционно-автоматическое (ДАУ)) управление [18, 67]. Наилучшее качество управления на тактическом и исполнительном уровнях достигается применением комбинированных систем, сочетающих в себе принципы программного управления и управления в функции текущего состояния внешней среды.

Необходимость комбинированного управления определяется также тем, что в рабочем пространстве технологических МР условно могут быть выделены транспортные и операционные зоны. Задача управления роботами и манипуляторами в транспортной зоне заключается в формировании

управляющих воздействий $g(t)$ для приводов ИУ, обработка которых обеспечивает перемещение и ориентацию РО вдоль заданной траектории с требуемой точностью. Формирование $g(t)$ в автоматических системах сводится к построению программной (номинальной) траектории перемещения с помощью устройства программного управления, а в человеко-машинных системах – человеком-оператором с помощью задающего устройства (ЗУ), выполняющих функции программатора. В качестве алгоритмов формирования $g(t)$ применяются геометрические и кинематические алгоритмы управления. Основу построения геометрических алгоритмов – позиционных алгоритмов управления по вектору перемещения – и кинематических алгоритмов – алгоритмов управления по вектору скорости – составляют результаты решения обратных задач кинематики о положениях и скоростях. Применение алгоритмов, реализуемых в виде управления скоростью и ускорением, приводит к снижению быстродействия роботов и неполной компенсации взаимовлияния степеней подвижности ИУ, поэтому наибольшее применение нашли динамические алгоритмы управления [39], определяемые, например, исходя из концепции обратных задач динамики [11, 50].

В случае нестационарности массоинерционных параметров ИУ и необходимости компенсации различного вида нелинейных динамических сил применяют как неадаптивные, так и адаптивные алгоритмы управления. К числу неадаптивных алгоритмов управления относят алгоритмы оптимального управления для заданной номинальной траектории $X_0(t)$ и линейной модели ИУ; управления, основанного на решении обратной задачи динамики или так называемого вычисления управляющих моментов; независимого линейного и нелинейного управления каждой СП как независимой подсистемой (декомпозиция управления), в том числе на основе применения силовых обратных связей; разрывного управления с организацией скользящих режимов, в том числе на основе обратных задач динамики, позволяющих исключить нелинейные силы взаимодействия между СП; децентрализованного управления независимыми подсистемами, каждая из которых стабилизируется локальными регуляторами; децентрализованного управления локальными подсистемами с дополнительным глобальным управлением.

В общем случае синтез локальных регуляторов может осуществляться известными методами, основанными на применении не только линейных, но и нелинейных или псевдолинейных корректирующих устройств, адаптивного и модального, робастного и разрывного управлений, а также структурного синтеза на основе решения обратных задач динамики и применения принципа координирующего и согласованного управления, рассматриваемого в работах профессоров Л.М. Бойчука и И.В. Мирошника [6, 54].

М. Вукобратович предложил для компенсации динамического взаимовлияния СП, исключить которые локальные регуляторы не могут, применять дополнительное глобальное управление [10], основанное на применении дополнительной силовой обратной связи (рис. 2.1).

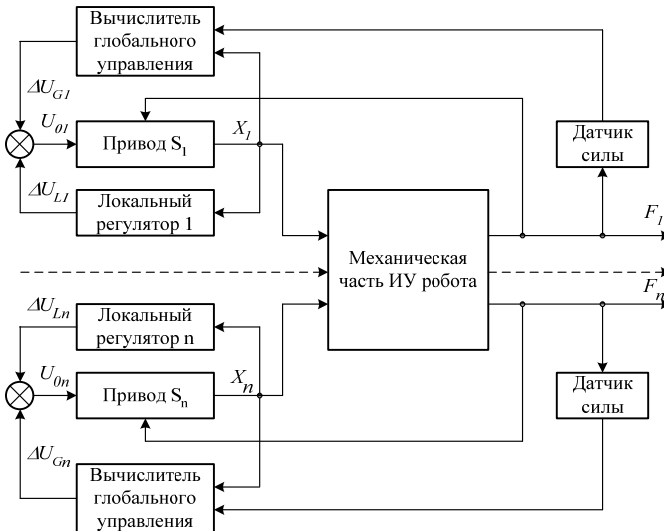


Рис. 2.1. Функциональная схема системы глобального управления с силовой обратной связью

Вследствие измерения сил [9, 67, 76] непосредственно в СП мы получаем информацию о фактическом взаимовлиянии, что позволяет данное глобальное управление считать робастным к изменению параметров механической части ИУ робота.

При разделении управления относительно координат РО можно организовать позиционное управление со сходимостью по силе (рис. 2.2) [10].

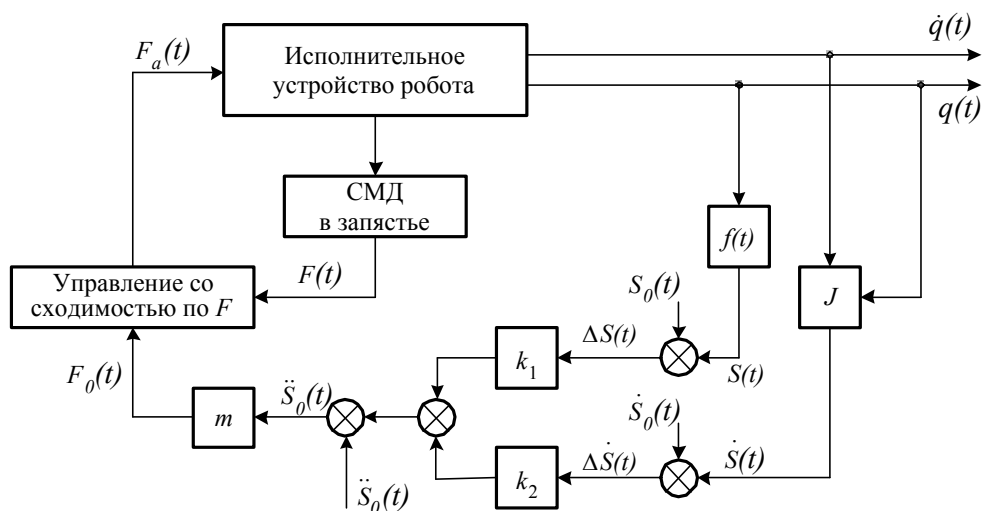


Рис. 2.2. Система согласованного ПСУ со сходимостью по вектору силы

Система содержит два контура управления. Внешний контур обеспечивает позиционное управление перемещением РО и вычисление программного закона изменения сил, которые должны быть приложены к РО для отслеживания заданной траектории $S_0(t)$. Внутренний контур управления со сходимостью по силе осуществляет определение управляющих моментов в каждой СП, которые обеспечивают реализацию сил $F_0(t)$.

В работе [46] описана возможность построения систем с адаптацией управляющего воздействия посредством применения четвертой формы инвариантности [77] на примере замкнутого привода с передаточными функциями по управляющему $g(p)$ и возмущающему $f(p)$ воздействиям соответственно $W(p)$ и $V(p)$.

Силомоментное очувствление МР [4, 9, 10, 15, 18, 51, 62, 65, 77] позволяет решить ряд других интересных задач управления в свободной зоне.

Особый интерес представляет применение СМО и соответствующих силовых обратных связей при управлении перемещением в автоматическом режиме тяжелых крупногабаритных объектов на значительные расстояния с точностью позиционирования, существенно превышающей возможности лучших из традиционных погрузочных механизмов. В этом случае используется тросовая система, которая крепится к объекту через силомоментный датчик (СМД), примененный в работах по созданию комплекса неразрушающего контроля тепловыделяющих сборок и лазерробота. Осуществляют два вида управления: позиционное управление с коррекцией в функции распределения сил в тросах и управление ускорением движения с учетом действия внешних сил.

Управление перемещением ОР двумя МР осуществляется на основе измерения силомоментного взаимодействия схвата одного из роботов с объектом и организации взаимосвязанного двухканального параллельного управления ИУ роботов или последовательного управления по принципу подчиненного управления ИУ одного робота ИУ другого робота, которое является ведущим [23, 36].

При действии связей движение РО становится несвободным, вынужденным, и задача управления МР заключается в импедансном управлении [99, 105] или управлении по вектору силы (силовое управление) [10, 39, 51, 77, 79, 80, 117], являющимися альтернативой чисто позиционному управлению.

Один из наиболее интересных примеров применения подобного управления – управление МСПС, число степеней подвижности которых мгновенно изменяется в сингулярных конфигурациях. Это вызывает потерю в жесткости структуры, и механизм не может поддерживать силу или

движение в некоторых [1, 4, 15, 107, 109, 111, 112, 115] направлениях (рис. 2.3).

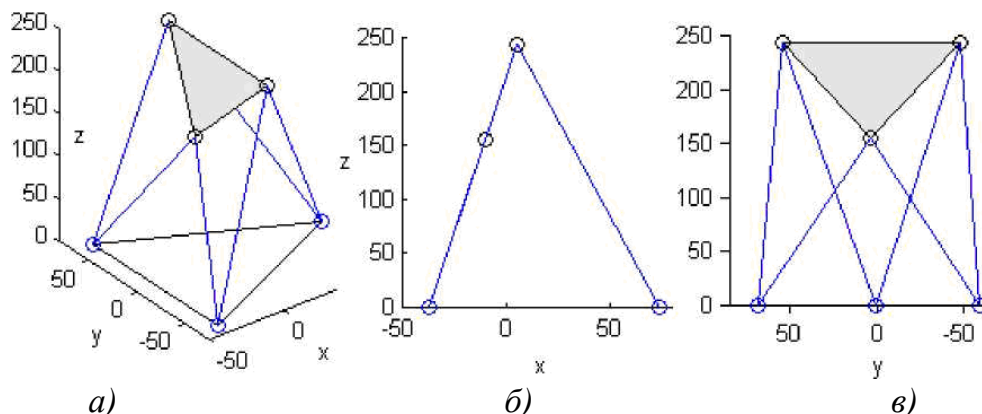


Рис. 2.3. Сингулярная конфигурация К. Ханта [97, 113, 114]: а – исходная кинематика; б – штанги выстраиваются в одну линию; в - штанги пересекаются в пространстве

В 1986 Е. Фитчер [97] нашел другую сингулярную конфигурацию, которая происходит, когда подвижная платформа, оставаясь параллельно неподвижной базе, поворачивается на 90° относительно оси Z (рис. 2.4).

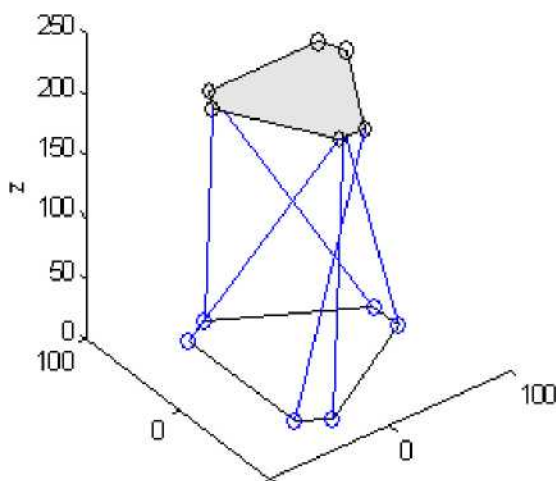


Рис. 2.4. Сингулярная конфигурация Е. Фитчера (поворот на 90° вокруг оси Z)

В 1988 Е. Мерлет [114] использовал геометрию Грассмана, чтобы найти возможные сингулярные конфигурации. Он нашел другие возможные сингулярные конфигурации в дополнение к заявленным К. Хантом и Е. Фитчером. Все эти подходы используют геометрическую информацию, однако, трудно объединить все решения этим методом. В частности, в работах [95, 97, 113, 114, 123] найдены новые подходы изучения сингулярных конфигураций. Особого внимания заслуживают работы D. Kim и

W. Chung [109], O. Ma, J. Angeles [111], в которых предлагается использовать на платформе Стюарта дополнительные датчики, чтобы находить сингулярные конфигурации. Принципы управления и динамика МСПС с силомоментным оцувствлением активно изучаются в ВлГУ [18, 19-24, 29-30, 94-95].

Неидеальность связей (наличие сил и моментов сил трения в кинематических парах) приводит к тому, что вблизи особых положений может произойти заклинивание механизма. Таким образом, работоспособность его будет теряться не в самом особом положении, а в некоторой окрестности.

Двусторонность манипуляционных действий РО с ОР в случае их механического контакта приводит к целесообразности применения принципа двухканального управления, рассматриваемого в работах А.А. Казамарова, М.В. Меерова, Ю.Я. Морговского, Б.В. Новоселова, И.В. Рубашкина, О.О. Соболева, Б.К. Чемоданова на примере двухканальности приводов. Особенность двухканального управления МР – применение в системах управления двух каналов: канала управления перемещением и канала отражения сил. Последний может реализовываться в виде электрической или электромеханической силовой обратной связи, замыкаемой на уровне исполнительной системы, устройства управления или (и) непосредственно оператора в режиме полуавтоматического или копирующего управления. Электромеханическая силовая обратная связь может реализовываться как на электродвигательных устройствах, так и различных тормозных муфтах или самотормозящих механизмах.

С точки зрения направления передачи перемещения двухканальные системы дистанционного управления манипуляторами являются необратимыми или в случае необходимости – двухрежимными [18, 23, 67].

Необходимость выполнения технологических операций в неполнозаданной, или недетерминированной, среде при внешних возмущающих воздействиях случайного характера приводит к рассмотрению концепции интеллектуального управления роботами [28, 42, 43, 44, 60, 69, 72, 83 - 85, 100, 105-106, 116, 124-125, 127, 129]. Степень участия человека-оператора в эргатической системе «человек –робот» не только определяется сложностью выполняемой операции, но и существенно зависит от структуры самой системы и принципа дистанционного управления. Так, при командном, копирующем и полуавтоматическом видах управления человек постоянно обеспечивает формирование движений исполнительного устройства. Супервизорное и диалоговое управления позволяют в значительной степени освободить человека от выполнения простейших, повторяющихся движений и работать в режиме координирования действий робота. Весьма эффективны при выполнении разнообразных операций с помощью роботов системы комбинированного дистанционно-автоматического управления [18, 22-24, 40, 65, 77, 79-80, 98]. В подобных робототехнических системах оператор подключается к управлению лишь в моменты выполнения наиболее сложных действий робота.

Все это свидетельствует о возможности широкого привлечения методов дистанционного управления мехатронными системами с параллельной структурой в режиме обучения и при возникновении сингулярных конфигураций [18, 29, 30, 78, 92, 113, 115]. При прямом обучении используют специальное устройство, подсоединенное к РО робота, или оператор прикладывает силу непосредственно к последнему звену МСПС. В случае экстремальных условий эксплуатации или условий, исключающих нахождение оператора в рабочей зоне робота, а также при использовании самотормозящих элементов применение данного способа обучения невозможно. Для этого применяют не прямое обучение, используя специальное устройство дистанционного управления в виде пульта, реализующего принцип командного управления, задающей рукоятки с ЭВМ, реализующей принцип полуавтоматического управления, и ЗУ, реализующего принцип одностороннего копирующего управления. Необходимо заметить, что в этом случае, в отличие от прямого способа обучения, фиксируют только конечные отрезки каждого интервала пути, а промежуточные точки рассчитывают в результате применения интерполяционных процедур.

Данные способы обучения технологических роботов при действии внешних связей и неопределенности взаимодействия с внешней средой практически не применимы, так как в этом случае необходимо одновременно задавать роботу требуемые силы, моменты и траекторию. Решить эту задачу с помощью высокоуровневых языков программирования с использованием логических операторов и подпрограмм, обеспечивающих взаимодействие с сенсорными системами, в том числе СМО робота, возможно только частично. Это связано с трудностью описания даже на естественном языке – как нужно реагировать на сенсорную информацию в процессе выполнения операций типа сборки, механообработки и т.п.

Наиболее эффективный путь программирования технологических роботов с параллельной кинематикой, особенно при экстремальных условиях эксплуатации, – прямое или не прямое обучение с одновременным заданием $\bar{F}_0, \bar{S}_0, \dot{\bar{S}}_0$, реализуемое в классе полуавтоматического или копирующего дистанционного и/или дистанционно-автоматического управления [18, 22, 24, 67, 77, 120].

§ 2.2. Системы позиционно-силового управления робототехническими и мехатронными устройствами

Особенность управления технологическими роботами и манипуляторами при действии внешних связей – разрывность законов управления. Действительно, принципиальный характер разрывности управления робо-

тами определяется разрывным характером замыкания обратных связей, разрывными свойствами системы взаимодействия РО с ОР, ограничениями на переменные состояния, разрывом закона управления при переходе, например, от пропорционального регулятора положения, используемого при выводе РО в точку позиционирования, к интегральному регулятору при контакте с ОР, изменением задания (в свободной зоне управление позиционное, а при механическом взаимодействии РО с ОР – силовое) и т.д.

Вышесказанное позволяет отнести системы ПСУ к гибридным системам, в которых разрывной закон управления можно представить как набор альтернативных управлений для непрерывных подзадач. Переход от одной подзадачи к другой определяется легко распознаваемыми событиями в пространстве состояний системы «РО-ОР».

С точки зрения взаимодействия алгоритмов управления по S и/или \dot{S} и по F позиционно-силовое управление представляется в виде независимого (раздельного), согласованного (совместного) и комбинированного (связанного) управления. При независимом ПСУ многомерным исполнительным устройством одни степени подвижности (СП) управляются по S и/или \dot{S} , а другие – по F ; при независимом ПСУ одностепенным ИУ интервалы времени управления по S и/или \dot{S} и F не совпадают, т.е. в каждый момент времени управляемая координата только одна; при согласованном ПСУ осуществляется зависимое несвязанное регулирование по S и/или \dot{S} и F различными СП. Комбинированное (связанное) ПСУ понимается как сочетание согласованного и независимого управлений.

Разработка систем управления многостепенными манипуляторами, способными обеспечить не только быстрое и точное перемещение рабочего инструмента по сложным пространственным траекториям вдоль различных поверхностей, но и требуемое силовое воздействие на эти обрабатываемые поверхности, – важная и актуальная задача робототехники. В настоящее время существует несколько методов создания силовых воздействий РО на ОР [4, 10, 15, 40, 51, 62, 76, 77, 80, 107, 129]. Во многих случаях при синтезе систем управления манипуляторами, работающими в условиях сило-моментного взаимодействия с внешней средой, используют различные методы адаптации, основанные на организации податливого движения РО. При выполнении некоторых силовых операций применяют метод конструктивного разделения управления [62 – 64, 77], когда отдельные степени подвижности ИУ управляются по положению, а остальные – по усилию. Однако при сравнительной простоте полученных здесь решений остается открытым вопрос одновременного управления и по силе, и по положению.

Организация ПСУ в виде сочетания управления пространственным перемещением РО по заданной траектории с силовым воздействием на ОР

возможна и на основе параметрического подхода [22, 24, 38, 64]. В этом случае в запястье схвата ИУ размещают многокомпонентный силомоментный датчик, используют тактическую силовую обратную связь и позиционную обратную связь во всех исполнительных приводах. Исследования показали, что при относительно быстром перемещении РО по сложным пространственным траекториям этот подход не позволяет получить качественного управления как по положению, так и по силовому воздействию на ОР. Кроме того, наличие дополнительного оборудования и специальных устройств часто приводит к значительному увеличению веса манипулятора (особенно его последнего звена), а также к существенному снижению жесткости механизма.

Для организации комбинированного позиционно-силового управления ИУ в работах [98, 101, 104, 108, 119] предложен метод, основанный на использовании моделей нормального и тангенциального контактов РО с ОР. Главный недостаток этого подхода заключается в том, что во многих случаях не удастся составить адекватную модель взаимодействия РО с поверхностью ОР и сформировать качественный сигнал управления. В работах [91, 118] также решается задача позиционно-силового управления манипулятором, но предлагаемые здесь алгоритмы и системы управления являются достаточно сложными и требуют наличия дорогостоящих высокочастотных контроллеров. Метод синтеза комбинированных позиционно-силовых систем управления многозвенными манипуляторами, на основе которого синтезируются самонастраивающиеся системы управления, обеспечивающие не только быстрое отслеживание рабочим инструментом произвольных пространственных траекторий вдоль сложных поверхностей с высокой динамической точностью, но и одновременное создание на эти поверхности (объекты работ) требуемого силового воздействия, предлагается в работах [40, 79].

В зависимости от задачи, решаемой роботами и РТС с автоматическим, дистанционным и дистанционно-автоматическим управлением, применяется робастное, нейро-нечеткое и адаптивное ПСУ, в том числе на основе теории управления H_∞ [19, 52-53]. С точки зрения реализации системы ПСУ подразделяют (рис. 2.5.) на системы одно-(ОСД) и двустороннего (СДСД) действия с автоматическим, дистанционным и дистанционно-автоматическим управлением. К системам ОСД относят системы командного, копирующего и полуавтоматического управления без отражения сил. В качестве задающего устройства (ЗУ) используют, соответственно, специальные выносные пульты, антропоморфные ЗУ, кинематически подобные ИУ и рукоятки управления, оснащенные устройствами формирования сигналов задания: F_0, S_0, \dot{S}_0 ; S_0 или \dot{S}_0 ; F_0 или/и (S_0, \dot{S}_0) и т.д. Обратные связи в системе организуются по положению (S_{oc}), скорости (\dot{S}_{oc}) и силе (F_{oc}).

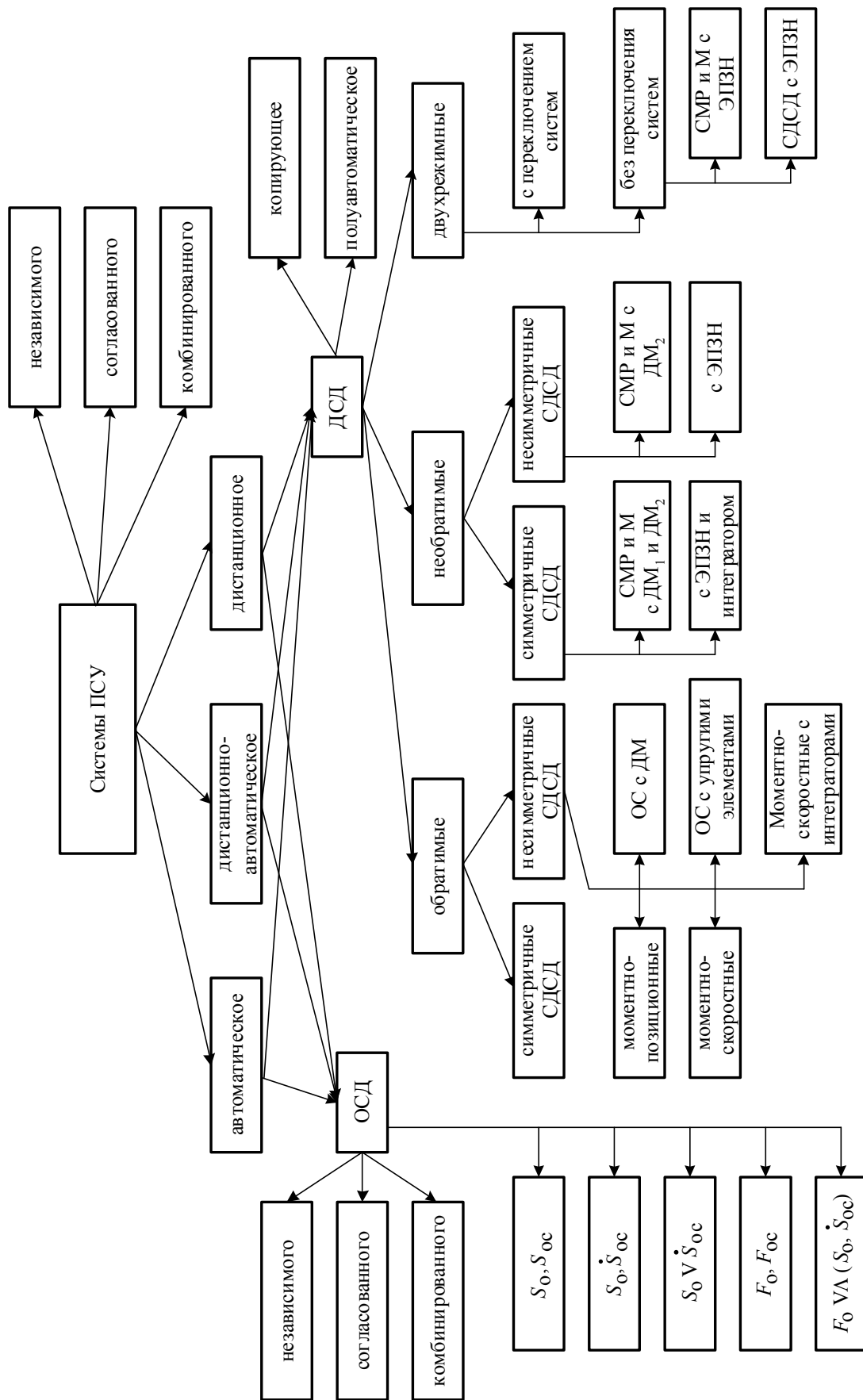


Рис. 2.5. Классификация систем ПСУ исполнительными системами робототехнических устройств

К СДСД относят двухканальные системы с различными видами отражения сил оператору, который осуществляет копирующее, полуавтоматическое или дистанционно-автоматическое управление МР [18, 24, 67]. Все разновидности СДСД подразделяют на симметричные и несимметричные системы. В основе симметричных СДСД лежат электроприводы (ЭП) с позиционной главной обратной связью, расположенные как на ЗУ, так и на ИУ. С точки зрения структуры системы и управляемых координат несимметричные СДСД подразделяют на моментно-позиционные и моментно-скоростные, в том числе с интеграторами. В несимметричных СДСД прямого включения позиционные ЭП расположены на ИУ, а ЭП с главной обратной связью по моменту – на ЗУ. В системах обратного включения ЭП расположены в обратном порядке. Для получения информации о моментах, действующих в СП задающего и исполнительного устройств используют обратные связи с датчиками моментов (ДМ) и упругими элементами с соответствующим включением датчиков положения. Необратимые СДСД симметричного и несимметричного типов обеспечивают передачу перемещения только в одном направлении – от ЗУ к ИУ. Симметричные необратимые СДСД подразделяют на системы с элементами с переменной зоной нечувствительности (ЭПЗН) и интеграторами, а также системы моментной разгрузки и масштабирования (СМР и М) с датчиками моментов ДМ₁ и ДМ₂. Несимметричные необратимые СДСД применяют в виде систем с ЭПЗН и СМР и М с датчиками моментов ДМ₂ на ИУ. Двухрежимные СДСД представляют собой комбинацию обратимых и необратимых систем. Переход от одной системы к другой осуществляется применением логических законов управления переключением структуры двухрежимной системы или изменения зоны нечувствительности ЭПЗН.

Ограничения на переменные состояния РТС, изменение структуры сингулярных возмущений в виде геометрических связей, сочетание в одной технологической операции вспомогательных переходов со «свободным» объектом и технологических переходов со связанным объектом нарушает непрерывность процесса позиционно-силового управления, делая его принципиально разрывным управлением, реализуемым в классе систем с переменной структурой. Изменение структуры осуществляется априорно программным путем или неявными, детерминированными способами в зависимости от режима работы системы или на основе информации о взаимодействии РО с внешней средой.

Необходимое, но в ряде случаев недостаточное условие реализации ПСУ – организация силовых обратных и перекрестных связей, в том числе нового вида этих связей, формируемых в соответствии с теорией бинарного управления, предложенной академиками РАН С.В. Емельяновым и С.К. Коровиным.

Системы независимого ПСУ

Независимое ПСУ реализуется в классе разрывного логического управления одностепенными или многостепенными ИУ роботов и манипуляторов. Подобные системы относят к автоматическим системам прямого разрывного управления с использованием режима устойчивых переключений, реализуемого аппаратными или программными средствами. Так как разрывная функция управления U при этом относится к разрывным функциям с переменной амплитудой, то данные системы являются системами с переменной структурой и двойным регулированием нелинейности.

Логическое управление в данном случае строится как комбинация программного управления, формируемого устройством логического программного управления (ЛПУ) при автоматическом режиме работы робота или человеком-оператором при дистанционном режиме управления, и управления на основе информации о внешней среде. В качестве последней может использоваться, например, информация в виде напряжения $U_{\text{ДК}}$, получаемого с датчика контакта (ДК), между РО и ОР. Независимое ПСУ одностепенными ИУ или многостепенными ИУ технологических роботов с конструктивным разделением СП на СП_{*i*} – управляемые по F – и СП_{*j*} – управляемые по S и/или \dot{S} – в общем случае, осуществляется согласно алгоритму, впервые предложенному в работе [21]:

$$\begin{aligned}
 U = & (\varepsilon_{F_0} J^T(q) W_{PF} \forall U_{\text{ДК}} \neq 0 \wedge \text{СП}_i) \vee \\
 & \vee (\varepsilon_{S_0} J^{-1}(q) W_{PS} \wedge \vee \varepsilon_{\dot{S}_0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \\
 & \forall U_{\text{ДК}} = 0 \wedge \text{СП}_j,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $\varepsilon_{F_0} = (F_0 - F)$, $\varepsilon_{S_0} = (S_0 - S)$, $\varepsilon_{\dot{S}_0} = (\dot{S}_0 - \dot{S})$ – отклонение от заданных значений; $W_{PF}, W_{PS}, W_{P\dot{S}}$ – операторы регуляторов силы, положения и скорости; J – матрица Якоби.

Если ИУ робота не имеет конструктивного разделения по СП, то алгоритм формирования вектора управления основан на ортогональной декомпозиции пространства задания:

$$U = \begin{cases} [\varepsilon_{F_0} J^T W_{PF} D + \varepsilon_{S_0} J^{-1} W_{PS} (1 - D) - (\dot{S} J^{-1} W_{P\dot{S}} + J^T F)] \forall g \in (F_0, S_0) \\ \hline [\varepsilon_{F_0} J^T W_{PF} D + \varepsilon_{\dot{S}_0} J^{-1} W_{P\dot{S}} (1 - D) - J^T F] \forall g \in (F_0, \dot{S}_0) \end{cases}; \tag{2.2}$$

где D – селективная диагональная матрица, вырождающаяся в единичную и нулевую матрицы соответственно при силовом и позиционном управлении.

В этом случае декомпозиция пространства состояния робота на два дополняющих друг друга подпространства осуществляется программным путем с помощью матрицы D , а не ЛПУ. В каждом из этих подпространств положение и сила могут управляться произвольным образом независимо

друг от друга в соответствии с заданными траекториями изменения координат F_0 и S и/или \dot{S} . В зависимости от типа взаимодействия с внешней средой интеллектуальный контроллер формирует элементы матрицы D и подстраивает параметры системы с использованием методов адаптивного управления, табулирования и др.

Множество систем независимого ПСУ технологическими роботами и манипуляторами включает в себя системы, обеспечивающие регулирование координат F_0 или S_0 и/или \dot{S}_0 ; контроль и дозирование координат F_0 и/или (S_0 и/или \dot{S}_0); регулирование F_0 и/или S_0 и/или \dot{S}_0 ; со стабилизацией A_0 и/или N_0 , в том числе с вычислением задающих сигналов F_0 , S_0 , \dot{S}_0 ; двухзонное регулирование различных вариантов. Для систем первого типа характерны алгоритмы формирования управляющих воздействий вида (2.1) и (2.2).

При решении задачи контроля сил, перемещений или скоростей перемещения вместо элементов сравнения задающих воздействий и сигналов обратных связей применяются элементы с переменной зоной нечувствительности [21, 24, 77]:

$$\varepsilon_F = \begin{cases} \varepsilon_{F_0} \quad \forall F > F_0 \\ 0 \quad \forall F \leq F_0 \end{cases}; \varepsilon_S \vee \varepsilon_{\dot{S}} = \begin{cases} \varepsilon_{S_0} \vee \varepsilon_{\dot{S}_0} \quad \forall S > S_0 \vee \dot{S} > \dot{S}_0 \\ 0 \quad \forall S \leq S_0 \vee \dot{S} \leq \dot{S}_0 \end{cases};$$

В ряде технологических задач требуется обеспечение управления со стабилизацией мощности или работы процесса силомоментного взаимодействия РО и ОР. Тогда взаимосвязанное управление $g \in (g_1, g_2)$ предлагается по принципу «независимое воздействие g_1 , зависимое воздействие g_2 »:

$$g = \begin{cases} g_1 = S_0 \vee \wedge \dot{S}_0, g_2 = F_0 : (A_0 S_0^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{S}_0^{-1}); \\ g_2 = F_0, g_1 = S_0 \vee \wedge \dot{S}_0 : (S_0 = A_0 F_0^{-1}, \dot{S}_0 = N_0 F_0^{-1}). \end{cases} \quad (2.3)$$

Если входные сигналы F_0 , S_0 , \dot{S}_0 не заданы, то они могут определяться, исходя из требования обеспечения необходимого закона изменения A_0 и/или N_0 согласно алгоритму (2.3) при условии, что $F_0 = F$, $S_0 = S$ и $\dot{S}_0 = \dot{S}$.

Особый интерес при независимом ПСУ представляет двухзонное независимое (разрывное) управление применительно к технологическим роботам и манипуляторам:

1) если $\bar{g} \in (N_0, \bar{F}_0)$, то

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} V(N_0 - N) J^{-1}(q) W_{PN}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + (N_0 - N)(1 - D) J^{-1}(q) W_{PN} \equiv D = 0 \vee 1; \end{cases} \quad (2.4)$$

2) если $\bar{g} \in (N_0, \bar{\dot{S}}_0)$, то

$$\bar{U} = \begin{cases} (N_0 - N) J^T(q) W_{PN} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}_0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}}; \\ (N_0 - N) D J^T(q) W_{PN} + \bar{\varepsilon}_{\dot{S}_0} (1 - D) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \equiv D = 0 \vee 1; \end{cases}$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}_0} J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{F}_0 = N_0 \dot{S}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{\dot{S}_0} (1-D) J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{F}_0 = N_0 \dot{S}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D = 0 \vee 1); \end{cases} \quad (2.5)$$

3) если $\bar{g} \in (A_0, \bar{F}_0)$, то

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} \vee (A_0 - A) J^{-1}(q) W_{PA}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + (A_0 - A) (1-D) J^{-1}(q) W_{PA} \equiv D = 0 \vee 1; \end{cases}$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{S_0} J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{S_0} (1-D) J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D = 0 \vee 1); \end{cases} \quad (2.6)$$

4) если $\bar{g} \in (A_0, \bar{S}_0)$, то

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{S_0} J^{-1}(q) W_{PS} \vee (A_0 - A) J^T(q) W_{PA}; \\ \bar{\varepsilon}_{S_0} D J^{-1}(q) W_{PS} + (A_0 - A) (1-D) J^T(q) W_{PA} \equiv D = 0 \vee 1; \end{cases}$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{S_0} J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{F}_0 = A_0 \bar{S}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{S_0} (1-D) J^{-1}(q) W_{PS} \equiv \bar{F}_0 = A_0 \bar{S}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D = 0 \vee 1). \end{cases} \quad (2.7)$$

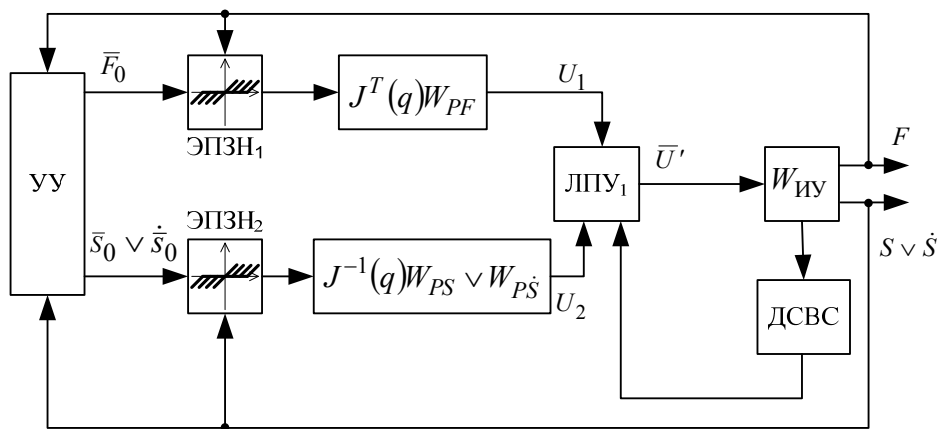
В выражениях (2.4) – (2.7) через W_{PN} и W_{PA} обозначены передаточные функции и операторы регуляторов мощности и работы. Реализация датчиков мощности и работы возможна в виде специальных датчиков, применяемых, в частности, в станкостроении, и посредством перемножения соответствующих сигналов с датчиков \bar{F} , \bar{S} , \dot{S} .

Структурные схемы систем с независимыми двухзонными ПСУ исполнительных приводов роботов представлены на рис. 2.6, б, в. Система управления со структурной схемой, представленной на рис. 2.6, а обеспечивает управление с дозированием сил, перемещения или скорости перемещения за счет применения ЭПЗН₁ и ЭПЗН₂ с соответствующими обратными связями. Обратные связи по силе и перемещению в системе, представленной на рис. 2.6, б, формируются в функции требуемых значений работы A_0 и мощности N_0 с помощью блоков деления и соответствующих уставок. ЛПУ₂ обеспечивает силовую обратную связь в функции A_0 или N_0 . В системе управления (рис. 2.6, в) сигнал задания по скорости формируется в функции требуемых значений N_0 и F . ЛПУ₁ во всех трех системах переключается на основе информации с датчика состояния внешней среды (ДСВС). Устройство управления (УУ) при дистанционном и дистанционно-автоматическом управлении реализуется в виде задающих устройств, применяемых при копирующем или полуавтоматическом управлении.

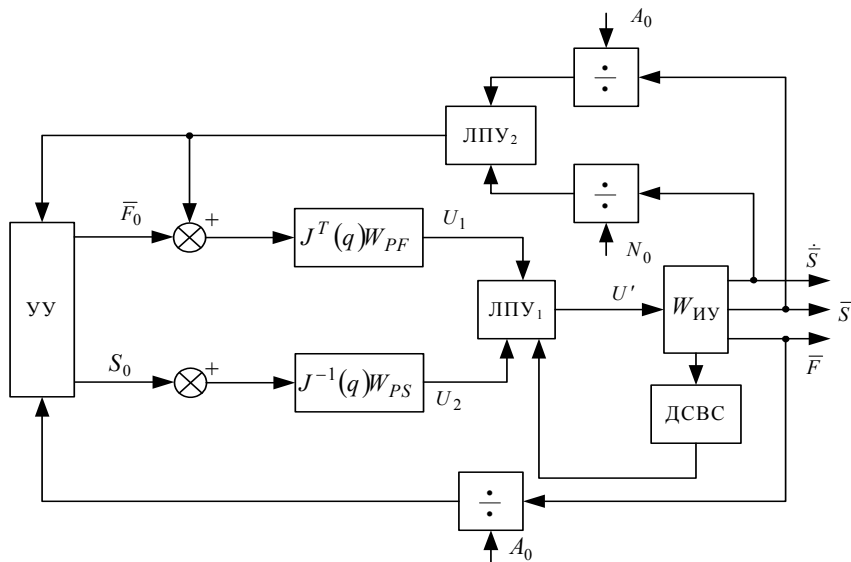
Если сигнал на выходе ЛПУ изменяется по закону

$$U' = \begin{cases} \dot{S}_0 K_1 - K_3 \dot{S} \forall S < S_c \vee S > S_c \wedge \varepsilon_{\dot{S}} F_0 < \varepsilon_F \dot{S}_0; \\ -\dot{S}_0 K_1 - K_3 \dot{S} \forall S > S_c \wedge \varepsilon_{\dot{S}} F_0 > \varepsilon_F \dot{S}_0; \\ F_0 K_2 - K_4 F \forall S > S_c \wedge \dot{S} < 0, \end{cases}$$

где $K_1 \dots K_4$ – постоянные коэффициенты; S_c – координата препятствия (ОР), то двухканальная система независимого ПСУ работает в скользящем режиме. Организация скользящего режима или увеличение частоты переключения каналов управления приводит к вырождению системы с независимым управлением F и S в систему согласованного (совместного, координированного) управления F и S , теряя при этом свойство «естественной» инвариантности систем с переменной структурой.

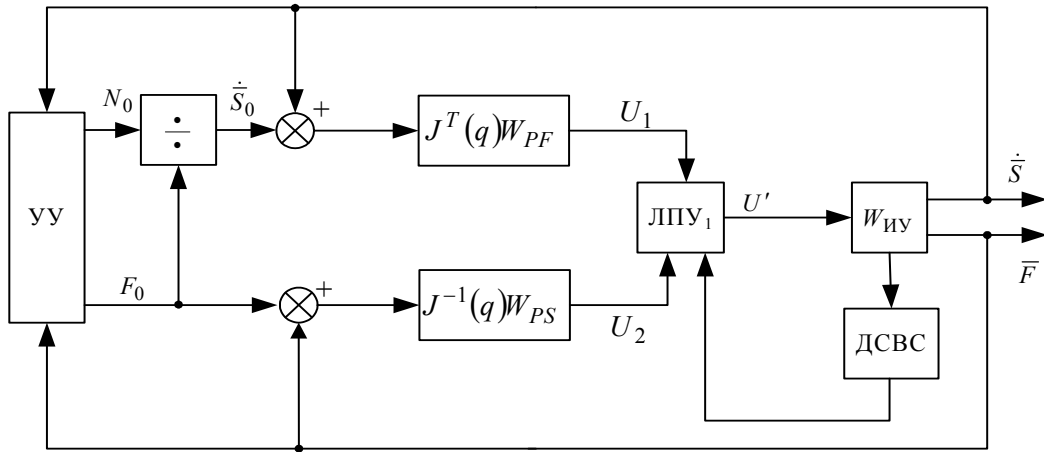


а)



б)

Рис. 2.6. Структурные схемы систем независимого ПСУ исполнительными ЭП роботов: а – система с контролем сил, перемещений и скоростей; б, в – системы двухзонного регулирования



в)
Рис. 2.6. Окончание

Если требуется повысить быстродействие обработки сигнала задания по силе F_0 , согласовать направление действия силы и перемещения ИУ или исключить удар при повторном контакте РО с ОР в режиме позиционного управления, то сигналы на выходе ЛПУ системы независимого ПСУ целесообразно изменять соответственно по следующим логическим законам:

$$U_1' = \begin{cases} \varepsilon_s W_{ps} \forall U_{ПЭ} = 0, \\ \varepsilon_F (1 + \sigma)^{-1} W_{PF} \forall U_{ПЭ} \neq 0 \wedge (F_0 K - \varepsilon_F) < 0, \\ \varepsilon_F W_{PF} \forall U_{ПЭ} \neq 0 \wedge (F_0 K - \varepsilon_F) > 0, \end{cases}$$

$$U_2' = \varepsilon_s W_{ps} \forall U_{ПЭ} = 0 \vee (F_0 \operatorname{sgn} \varepsilon_s - F) W_{PF} \forall U_{ПЭ} < 0,$$

$$U_3' = \begin{cases} \varepsilon_s W_{ps} \forall U_{ПЭ} = 0 \wedge t < t_1, \\ (F_0 (S_{ПЭ} - S) - F) W_{PF} \forall U_{ПЭ} \neq 0 : t_1 < t < t_2, \\ (S_{ПЭ} + \varepsilon_s^*) W_{ps} \forall U_{ПЭ} = 0 \wedge t > t_2, \end{cases}$$

где $\varepsilon_s = (S_0 - S)$, $\varepsilon_s^* = (S_0(1 + \operatorname{Tr}) - 1 - S)$, $\varepsilon_F = (F_0 - F)$ – векторы позиционных и силовых ошибок систем управления; W_{PS} , W_{PF} – передаточные функции регуляторов по положению и силе; U_1' , U_2' , U_3' – сигналы на выходе ЛПУ₁ схем на рис. 2.6, а, б, в; $U_{ПЭ}$ – сигнал с порогового элемента в цепи сигнала датчика внешней среды; $S_{ПЭ}$ – значение S_0 при срабатывании ПЭ; σ – величина перерегулирования; t_2 – момент повторного контакта; $K > 1$.

Системы согласованного ПСУ

Цель согласованного ПСУ – координирующее управление посредством регулирования параметров, определяющих соотношение между траекторными координатами S, \dot{S}, \ddot{S} и силой $F = [FM]^T$. В качестве данных параметров системы рассматривается податливость ($C - 1 = S/F$), демпфиро-

вание ($\epsilon = F/\dot{S}$) и инерция ($m = F/\ddot{S}$). В зарубежных источниках подобное управление называется управлением значением импеданса (податливости). При этом под импедансом линейной системы понимается отношение преобразованных по Лапласу изображений сил $F(s)$ и перемещений $S(s)$, или сил $F(s)$ и скоростей $\dot{S}(s)$. В настоящей работе под импедансом понимается одновременное регулирование податливости и демпфирования. Соблюдение данных соотношений – своего рода управляемые связи, накладываемые на изменение регулируемых координат.

Если при выполнении технологической операции со связанным объектом необходимо соблюдение или идентификация геометрической формы поверхности или траектории, то применяется согласованное ПСУ с позиционным доминированием (адаптацией в канале управления $\bar{S} \wedge \vee \dot{\bar{S}}$), когда

$$\begin{aligned} \bar{U} \in [& (\bar{\epsilon}_{\text{эКВ1}} J^{-1}(q)W_{PS} - \dot{\bar{S}} J^{-1}(q)K_{\dot{S}} - J^T(q)\bar{F}); (\bar{\epsilon}_{\text{эКВ2}} J^{-1}(q)W_{P\dot{S}} - J^T(q)\bar{F}); \\ & (\bar{\epsilon}_1 J^{-1}(q)W_{PS} + \bar{\epsilon}_2 J^{-1}(q)W_{P\dot{S}} - \dot{\bar{S}} J^{-1}(q)K_{\dot{S}} - J^T(q)\bar{F}); \\ & ((\bar{\epsilon}_{S0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) J^{-1}(q)W_{P\dot{S}} - \bar{I} - \bar{I}_K) J^T(q)W_{P1}] \forall \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\forall \bar{\epsilon}_{\text{эКВ1}} = \bar{\epsilon}_1 \vee \bar{\epsilon}_3 : \bar{\epsilon}_1 = (\bar{\epsilon}_{S0} - \bar{\epsilon}_K) \vee \wedge (\bar{\epsilon}_{S0} \times \bar{S}_K); \bar{\epsilon}_3 = \bar{\epsilon}_{S0} : \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}^{-1};$$

$$\bar{\epsilon}_{\text{эКВ2}} = \bar{\epsilon}_2 \vee \bar{\epsilon}_4 : \bar{\epsilon}_1 = (\bar{\epsilon}_{S0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) \vee \wedge (\bar{\epsilon}_{\dot{S}0} \times \dot{\bar{S}}_K), \bar{\epsilon}_4 = \bar{\epsilon}_{\dot{S}0} : \dot{\bar{S}}_K = N_0 \bar{F}^{-1};$$

где

$$\bar{\epsilon}_{S_0} = (\bar{S}_0 - \bar{S}); \bar{\epsilon}_{\dot{S}_0} = (\dot{\bar{S}}_0 - \dot{\bar{S}}); \bar{\epsilon}_{I_0} = (\bar{I}_0 - \bar{I});$$

$$\bar{I}_0 = (\bar{\epsilon}_{S_0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) J^{-1}(q)W_{P\dot{S}}.$$

Эквивалентная ошибка $\epsilon_{\text{эКВ1}}, \epsilon_{\text{эКВ2}}$ и корректирующие сигналы зависят от вида сигнала задания g на исполнительные ЭП, а также вида и места введения корректирующих силовых обратных связей.

Структура системы управления импедансом позиционно-силового взаимодействия может иметь, например, следующий вид (рис. 2.7).

Другой пример решения задачи обеспечения точной работы, создаваемой сило-скоростной манипуляционной системой на повышенных скоростях при наличии различной толщины снимаемых заусенцев по всему контуру обрабатываемой заготовки, – подход, рассмотренный в работе [64, 77, 79].

В общем случае скорость V_t концевой точки робота, оснащенного регулятором скорости, является динамической функцией вектора входной траектории S_t и тангенциальной силы резания F_t :

$$V_t = W_S S_t + W_F F_t,$$

где W_S, W_F – передаточные функции, отображающие S_t и F_t .

Структура системы подчиненного управления состоит из контура регулирования V_t и управляющего контура, который формирует требуемое значение $V_{0\tau}$ для регулятора скорости W_s в тангенциальном направлении (рис. 2.8).

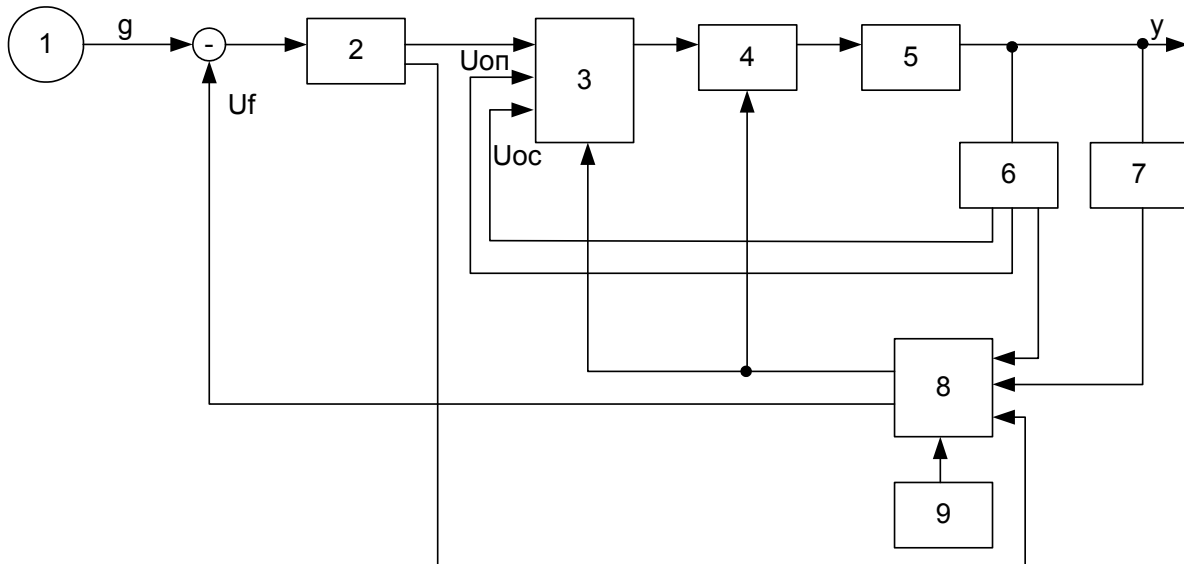


Рис. 2.7. Структура системы позиционно-силового управления технологическим роботом: 1 – координаты обрабатываемой поверхности; 2 – генератор траектории инструмента; 3 – регуляторы положения и скорости; 4 – электроприводы СП; 5 – ИУ робота; 6 – датчики положения и скорости СП; 7 – силовой датчик; 8 – блок силового управления; 9 – блок эталонной уставки сил и моментов; U_f – сигнал коррекции в функции сил взаимодействия; $U_{ос}$, $U_{оп}$ – скоростные и позиционные обратные связи

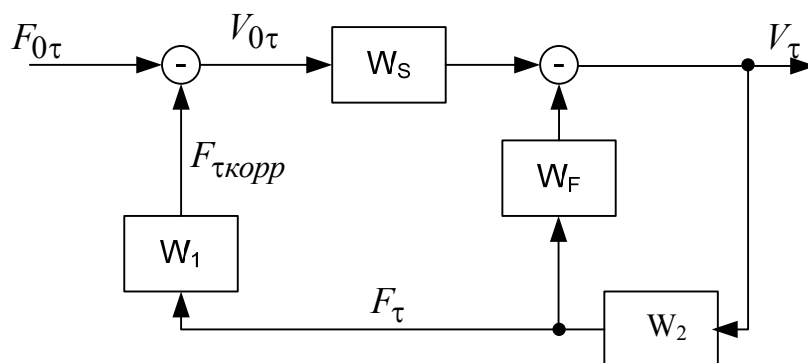


Рис. 2.8. Структура системы управления: W_1 , W_2 – передаточные функции блоков коррекции и преобразования координат (импеданса)

В качестве другого примера рассмотрим ЭП с регулированием подат-

ливости и демпфирования, аналогичные ЭП, рассмотренным в работах R.J. Anderson, N. Hogan, H. Kazerooni.

Если на первом плане стоит технологическая задача регулирования сил взаимодействия РО с ОР с учетом кинематических параметров процесса взаимодействия, то целесообразно применение согласованного ПСУ с силовым доминированием (адаптацией в канале управления \bar{F}), когда

$$\begin{aligned} \bar{U} \in \{(\bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} + \bar{S}_0); [(\bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F_0} + \bar{F}_{K_{\text{ЭКВ}}}) \vee \wedge (\bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F_0} \times \bar{F}_{K_{\text{ЭКВ}}})] J^T(q) W_{PF}\} \forall \\ \forall \bar{F}_{K_{\text{ЭКВ}}} = [(\bar{F}_K(\bar{S}) \vee \wedge \bar{F}_K(\dot{\bar{S}})) \vee (\bar{F}_K(\bar{S}_S) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S)) \vee (\bar{F}_K(\bar{S}, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{S}, N_0)) \vee (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, N_0))]; \\ \cdot \bar{F}_K(\bar{S}) = \bar{S} W_1(\bar{F}, \bar{S}) \vee \bar{S} W_1(\bar{S}); \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}) = \dot{\bar{S}} W_1(\bar{F}, \dot{\bar{S}}) \vee \dot{\bar{S}} W_1(\dot{\bar{S}}); \\ \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) = \bar{\varepsilon}_{S_0} W_2(\bar{F}, \bar{S}) \vee \bar{\varepsilon}_{S_0} W_2(\bar{S}); \\ \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}, N_0) = N_0 \dot{\bar{S}}^{-1} W_1(\bar{F}, \dot{\bar{S}}); \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) = \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S); \\ \bar{S} = A_0 \bar{F}^{-1}; \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, N_0) = \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S); \bar{S} = N_0 \bar{F}^{-1}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ошибка исполнительного ЭП по силе в зависимости от вида сигнала задания определяется следующим образом:

$$1) \forall \bar{g}(t) = \bar{F}_0(t)$$

$$\bar{\varepsilon}_F = \begin{cases} (\bar{\varepsilon}_{F_0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F_0} \times \bar{F}_K): \bar{F}_K = \bar{F}_K(\bar{S}) \vee \wedge \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}) \vee (A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}); \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} \forall \bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F_0}: \bar{F} = 0, \bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}; \end{cases}$$

$$2) \forall \bar{g}(t) = \bar{S}_0(t) \wedge \bar{F}_0(t)$$

$$\bar{\varepsilon}_F = \begin{cases} (\bar{\varepsilon}_{F_0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F_0} \times \bar{F}_K): \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0)); \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} \equiv \bar{\varepsilon}_S = (\bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} - f(q) - \bar{S}_0); \end{cases}$$

$$3) \forall \bar{g}(t) = \dot{\bar{S}}_0(t) \wedge \bar{F}_0(t)$$

$$\bar{\varepsilon}_F = [(\bar{\varepsilon}_{F_0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F_0} \times \bar{F}_K): \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, N_0));$$

$$4) \forall \bar{g}(t) = (\bar{S}_0 \wedge \dot{\bar{S}}_0) \wedge \bar{F}_0$$

$$\bar{\varepsilon}_F = [(\bar{\varepsilon}_{F_0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F_0} \times \bar{F}_K)]: \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0)) + (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, N_0)).$$

Структурные схемы адаптивных двухканальных ЭП робота с регулированием податливости и демпфирования приведены в работе [77, рис. 1.7] и показаны на рис. 2.7.

Необходимо заметить, что в случае задающих сигналов типа $(\bar{S} \wedge \vee \dot{\bar{S}}) \wedge \bar{F}_0$ силовое доминирование существует только при определенных условиях. В общем случае это ЭП с неявным позиционным или силовым доминированием.

Адаптация каналов управления $\bar{S} \wedge \vee \dot{\bar{S}}$ и \bar{F} может осуществляться как

поочередно, так и совместно. Переход от одного канала управления к другому может происходить программным путем и на основе информации о взаимодействии РО с внешней средой.

Если требуется обеспечить управление со стабилизацией $A_0 \vee \wedge N_0$ в канале $(\bar{S} \wedge \dot{\bar{S}})$ или (и) \bar{F} , то вектор управления \bar{U} принадлежит к множеству алгоритмов (2.8) и (2.9) в виде следующей логической вектор-функции:

$$\bar{U} \in \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_1 \vee (\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ1}} = \bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ2}} = \bar{\varepsilon}_2): \bar{S}_K, \dot{\bar{S}}_K, \bar{I}_K \in \bar{\varepsilon}_{F0} W_{PFi} \vee \wedge \varphi_i(\bar{\varepsilon}_{F0}), \\ \text{где } i=1 \vee \bar{S}_K, i=2 \vee \dot{\bar{S}}_K, \\ i=3 \vee \bar{I}_K \wedge \bar{F}: \bar{F} \neq f(A_0, N_0) \vee \wedge (\bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}); \end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\bar{U}_2 \vee [(\bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} + \bar{S}_0) = 0, \bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F0} = \bar{\varepsilon}_{F0},$$

$$\bar{F}_{\text{ЭКВ}} = ((\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}})) \vee (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}, N_0)))] \left. \begin{array}{l} \bar{S} \neq f(A_0) \vee \bar{S} = A_0 \bar{F}^{-1}, \dot{\bar{S}} \neq f(N_0) \vee \dot{\bar{S}} = N_0 \bar{F}^{-1}. \\ \text{Выражения алгоритмов } \bar{U}_1 \text{ и } \bar{U}_2 \text{ в (2.10) соответствуют выражениям (2.9).} \end{array} \right\}$$

В классе согласованного ПСУ с позиционным и силовым доминированием также возможна реализация двухзонного управления. В первой зоне осуществляется силовое или позиционное управление с $F = \text{const}$. Во второй зоне осуществляется силовое или позиционное управление при $(A_0 = \text{const}) \vee \wedge (N_0 = \text{const})$. Переход из одной зоны в другую может быть как зависимым, так и независимым, осуществляющийся, например, на основе информации о состоянии взаимодействия РО с ОР или ТМ с МО.

Алгоритм формирования управляющих сигналов может быть представлен следующим образом:

1) если $\bar{g} = \bar{F}_0$, то

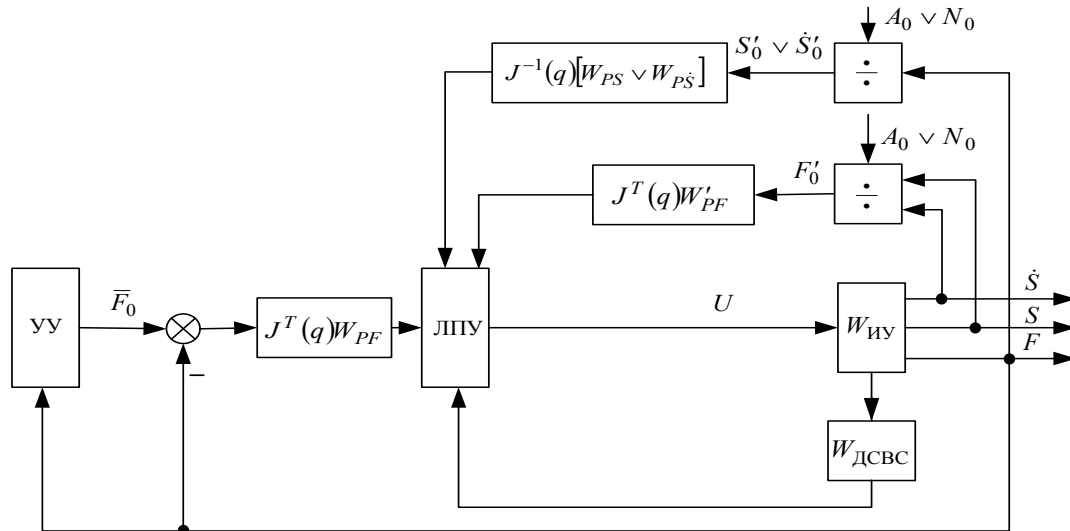
$$\bar{U} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee |\bar{F}| \geq |\bar{F}_{\text{ДОЗ}}|; \\ [(\bar{S}_0 W_{PS} \vee \dot{\bar{S}}_0 W_{P\dot{S}} J^{-1}(q): \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}^{-1}; \dot{\bar{S}}_0 = N_0 \bar{F}^{-1} \vee \\ \vee [\bar{F}'_0 J^T(q) W_{PF}: \bar{F}'_0 = A_0 \bar{S}^{-1} \vee N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}] \vee |\bar{F}| < |\bar{F}_{\text{ДОЗ}}|]; \end{array} \right. \quad (2.11)$$

2) если $\bar{g} = \bar{S}_0 \vee \dot{\bar{S}}_0$, то

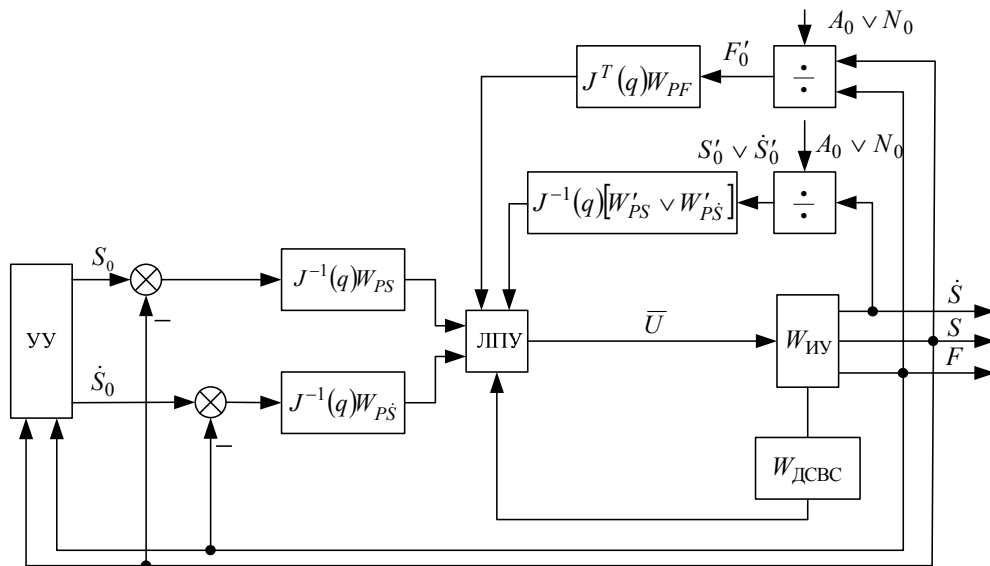
$$\bar{U} = \left\{ \begin{array}{l} [\bar{\varepsilon}_{S0} J^{-1}(q) W_{PS} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}}] \vee |\bar{U}_{\text{ДСВС}}| < |\bar{U}_{\text{ДОЗ}}|; \\ \{[\bar{S}'_0 J^{-1}(q) W'_{PS}: \bar{S}'_0 = A_0 \bar{F}^{-1}] \vee [\dot{\bar{S}}'_0 J^{-1}(q) W'_{P\dot{S}}: \\ \dot{\bar{S}}'_0 = N_0 \bar{F}^{-1}] \vee [\bar{F}'_0 J^T(q) W_{PF}: \bar{F}'_0 = A_0 \bar{S}^{-1} \vee N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}]\} \vee \\ \vee |\bar{U}_{\text{ДСВС}}| > |\bar{U}_{\text{ДОЗ}}|, \end{array} \right. \quad (2.12)$$

где $|\bar{F}_{\text{ДОЗ}}|, |\bar{U}_{\text{ДОЗ}}|$ – дозированная величина модуля силы или сигнала с ДСВС, задаваемая по условиям выполнения технологической операции или состояния динамической системы «РО-ОР».

Структурные схемы систем двухзонного согласованного ПСУ исполнительными приводами робота в соответствии с (2.11) и (2.12) могут быть представлены так, как показано на рис. 2.9.



а)



б)

Рис. 2.9. Структурные схемы систем двухзонного согласованного ПСУ исполнительными ЭП роботов: а – система силового управления с организацией обратных связей в функции A_0 или N_0 ; б – система позиционного управления с организацией обратных связей в функции A_0 или N_0

Первая система (рис. 2.9, а) обеспечивает решение задачи силового управления с организацией обратных связей по перемещению, скорости перемещения или силе в функции A_0 или N_0 . Во второй системе (рис. 2.9, б) решается задача управления перемещением или скоростью перемещения с организацией обратных связей аналогично первой системе.

Область применения независимого и согласованного ПСУ разная. Независимое (раздельное) ПСУ с явным переключением структуры применяют при существенном различии позиционного и силового компонентов взаимодействия РО с ОР. При нечетком различии этих компонентов, что характерно для обработки в зоне малых перемещений, малых припусков и прерывистых контуров, осуществляется двухканальное согласованное ПСУ с неявным переключением структуры. Одна из основных проблем при этом – определение ведущей координаты как в случае автоматического, так и дистанционного управления роботом.

ПСУ применяют не только для осуществления вынужденного движения. В частности, при управлении свободным движением технологического лазер-робота с одно- или двухманипуляционным исполнительным устройством, осуществляющего перемещение и ориентацию оптической головки, ПСУ применяют для декомпозиции системы управления и пространства состояний, компенсации динамического взаимовлияния степеней подвижности посредством глобального управления, юстировки зеркал системы транспортировки излучения и моментной разгрузки исполнительных устройств.

В общем случае, когда позиционно-силовое взаимодействие характеризуется нестационарностью и неполнозаданностью при конечном значении производимой работы, ПСУ носит характер комбинированного управления, представляющего собой сочетание независимого и согласованного управлений. Переход от силового управления к позиционному и обратный переход осуществляются с помощью микропроцессоров, реализующих соответственно логические переключательные функции или диагональные матрицы выбора.

Обобщенная структура системы ПСУ

Обобщенная структурная схема системы ПСУ технологических роботов и манипуляторов представлена на рис. 2.10.

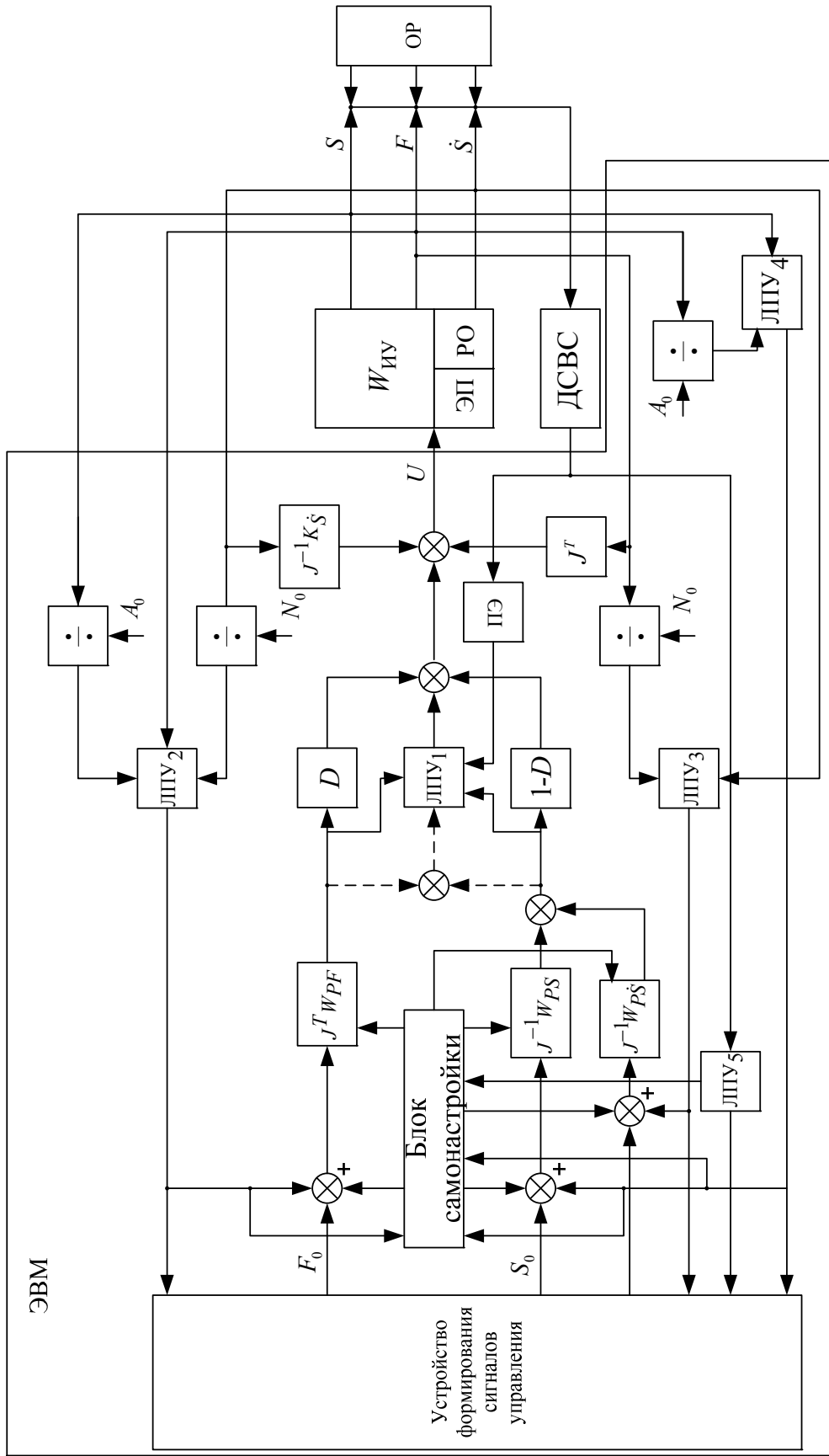


Рис. 2.10. Структурная схема системы ПСУ технологических роботов и манипуляторов: D – селективная диагностическая матрица; ДСВС – датчик состояния внешней среды; ПЭ – пороговый элемент

Управляющие сигналы F_0, S_0, \dot{S}_0 формируются программатором или дистанционно-управляемым ЗУ. Блок самонастройки организует внутри- и межканальные связи. ЛПУ₁, управляемое сигналом с порогового элемента (ПЭ) в цепи ДСВС, обеспечивает независимое или согласованное управление. ЛПУ₂ ... ЛПУ₅ позволяют организовать различные комбинации технологических связей. При программной реализации W_{ps}, W_{ps}, W_{PF} , ЛПУ, блоков производства, деления и согласования координат на основе преобразований с вычислением матрицы Якоби данный привод относится к классу открытых распределенных систем.

Одно- и двухканальные системы согласованного ПСУ с аддитивными или/и мультипликативными силовыми обратными связями, а также системы независимого ПСУ с синхронизирующими логическими переключающими устройствами и перекрестными связями относятся к классу адаптивных систем с сигнальной или/и параметрической самонастройкой. Успешное применение адаптивных систем позиционно-силового управления с переменной структурой требует, кроме обеспечения устойчивости и качества, решения вопросов способа задания и согласования управляющих сигналов по положению и силе, для чего в структуру однотипной системы связного регулирования дополнительно вводят нелинейные функциональные регуляторы соответствующих каналов с логическим управлением перекрестными межканальными связями.

Рассмотренные системы ПСУ состоянием и сменой состояния робота и динамической системы «РО-ОР» представляют собой новую разновидность координирующих систем управления. Отличие разработанных систем от координирующих, рассматриваемых в работах Л.М. Бойчука [6] и И.В. Мирошника [54], заключается в реализации не только автоматического, но и дистанционного или дистанционно-автоматического управления соотношением фазовых координат F, S в функции состояния внешней среды и взаимодействия РО с ней, производимой работы и мощности при нелинейной модели объекта (как на исполнительном, так и тактическом уровнях).

Неопределенность, нечеткость или неполнозаданность характеристик робота и позиционно-силового взаимодействия РО с ОР как объектов управления приводят к необходимости использования современных методов управления, позволяющих решить проблему управления в режиме обучения, в том числе создания базы знаний на основе применения позиционно-силового программирования, заключающегося в одновременном задании требуемых сил и траекторий. Это в конечном итоге приводит к возможности разработки стратегии отслеживания перемещения РО по поверхности ОР в режиме самообучения, основываясь на ее идентификации и идеях адаптивного полуавтоматического ПСУ.

§ 2.3. Координатно-параметрическое управление движением лазер-робота

Качество лазерной обработки определяется геометрией зоны обработки и флуктуациями технологических параметров процесса. Основные возмущения, оказывающие влияние на геометрию зоны лазерной обработки, – отклонение положения перетяжки луча от поверхности объекта обработки (профиля стыка); оси луча от оси стыка при лазерной сварке (допустимая точность – не менее $\pm 0,1$ мм); ориентации луча от нормали к поверхности обработки.

Среди технологических параметров, определяющих качество лазерной обработки, следует назвать мощность и плотность излучения, распределение температурного поля в зоне обработки и другие параметры. Например, нестабильность зазора между кромками по длине стыка при лазерной стыковой сварке как технологического параметра приводит к ухудшению качества сварного шва и повышению вероятности выплеска ванны, что говорит о необходимости измерения величины зазора между деталями в процессе сварки и соответствующих измерений скорости сварки, фокусировки луча и скорости подачи дополнительной присадочной проволоки.

Процесс лазерной обработки с точки зрения управления перемещением ОГ вдоль траектории обработки, фокусировки луча, отклонением оси луча относительно оси стыка свариваемых изделий и нормали к обрабатываемой поверхности можно назвать объектом координатного управления, а с точки зрения управления изменением технологических параметров процесса лазерной обработки – объектом параметрического управления.

В целом управление технологическим процессом лазерной обработки (рис. 2.11) можно считать координатно-параметрическим управлением (КПУ) [22, 38, 61], содержащим как координатное управление движением [24, 36, 37, 77] и ориентацией ОГ, так и параметрическое управление лазерным излучением.

Любое отклонение оптической головки от заданной траектории движения и ортогональной ориентации к обрабатываемой поверхности ведет к изменению формы и площади пятна сфокусированного лазерного излучения и, соответственно, к изменению плотности потока тепловой энергии, подаваемой в зону реза, – изменению технологических параметров процесса обработки.

В качестве источника лазерного излучения применяют источник для визуализации «силового» лазерного излучения или отдельный твердотельный (полупроводниковый) лазер, расположенный на ОГ или последнем звене МС лазер-робота.

В этом случае может быть реализовано так называемое лучевое управление движением ОГ со стабилизацией технологического зазора

между ее соплом и поверхностью обработки или лучевая коррекция (сигнальная адаптация) контурно-позиционного управления от устройства ЧПУ или человека-оператора с задающей рукояткой. Данный принцип управления или коррекции возможен и при использовании ультразвуковых и акустических дальномеров.



Рис. 2.11. Структура управления лазер-роботом

При идентификации и лазерной обработке неоднородной и загрязненной поверхности предпочтительны тактильные датчики нулевой, одно- и двумерной размерности, измеряющие параметры контактного взаимодействия между чувствительным элементом и поверхностью ОР.

Конструкцию датчиков определяют способом первичного преобразования информации. Особый интерес представляет группа тактильных датчиков, использующих механический чувствительный элемент на основе метода механического преобразования для определения механического перемещения под действием приложенной силы. Перемещение преобразуется в электрический сигнал с помощью линейных потенциометров, емкостных, индуктивных и оптоволоконных датчиков, а также микрофонов с пьезокристаллами, измеряющие характеристики звука, генерируемого в процессе движения вблизи поверхности ОР.

Для слежения за стыком свариваемых деталей применяют тактильный

датчик, в качестве чувствительного элемента которого используется игла, обладающая двумя степенями свободы. Величину отклонения иглы измеряют с помощью двух оптических воспринимающих устройств, построенных на инфракрасных светодиодах. Для считывания величины перемещения используют специальную маску на основе кода Грея, что позволяет добиться разрешающей способности 0,05 мм при максимальном отклонении иглы 10 мм.

На каждой из осей X и Y , связанных с системой координат XOY , в плоскости торцевой поверхности сопла находятся по два бесконтактных датчика. Предварительно по их показаниям производится ориентация оптической головки по нормали к поверхности с помощью приводов ОГ и/или приводов технологического манипулятора (рис. 2.12).

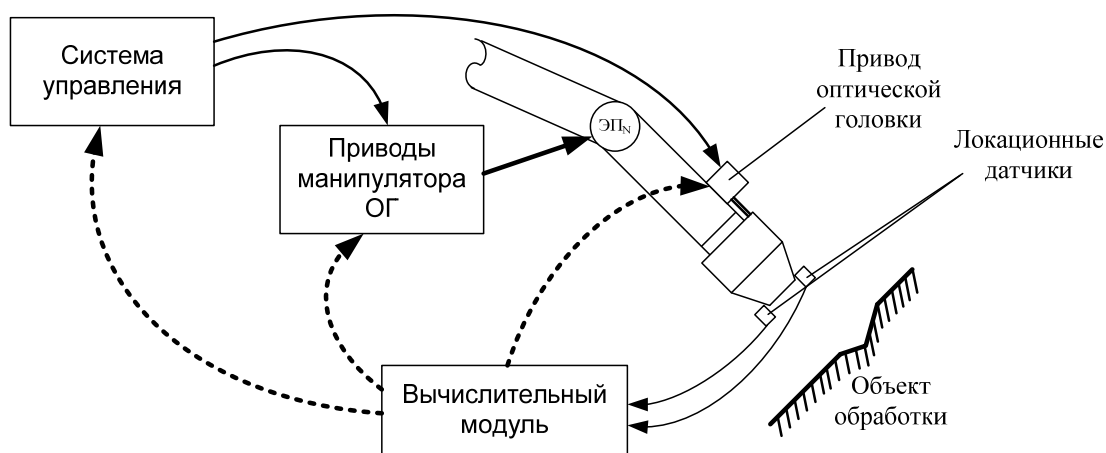


Рис. 2.12. Структурная схема коррекции движения оптической головки

Основная проблема координатного управления движением и ориентацией ОГ заключается в координации движений отдельных кинематических пар ТМ (при совмещенном варианте ТМ и МО), обеспечивающих требуемое движение ОГ.

Автоматическое управление перемещением и ориентацией ОГ с кинематической структурой в виде полностью совмещенных ТМ и МО (см. рис. 1.26) реализуется в виде программного или контурно-позиционного управления ЭП степеней подвижности ТМ или в виде лучевого управления [22, 23] отклоняющими зеркалами МО с последующим отслеживанием их положения ЭП соответствующих степеней подвижности ТМ.

Другая задача координации – распределение сил обратна задаче динамики, когда движение ОГ полностью задано и необходимо определить силы и моменты степеней подвижности, обеспечивающих это движение.

Решение данных задач усложняется тем, что кинематические и опти-

ческие позиционные взаимосвязи и силовые взаимодействия между компонентами МС лазер-робота имеют явно выраженный нелинейный взаимозависимый двухуровневый характер: на первом уровне – взаимосвязи и взаимодействия между ТМ и МО через их кинематические цепи и отдельных манипуляторов с ОР; второй уровень – уровень взаимосвязей и взаимодействий внутри автономных манипуляторов.

Во время движения ОГ силовые и позиционные взаимодействия существуют вместе и являются взаимосвязанным позиционно-силовым взаимодействием. Обобщенная структурная схема взаимосвязей и взаимодействий первого уровня в МИС лазер-роботов, разработанная В.П. Умновым, представлена в работах [37, 77].

Основная цель системы координатно-параметрического управления двухманипуляционным ИУ лазер-робота – гарантированное выполнение операции лазерной обработки, что определяется качеством лазерной резки, сварки и термообработки изделия, которое должно соответствовать технологическим требованиям.

Переходный процесс системы координатно-параметрического управления (КПУ) в режиме чисто координатного управления перемещением ОГ должен характеризоваться достаточной точностью и степенью устойчивости, требуемым быстродействием и малым (или нулевым) перерегулированием.

Это возможно при модальном управлении, когда расположение полюсов передаточной функции линеаризованной замкнутой системы управления полностью определяет устойчивость, характер переходного процесса и терминальные законы изменения сил, приложенных к ОГ с учетом их максимальных и установившихся значений.

Реализация модального управления замкнутой кинематической структурой манипуляционной системы лазер-робота требует синтеза многомерного модального регулятора. Упрощение этой задачи, в свою очередь, приводит к целесообразности адаптивного управления с редуцированным наблюдателем.

Алгоритм управления несомещенными ТМ и МО может быть построен на основе линеаризации и декомпозиции математического описания данного ИУ лазер-робота с помощью введения нелинейной обратной связи и нелинейного преобразования переменных состояния [23, 89, 127].

Структура системы управления движением ОГ лазер-робота с СМО как ТМ, так и МО представлена на рис. 2.13, где 1 – блок планирования; 2 – генератор команд; 3 – нелинейная обратная связь; 4, 5 – ТМ и МО лазер-робота с СМД; 6 – блок преобразования координат; 7 – блок оптимальной коррекции.

Блок планирования по исходному заданию формирует траекторию в пространстве задания, а блок генератора команд – эталонный входной

сигнал v_0 . Блок преобразования координат формирует обобщенные координаты q_i и их производные \dot{q}_i по измеряемым значениям положений и скоростей движения в степенях подвижности ИУ. Блок нелинейной обратной связи вычисляет управляющие обобщенные силы F_{0i} соответствующие q_i . Измеренные значения сил и моментов F_i представляются как $F_0(x,u) = \alpha(x) + \beta(x)u$, где x – вектор состояния, u – вектор управляющих напряжений $\alpha(x)$, $\beta(x)$ определяются двумя алгебраическими уравнениями функции X .

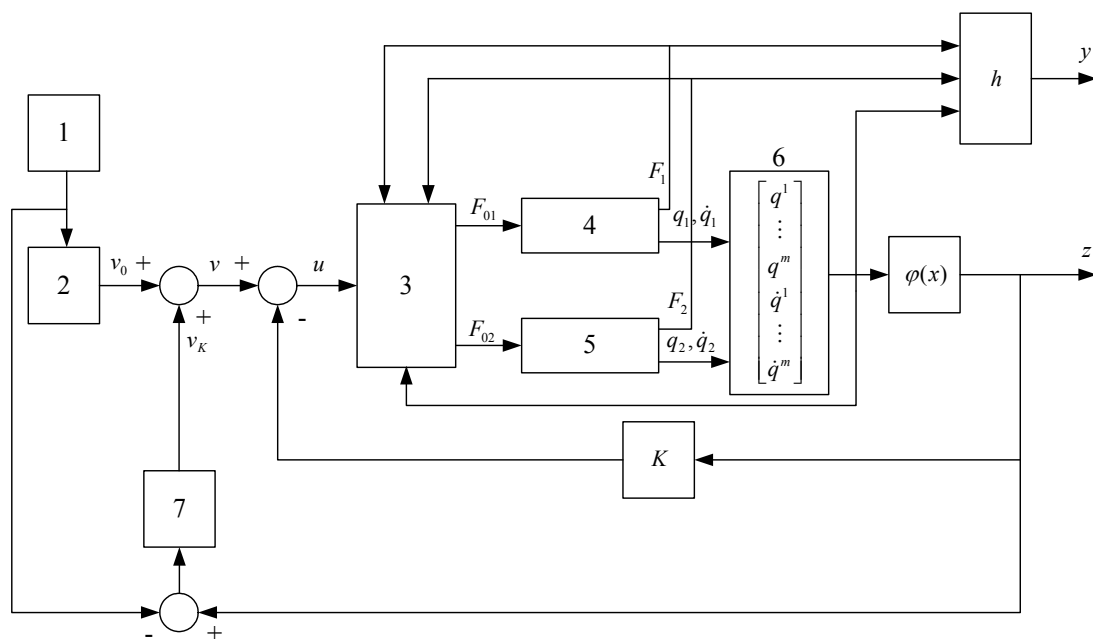


Рис. 2.13. Структура системы управления с нелинейной обратной связью

Для стабилизации системы и оптимальной коррекции ошибок вводится обратная связь с постоянными коэффициентами:

$$U_i = -k_i z_i + v_{ki}.$$

здесь $v_{ki} = -R^{-1} B_i^T P(t) e_i(t)$ – оптимальная коррекция, где R – положительно определенная матрица, $P(t)$ – положительно определенная матрица решения уравнения Рикатти.

В качестве выхода системы рассматривается положение (ориентация) ОГ

$$y = h(x_1) = [h_1(x_1), h_2(x_1), \dots, h_n(x_1)]^T,$$

где $x_1 = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$.

Использование нелинейного преобразования координат $\varphi(x) = [h_1 Lf h_1, h_2 Lf h_2, \dots, h_n Lf h_n]^T$, где $Lf h_i$ – производная Ли h_i вдоль f и нелинейной обратной связи преобразует систему с выходом y в линейную развязанную систему [90]:

$$\begin{cases} Z = AZ + BU; \\ y = CZ, \end{cases}$$

где A, B, C – диагональные матрицы; $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]^T$, $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$.

Другой вид систем координированного управления двухманипуляционным ИУ лазер-робота – системы с динамическим корректором (ДК) и позиционно-силовыми регуляторами (ПСР). Область применения подобных систем – управление как несовмещенными ТМ и МО, так и совмещенными двухманипуляционными ИУ при лазерной обработке крупногабаритных объектов объемной конфигурации. ИУ лазер-робота во втором случае условно подразделяют на ТРМ и ТЕМ. Оба манипулятора существенно различаются по поставленным задачам и динамическим характеристикам. ТРМ перемещает ТЕМ с ОГ в заданную точку рабочего пространства и фиксируется. Основные требования к системе координатного управления заключаются в обеспечении точности конечного положения и скорости движения при допустимом отклонении от заданной траектории. ТЕМ выполняет точные движения в рабочем пространстве на основе робастного, адаптивного и интеллектуального управления и сложных сенсорных систем. В общем случае в состав системы управления может входить подсистема манипулятора изделий (МИ) с собственным регулятором.

Задача управления подобными МС решается иерархическими системами управления (рис. 2.14). На высшем уровне управления с помощью координатора осуществляется координация действий ТМ (ТРМ) и МО (ТЕМ). Координатор формирует номинальное разомкнутое или замкнутое глобальной силовой и технологической обратной связью (ГОС) управление и может быть дополнен супервизором (СВ), который компенсирует отклонения от номинальной траектории, не оработанные локальными регуляторами.

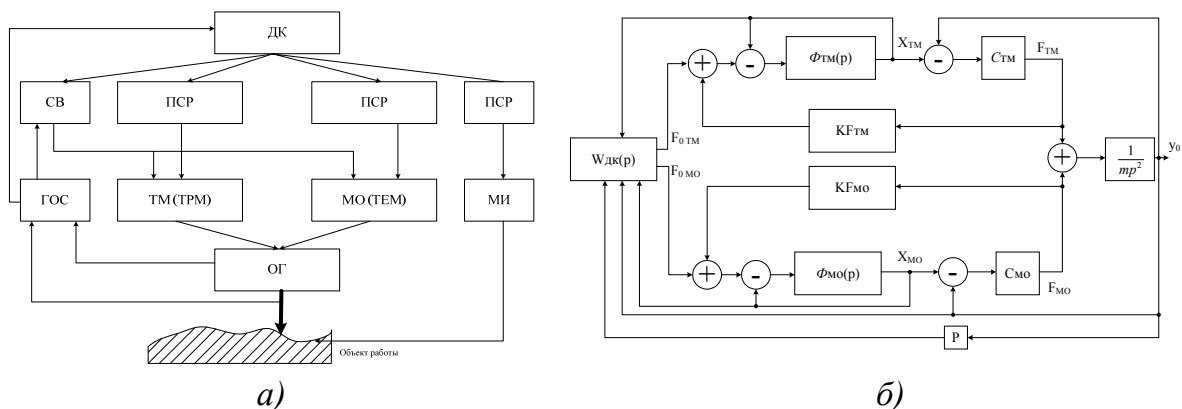


Рис. 2.14. Система управления с динамическим координатором: а – функциональная схема; б – структурная схема

На рис. 2.14 приняты следующие обозначения: $W_{ДК(p)}$ – передаточная функция ДК; $\Phi_{ТМ}(p) = \frac{X_{ТМ}}{M_{ТМ}}$, $\Phi_{МО}(p) = \frac{X_{МО}}{M_{МО}}$ – передаточные функции ТМ и

МО как колебательных звеньев; $F_{0ТМ}$, $F_{ТМ}$, $F_{0МО}$, $F_{МО}$ – силы задания и силы, прикладываемые к ОГ; $X_{ТМ}$, $X_{МО}$, y_0 – координаты перемещения конечной точки ТМ, МО и ОГ; $c_{ТМ}$, $c_{МО}$ – коэффициенты упругости ТМ и МО; $k_{FTМ}$, $k_{FМО}$ – коэффициенты силовых обратных связей; m – масса ОГ.

На основе анализа корней характеристического уравнения замкнутой системы в работе [89] доказано существенное улучшение качества переходного процесса вследствие включения динамического координатора.

Координирующее управление ТМ и МО посредством регулирования параметров, определяющих соотношение между их траекторными координатами S, \dot{S} и силой $F = [F; M]^T$, реализуется в виде согласованного ПСУ. Если при выполнении технологической операции необходимы соблюдение или идентификация геометрической формы, то применяют согласованное ПСУ с позиционным доминированием и аддитивной или/и мультипликативной корректирующей силовой связью [10, 15, 24].

Перспективны двухканальные адаптивные системы управления ТМ и МО с самонастройкой в каналах регулирования сил и перемещения, построенные на основе логического разрывного управления. В качестве примера на рис. 2.15 приведен один из вариантов реализации подобной системы. Адаптивный наблюдатель (АН) с устройством самонастройки через ЛПУ₂ осуществляет сигнальную или параметрическую адаптацию каналов регулирования S, F и регуляторов скорости и положения приводов ТМ. ЛПУ₁ в свободной зоне отключает канал силовой коррекции в зависимости от величины уставки F_0 силового взаимодействия ТМ и МО. В качестве нелинейного элемента (НЭ) может применяться элемент с односторонней проводимостью или элемент двусторонней проводимости с зоной нечувствительности.

Необходимо заметить, что при нулевом значении F_0, M_0 двухканальная система вырождается в одноканальную с регулированием демпфирования и податливости посредством корректирующей технологической обратной связи.

При необходимости решения задачи регулирования сил взаимодействия ТМ с МО с учетом кинематических параметров процесса взаимодействия целесообразно применение согласованного ПСУ с силовым доминированием (адаптацией в канале управления F). Адаптация каналов управления S и/или \dot{S} и F может осуществляться как поочередно, так и совместно. Переход от одного канала управления к другому может происходить программным путем и на основе информации о взаимодействии между ТМ и МО или ОГ с внешней средой.

Если требуется обеспечить управление со стабилизацией A_0 и/или N_0 в канале (S и/или \dot{S}) или (и) F , то вектор управления U принадлежит к множеству алгоритмов (2.8) в виде логической вектор-функций (1.23) и (1.24) [21].

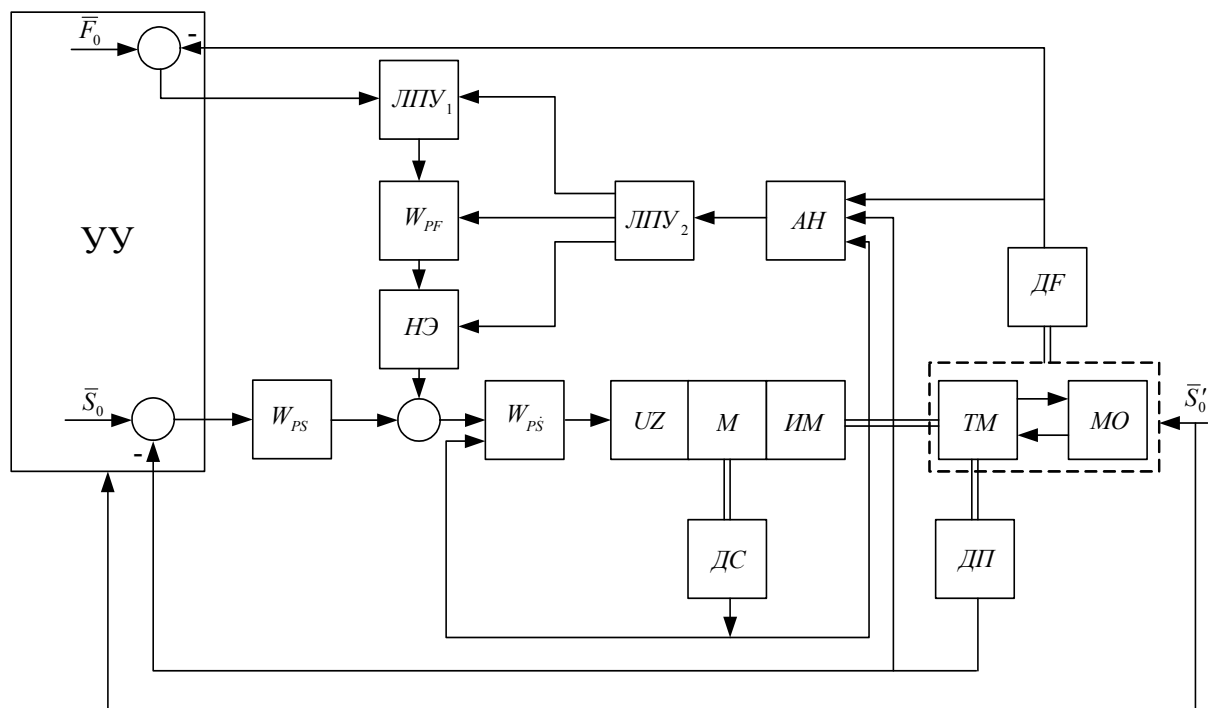


Рис. 2.15. Двухканальные адаптивные системы управления ТМ и МО: S_0, S_0' – управляющие позиционные сигналы исполнительных приводов ТМ и МО; $W_{PS}, W_{P\dot{S}}, W_{PF}$ – передаточные функции регуляторов положения, скорости и силы; ДП, ДС, ДФ – датчики положения, скорости и силы; УЗ, М, ИМ – силовые преобразователи, двигатели, исполнительные механизмы

Согласованное ПСУ ТМ и МО может быть реализовано с помощью двухканальных исполнительных ЭП, построенных по принципу подчиненного управления каналами (рис. 2.16). На первоначальном этапе ТМ взаимодействует с МО в режиме управления по вектору скорости или/и положения. Затем ЛПУ (рис. 2.16, а) подключает канал силомоментного воздействия ТМ на МО. Если это необходимо, то силомоментное воздействие может осуществляться со стабилизацией работы A_0 и/или мощности N_0 позиционно-силового взаимодействия ТМ и МО. Может быть и обратное взаимодействие каналов, где канал регулирования силы – ведущий, а канал регулирования перемещения МО в функции F_0, A_0, N_0 – подчиненный.

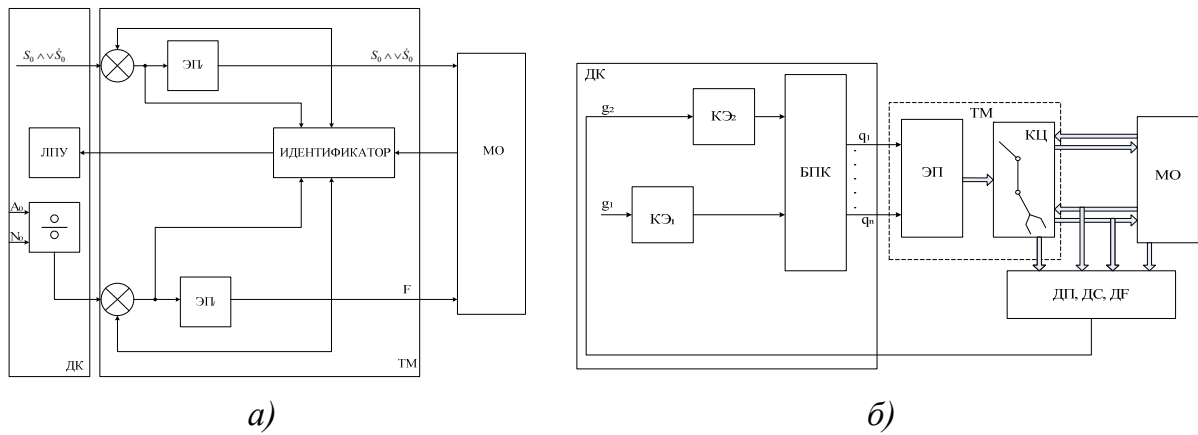


Рис. 2.16. Двухканальные адаптивные системы подчиненного управления позиционно-силовым взаимодействием ТМ и МО: а – со стабилизацией величины работы A_0 и/или мощности N_0 позиционно-силового взаимодействия ТМ и МО; б – с согласованным позиционно-силовым взаимодействием между ТМ и МО

Если МО может совершать регулярные или случайные движения, то система управления должна обеспечить на исполнительном уровне согласованное позиционно-силовое взаимодействие. Это может быть реализовано следующим образом (рис. 2.16, б): задающий сигнал g_1 через замкнутый ключевой элемент (КЭ)₁ и блок преобразования координат (БПК) поступает на ЭП степеней подвижностей ТМ. При внезапном медленном незначительном по величине перемещении МО осуществляется позиционное управление ТМ с регулированием податливости или силовое управление. При выходе ситуации взаимодействия ТМ с МО из-под контроля КЭ₁ отключает канал управления по g_1 , и с помощью КЭ₂ приводы ТМ переключаются в режим слежения за поведением МО.

С точки зрения реализации системы ПСУ взаимосвязанными манипуляторами лазер-роботов могут быть построены на принципах систем одно- (ОСД) и двустороннего (ДСД) действия с автоматическим, дистанционным и дистанционно-автоматическим управлением. В качестве «задающего устройства» систем ПСУ, построенных по принципу несимметричных следящих систем ДСД, используются приводы ТМ с силовыми обратными связями. Приводы МО, играющего роль «исполнительного устройства», в этом случае охвачены отрицательными обратными связями по положению или скорости. Глобальная обратная связь – это силовая обратная связь. При построении систем ПСУ ТМ и МО по принципу симметричных следящих систем ДСД приводы ТМ и приводы МО охвачены обратными связями по положению. Глобальная обратная связь – обратная связь по положению МО.

Другой пример применения системы управления с оптимальным ди-

намическим корректором и нелинейной обратной связью для координирующего управления ТМ и МО лазер-робота – система, представленная на рис. 2.17.

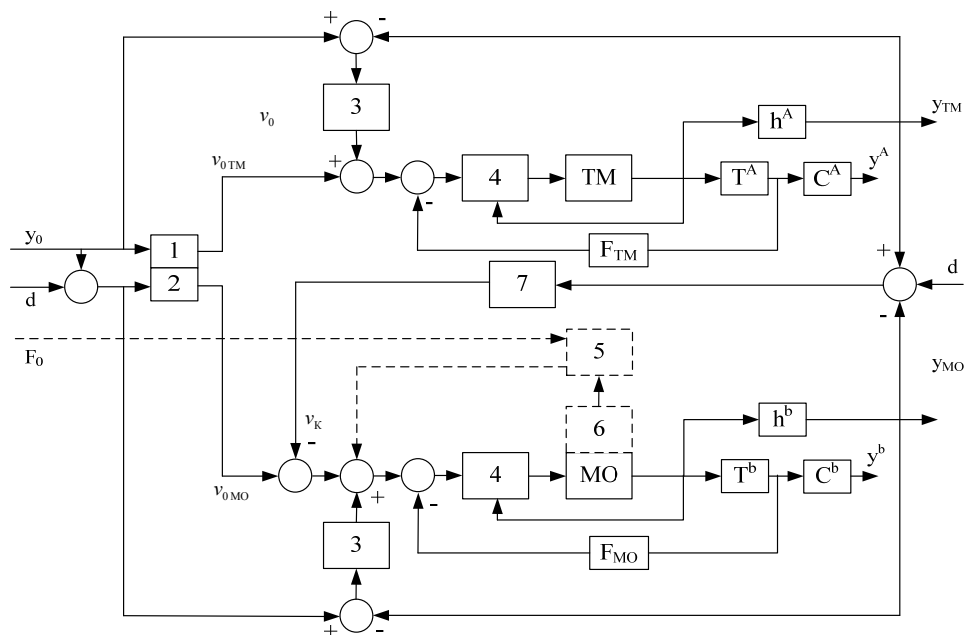


Рис. 2.17. Система управления лазер-роботом с оптимальным динамическим корректором и нелинейными обратными связями: y_0 – желаемая геометрическая траектория; d – смещение; F_0 – желаемая контактная сила на кисти робота; 1, 2 – линейные математические модели ТМ и МО; 3 – блок оптимальной коррекции ошибок; 4 – блок нелинейной обратной связи; 5 – блок оптимальной коррекции контактной силы; 6 – датчик силы МО; 7 – оптимальный динамический корректор

Если ТМ является ведущим, а МО – ведомым, то задача заключается в том, чтобы синтезировать для ТМ обратную связь, обеспечивающую его движение по заданной траектории, и сформировать оптимальный координатор, обеспечивающий слежение МО за ТМ с заданным вектором смещения.

Ошибки относительного положения двух манипуляторов, компенсируемые оптимальным корректором, имеют следующий вид [89]:

$$e(t) = y_{TM}(t) - y_{MO}(t) - d,$$

где y_{TM}, y_{MO} – векторы положения конечной точки ТМ и МО в декартовой системе координат; $d = [d_1, \dots, d_6]^T$ – вектор смещения матриц ТМ и МО.

Если геометрия поверхности объекта лазерной обработки не задана и не определено его поведение, то, как это уже отмечалось, наиболее эффективно применение многофункционального лазер-робота с сенсорным про-

граммированием адаптивным или интеллектуальным управлением на основе интегрированной мультисенсорной информационной системы.

Параллельная работа в различных режимах возможна при дистанционном управлении технологическим манипулятором оптической головки при совместном движении с транспортным манипулятором. В этом случае цель автоматического управления положением рабочего органа манипулятора – стабилизация его положения в пространстве, причем это осуществляется управлением по каждой степени подвижности ИУ по данным информационно-измерительной системы, определяющей отклонение точки фокуса оптической головки от исходного положения, вызванное различными факторами. Автоматическая стабилизация положения в пространстве кистевого узла манипулятора существенно упрощает режим дистанционного управления при выполнении операций лазерной обработки (рис. 2.18).

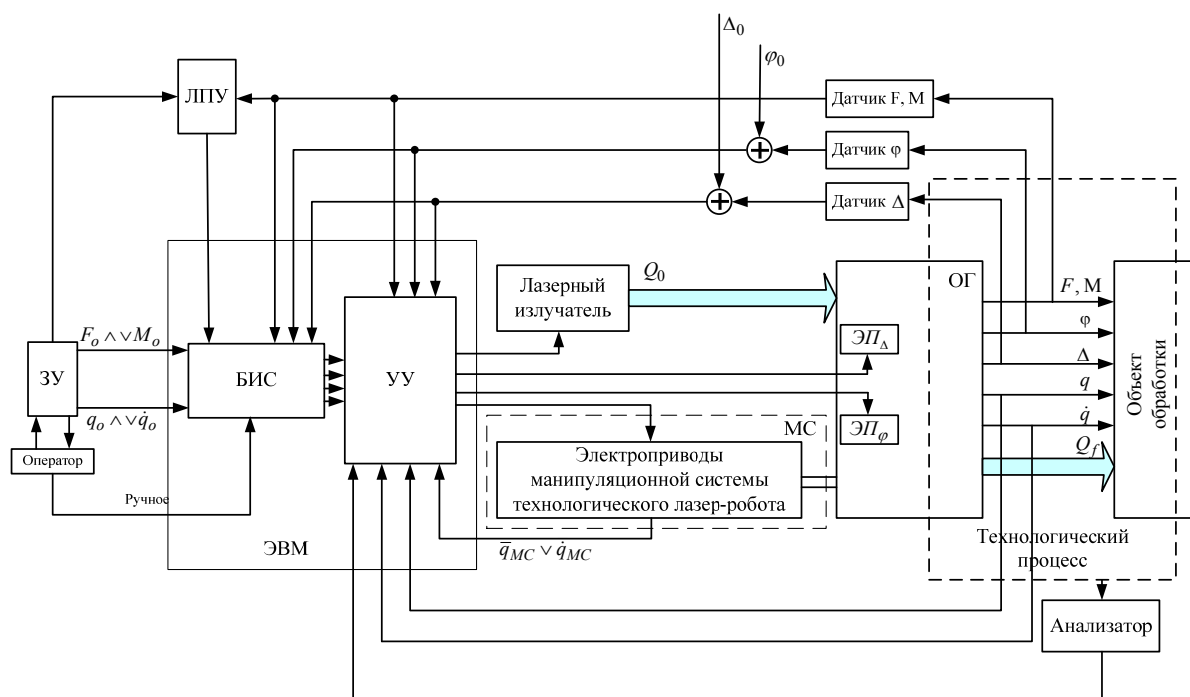


Рис. 2.18. Структура системы дистанционно-автоматического управления лазер-роботом

При дистанционном управлении перемещением оптической головки в момент появления сигнала с датчиков зазора блок изменения структуры БИС на основании алгоритма

$$U_3 = \begin{cases} k_1 \varepsilon_1 \forall \varepsilon_1 < \varepsilon_2; \\ k_1 \varepsilon_1 \forall \varepsilon_1 > \varepsilon_2 \end{cases}$$

переключает структуру управления на автоматическое управление под-

держанием заданного зазора и ортогональной ориентации оси лазерной головки к обрабатываемой поверхности.

При организации автоматического управления движением ОГ с линейной интерполяцией по методу оценочной функции первоначально осуществляется установочное перемещение по вертикальной оси Z . Если оптимальный зазор установлен, то возникает качание оптической головки в плоскости OXY на величину до достижения равенства сигналов попарно перпендикулярных датчиков зазора, т.е. ортогональной установки ОГ относительно поверхности обработки.

При использовании в оптической головке силомоментных датчиков зазора для управляющих сигналов приводов ОГ будут справедливы следующие выражения:

$$U_x = \left\{ \begin{array}{l} U_0 \forall S < 0; \\ 0 \forall S > 0; \end{array} \right\}$$

$$U_z = \left\{ \begin{array}{l} 0 \forall S < 0 \wedge U_x \neq 0; \\ U_\partial \forall S < 0 \wedge U_x = 0, F_z \geq F_\partial; \\ U_0 \forall S > 0 \wedge F_z < F_\partial, \end{array} \right\},$$

где U_x – управляющие сигналы приводов в плоскости OXY , U_z – управляющий сигнал привода регулирования зазора оптической головки.

В режиме супервизорного управления и обучения можно объединить описанные выше методы коррекции. Это означает, что в то время, когда робот пытается скорректировать траекторию движения на основе расхождения между запрограммированными и текущими значениями сил и моментов, человек-оператор наблюдает за его поведением и посредством задающего устройства добавляет в случае необходимости необходимое корректирующее воздействие.

Режим дистанционного управления применяется оператором в любых незапрограммированных ситуациях или в случаях отказа автоматической системы управления. При этом оператор использует ЗУ на своем пульте управления либо задает движение степеней подвижности манипуляционной системы непосредственными командами с пульта управления.

§ 2.4. Управление сборочными роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов³

Структура робототехнических комплексов для сборки перемещающихся цилиндрических объектов

В условиях современного производства роботы, как правило, включе-

³ Параграф написан совместно с кандидатом технических наук Матлуб Муханадом М. (республика Ирак).

ны в единую робототехническую систему, содержащую дополнительное технологическое оборудование. В одних РТК основная функциональная нагрузка по манипулированию объектами сборки возложена на промышленные роботы, в других – на вспомогательное технологическое оборудование.

По виду организационных форм производственного процесса сборка может быть поточной и непоточной, каждую из которых разделяют на стационарную и подвижную. Неподвижность объекта позволяет свести к минимуму влияние на точность изделия упругих деформаций при недостаточно жесткой базирующей детали.

В работе рассматривается РТК с типовым многономенклатурным однопоточным сборочным процессом при непрерывном перемещении собираемых изделий. На первом этапе управления подобным сборочным РТК является решение задач обнаружения сопрягаемой перемещающейся цилиндрической детали, определения ее координат и скорости перемещения исходя из допустимой величины помехи изображения. Полученная информация передается сборочному роботу с визуальным и силомоментным оцувствлением. Сборка осуществляется в режиме визуального слежения робота за непрерывно перемещающейся деталью.

Один из путей решения подобных технологических задач – использование робототехнических систем технического зрения (СТЗ) (рис. 2.19) [5, 33, 93]. В качестве исполнительного устройства технологического робота применяются механизмы как с последовательной, так и параллельной кинематикой.

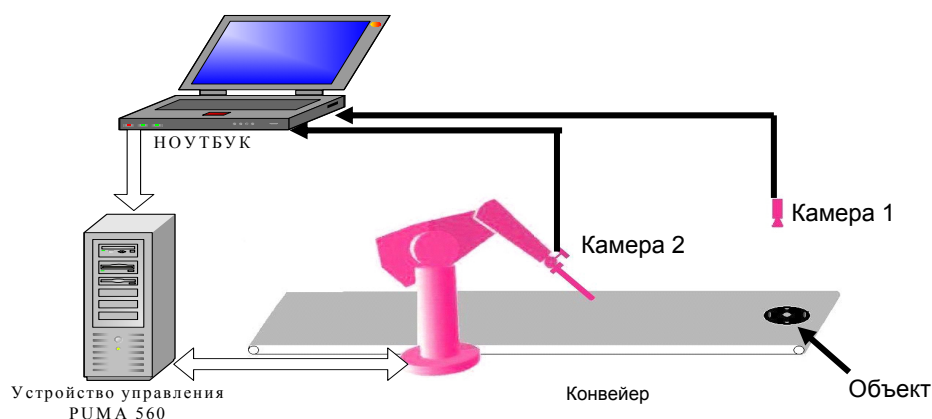


Рис. 2.19. Компоновка РТК сборки перемещающихся объектов

Один из примеров разработки подобного РТК сборки перемещающихся цилиндрических деталей типа «вал-втулка» – система, которая была создана в университете Пердью, США [71]. Цель данного проекта состояла в том, чтобы разработать систему управления сборочным промышленным манипулятором с СТЗ (рис. 2.20) при непрерывном перемещении собирае-

мых изделий. Предложенная система позволит сэкономить огромные производственные ресурсы и может применяться как для закручивания крепёжных гаек, так и для установки колёс, стёкол и т.п.

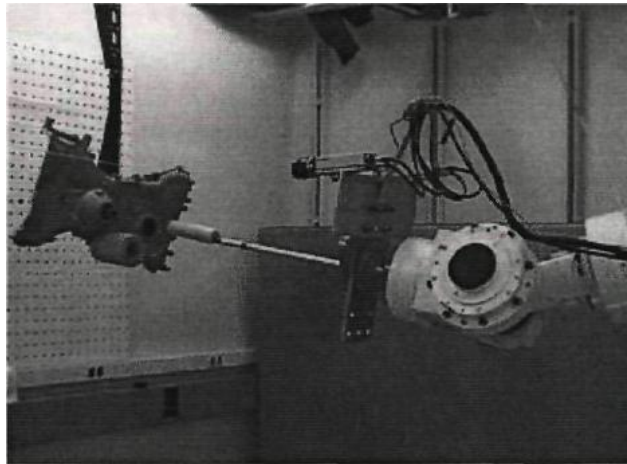


Рис. 2.20. Сборочный РТК, осуществляющий слежение за перемещающимся объектом

Интеллектуальные роботы с параллельной архитектурой, основанные на СТЗ, состоят из многоразовых циклов управления, каждый из которых имеет специализированный уровень способностей. Такая архитектура категориальна и иерархична в том смысле, что каждый цикл управления может дополнить уровень способностей цикла ниже, и циклы могут представлять «грубо-точную» градацию с учетом визуального восприятия. На самом «грубом» уровне обработка сенсорной информации позволяет роботу узнать о приблизительном местонахождении объекта. На самом «точном» уровне обработка стереоизображения позволяет роботу более точно определить положение и ориентацию объекта в системе координат робота. Обработка в каждом модуле циклов управления полностью независима и может быть выполнена со своей скоростью. Классификатор управления распределяет результаты каждого цикла, соответствующего определенным конфиденциальным показателям, полученным только от сенсорной информации. Такая архитектура имеет явные достоинства, касающиеся всей деятельности системы, которая не подвержена влиянию «самого медленного звена» и отказоустойчивости, так как ошибки в одном модуле не влияют на другие модули. Эта архитектура использовалась в навигации мобильного робота и легко может быть расширена до таких задач, как «сборка на ходу», то есть в реальном времени.

Эта архитектура обладает многими ключевыми преимуществами: например, многоразовые циклы управления с визуальным сервоуправлением позволяют алгоритмам работать на их максимальной скорости и быть надежными, но эта система, которая может быть использована для выпол-

нения любой сборочной задачи, где требуемая точность – $3/4$ или даже $1/8$ (эксперимент вал-в-отверстие) дюйма, но это слишком большой зазор по сравнению с нашей задачей.

Более целесообразно применять алгоритмы, которые позволяют одновременно осуществлять однородное преобразование матрицы в реальном мире и камеры на руке с вычислением положения рабочего органа робота. Этот метод невосприимчив к шуму (помехам) и близок к очень быстрому и надежному решению. На практике на процесс калибровки камеры влияют числовые ошибки, ошибки в местоположении пикселя, ошибки квантования (дискретизации), выбранная модель камеры и т. д. В конечном счете все эти ошибки – причина различий в углах матрицы калибровки. Настоящие данные также могут быть собраны и использованы для этих тестов, но тогда будет трудно определить источник измеренной ошибки, так как она может возникнуть из этого алгоритма, из наших измерений положения в реальном мире или из-за процесса калибровки. В этом случае процесс калибровки создает большое количество проблем, поэтому рекомендуют использовать динамические системы с визуальным сервоуправлением без калибровки для избежания таких проблем.

В работе [92] продемонстрировано использование динамического лазерного «обнаружителя» (tracker) с шестью степенями свободы (6 DOF), чтобы оценить эмпирическим способом качество выполнения визуального сервоуправления в реальном времени с целью создания основного метода для оценки пространственных измерений 6 DOF в реальном времени. Лазерный обнаружитель обеспечивает высокую точность исходных измерений положения и ориентации объекта в условиях помех и может быть использован как объективный стандарт для калибровки и оценки визуального сервоуправления и алгоритмов управления роботом. Визуальное сервоуправление в масштабе реального времени, предложенное в ВлГУ, основано на применении СТЗ и развитии метода «The Purdue Robot Vision Lab» с иерархической и параллельной архитектурами. Используемые данные, с целью их сравнения, были получены одновременно от лазерного обнаружителя и системы визуального сервоуправления.

В общем случае сборочная система состоит из подвижного манипуляционного устройства робота, на котором расположен подвижный рабочий орган с видеокамерой, одной из деталей (цилиндрического вала) и подвижного объекта с цилиндрическим отверстием, в которое вставляется вал.

Рассматриваемые системы обладают высокой неопределённостью, которая характеризуется наличием подвижного объекта, движение которого описать алгебраическими, дифференциальными или разностными уравнениями либо очень сложно, либо вообще невозможно. При этом неопределённость вносится в описание модели робота, на которую оказывает воздействие окружающая среда.

В результате проведённого анализа интеллектуальных методов управ-

ления для решения рассматриваемого класса задач представляется целесообразным использовать механизм нечеткой логики для формирования управления робототехнической системой. В качестве информационно-измерительной системы предлагается применить модуль следящей СТЗ.

На рис. 2.21 представлена обобщённая структура системы нечеткого визуального управления робототехническими системами.

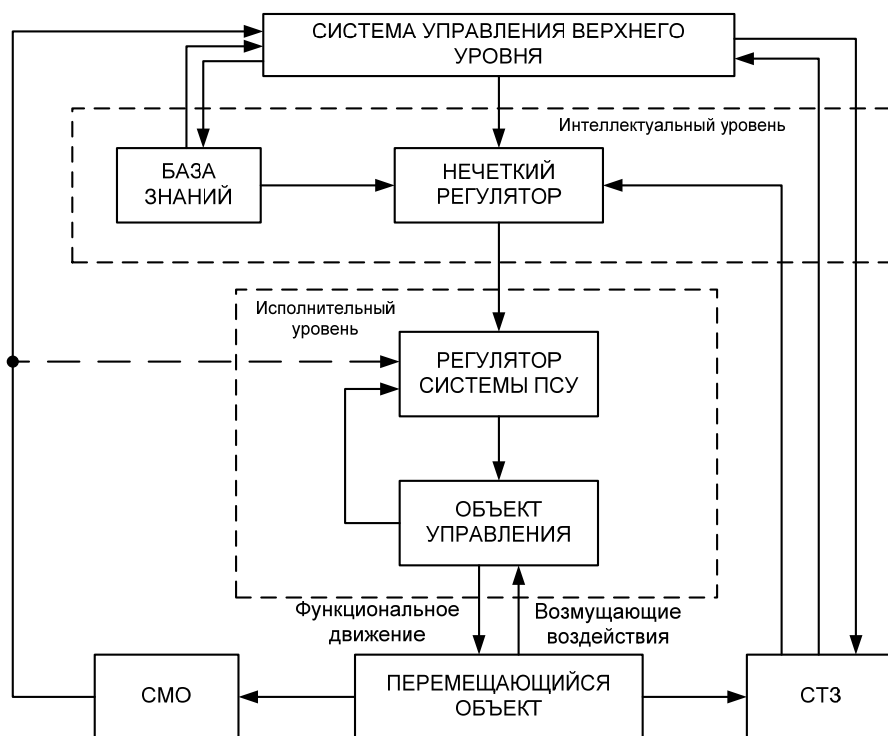


Рис. 2.21. Обобщённая структура системы нечеткого визуального управления робототехническими системами

Под внешней средой в задачах рассматриваемого класса понимается технологическая или окружающая среда, содержащая различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку, препятствия и подвижные целевые объекты работ. Условно внешнюю среду можно разделить на два основных класса: детерминированную и недетерминированную [18, 39, 74]. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристик объектов могут быть заранее определены с необходимой точностью. В недетерминированных средах их характеристики и поведение непредсказуемо. Объектом управления является манипулятор сборочного робота как многозвенный механизм, кинематические цепи которого образуют движущие звенья, составляющие кинематические пары. Конечное звено кинематической цепи манипулятора – рабочий орган с видеокамерой и валиком.

В соответствии с описанной выше структурной схемой системы управления робототехническими системами на основе технологии нечёт-

кой логики и СТЗ рассмотрим обобщённый алгоритм работы данной системы.

В начальный момент действия робототехнической системы оператор, внешняя система управления либо система управления верхнего уровня определяют целевую задачу, после чего осуществляется выбор целевого объекта, относительно которого или с которым необходимо осуществить действие. После этого система управления верхнего уровня (визуальная система определения положения и скорости подвижного объекта) указывает системе СТЗ объект слежения и переводит её в автономный режим слежения, а также определяет последовательность и порядок выполнения простых операций для каждого исполнительного объекта, после чего выдает команду нечёткому регулятору выполнить первую операцию. Нечёткий регулятор в соответствии с заданной операцией и соответствующим набором продукционных правил из базы знаний выполняет необходимое действие. Далее, регулируя порядок и последовательность выполняемых простых операций, система верхнего уровня выполняет поставленную задачу.

При создании интеллектуальных автономных робототехнических систем многофункциональная измерительная система типа СТЗ позволяет значительно расширить их характеристики и возможности. Модули СТЗ могут применяться при решении задач интеллектуального управления в комплексе с различными роботизированными системами как в области мобильной, так и в области промышленной робототехники.

Размещение модуля СТЗ на корпусе сборочного робота позволяет формировать управление относительно робота, т.е. положение объекта определяется в подвижной системе координат робота.

Размещение модуля СТЗ на последнем звене манипулятора (рабочем органе) позволяет осуществлять управление относительно системы координат схвата. В этом случае положение объекта определяется относительно рабочего органа и управление манипулятором может сразу осуществляться в подвижной системе координат схвата. Рассмотренная система (рис. 2.22) имеет два подвижных объекта управления с различными функциональными назначениями: подвижный технологический объект и подвижный манипулятор.

Применяют два варианта размещения модуля СТЗ относительно манипулятора робота. Модуль СТЗ расположен на рабочем органе промышленного робота, т.е. перемещение технологического объекта и управление манипулятором происходит в подвижной системе координат схвата с валиком. Это позволяет осуществлять управление по подвижному целевому объекту в любой точке рабочей зоны робота. При размещении СТЗ на неподвижном кронштейне положение целевого подвижного объекта опреде-

ляется в некоторой неподвижной мировой системе координат. В этом случае управление манипулятором осуществляется по подвижному целевому объекту в неподвижной мировой системе координат. Этот вариант удобен при условии, если целевой объект манипулирования перемещается в некоторой локальной рабочей зоне (зона обзора СТЗ) с одной стороны промышленного робота.

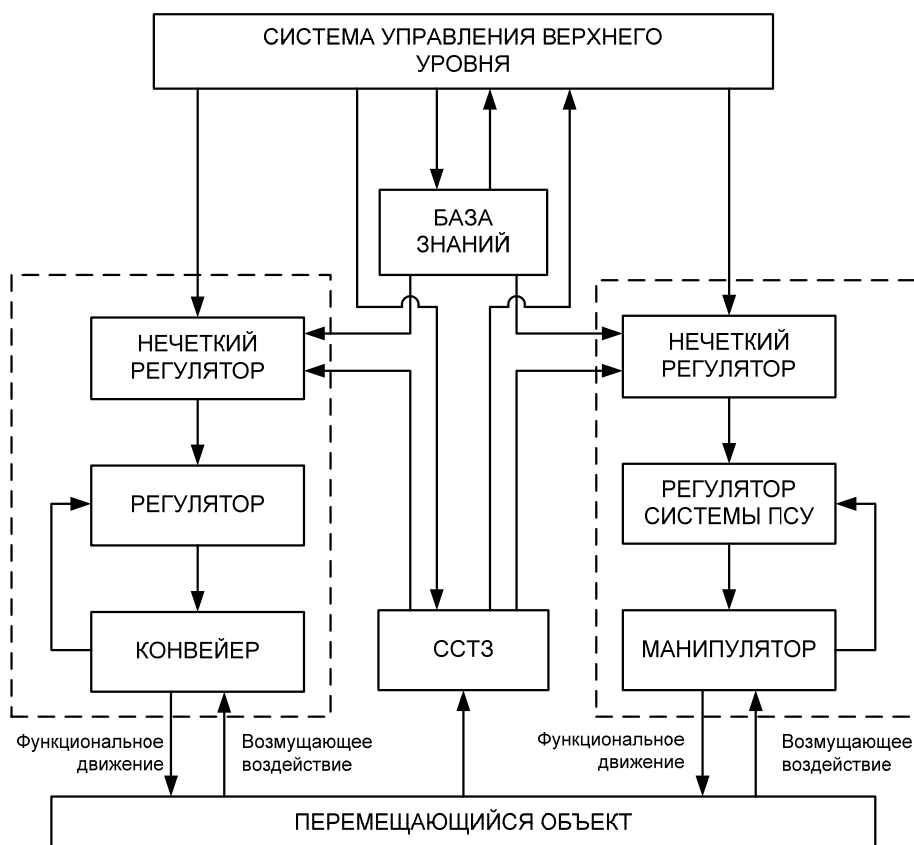


Рис. 2.22. Структурная схема системы управления робототехнической системой на основе нечёткой логики и СТЗ с двумя управляющими каналами

Обнаружение подвижного объекта

Обнаружение объекта на конвейере осуществляется с помощью алгоритма, основанного на методе фонового вычитания. На первом этапе первый кадр, фиксирующий изображение конвейера без объекта, принимается в качестве фона. Полученный фон сравнивается с видеосигналом, передающимся в реальном времени с видеокамеры, находящейся над конвейером, в компьютерную программу в среде Simulink Matlab. На основе вычитания фона из каждого кадра видеосигнала мы получаем нулевой результат, который свидетельствует об отсутствии объекта в области. Если результат превышает определенную пороговую величину, то это означает появление объекта в интересующей нас области.

Визуальные измерения скорости и положения объекта

Метод определения скорости перемещения и положения объекта основан на применении пассивной видеокамеры и алгоритмов обработки единичного изображения подвижного объекта. Вследствие перемещения объекта относительно неподвижной камеры во время экспонирования в активной зоне изображения возникают помехи движения. Это обеспечивает визуальный ключ для измерения скорости движущегося объекта. Первоначально сегментируется приблизительная интересующая область, и определяются параметры размытости изображения вследствие помех движения. На следующем этапе размытость устраняется, и полученное изображение используется для определения других параметров. В итоге по геометрии изображения, положению видеокамеры и величине размытости вычисляют скорость объекта и его положение.

Модель ухудшения изображения

В модели ухудшения изображения рассматриваемое изображение $g(x, y)$ – результат моделирования двумерной линейной системы. Оно может быть охарактеризовано функцией рассеяния точки (*PSF*) $h(x, y)$, называемой также функцией деградации [32, 33, 34]. *PSF* описывает отклик систем формирования изображений на точечный источник света или точечный объект. Предположительно помеха $n(x, y)$ – белая помеха Гаусса с нулевым значением средней величины.

Если функция деградации $h(x, y)$ линейна, а пространственная функция постоянна, то наблюдаемое расплывчатое изображение с добавочными помехами в пространственной области может быть представлено следующим образом:

$$g(x, y) = h(x, y) \otimes f(x, y) + n(x, y) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} h(x-i, y-j) f(x, y) + n(x, y), \quad (2.13)$$

где \otimes – двумерная свертка; g , h , f и n – соответственно, наблюдаемое изображение, функция деградации, первоначальное изображение и помехи.

Примеры изображений и их спектров интенсивности преобразования Фурье для двух вариантов длин расплывчатости представлены на рис. 2.23.

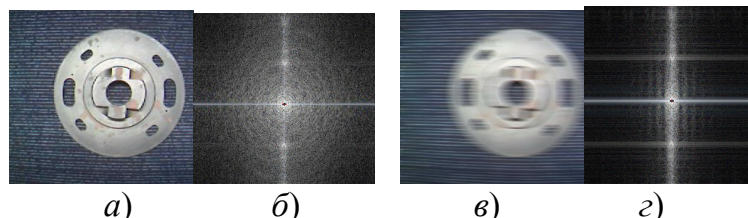


Рис. 2.23. Примеры изображений и спектров: а, б – первоначальное изображение и его спектр; в, г – изображение с длиной расплывчатости 20 и его спектр

Так как свертка в пространственной области равна умножению в частотной области, то выражение (2.13) может быть записано в виде

$$G(k,l) = H(k,l)F(k,l) + N(k,l),$$

где k, l – пространственные координаты частоты; G, H, F и N – преобразования Фурье наблюдаемого изображения g , функции деградации h , первоначального изображения f и помехи n .

Расплывчатость изображения связана с однородным линейным движением изображения относительно видеокамеры во время получения информации. Если сцену, которую необходимо записать, перемещать относительно видеокамеры с постоянной скоростью V под углом ϕ градусов к горизонтальной оси, то во время интервала экспозиции $[0, T]$ движение расплывчатости $PSF h(x, y)$ при «длине расплывчатости» $L = VT$ представляется следующим образом [32 – 34]:

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & \text{если } 0 \leq |x| \leq L \cos \phi; y = L \sin \phi, \\ 0, & \end{cases} \quad (2.14)$$

в противном случае $H(k,l) = \text{sinc}(\pi L f)$,

где $f = k \cos \phi + l \sin \phi$.

Идентификация длины расплывчатости

Если пренебречь помехами, то преобразование Фурье рассматриваемого изображения будет равно произведению преобразования Фурье PSF и первоначального изображения.

Величина частотного отклика движения расплывчатости PSF (2.14) характеризуется периодическими нулями по оси k , которые могут возникнуть при следующем условии:

$$k = \pm \frac{1}{L}, \pm \frac{2}{L}, \pm \frac{3}{L}, \dots$$

Нулевые значения функций $H(k, l)$ или $G(k, l)$ встречаются периодически вдоль линий, перпендикулярных направлению движения. Таким образом, длина расплывчатости может быть получена при идентификации достижения функцией $G(k, l)$ нулевого значения.

Процедура идентификации длины расплывчатости представлена в виде следующего алгоритма: вычислите преобразование Фурье $G(k, l)$ расплывчатого изображения $g(x, y)$; определите спектр логарифма $G(k, l)$ и переведите его в двоичный формат; переведите двухмерную информацию в одномерную, принимая среднеарифметическое значение вдоль столбцов матрицы преобразования Фурье; найдите обратное преобразование Фурье от одномерной информации, полученной ранее, и подставьте первое отрицательное значение в вещественную часть, которая соответствует длине расплывчатости.

При наличии помех движения типа Гаусса применяется этот же алгоритм и среднеарифметическая фильтрация расплывчатого изображения [34] перед вычислением соответствующего преобразования Фурье.

Фильтр Винера

Фильтр Винера, называемый также минимальной среднеквадратичной оценочной функцией, облегчает некоторые трудности инверсионного фильтрования при моделировании ошибки в восстановленном изображении с помощью статистических методов. При определении минимума средней погрешности уравнение фильтра Винера имеет следующий вид:

$$R_W(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \left[\frac{S_n(u, v)}{S_f(u, v)} \right]},$$

где $H^*(u, v)$ – комплексное сопряжение $H(u, v)$; $S_n(u, v) = |N(u, v)|^2$ – энергетический спектр помех; $S_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ – энергетический спектр исходного изображения. При рассмотрении первоначального, неизвестного изображения отношение энергетических спектров заменяется параметром K и оптимальное значение определяется экспериментально:

$$R_W(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K}.$$

Фильтр Винера применяется при определении обратного преобразования Фурье $\mathfrak{F}^{-1}[F^\wedge(u, v)]$:

$$f^\wedge(u, v) = \mathfrak{F}^{-1}[F^\wedge(u, v)] = \mathfrak{F}^{-1}[R_W(u, v)G(u, v)].$$

Идентификация цилиндрических объектов и координат центров отверстий

Идентификация цилиндрических объектов осуществляется на основе оценки отклонений круглости в поперечном сечении как наибольшего расстояния от точек реального профиля до прилегающей окружности с помощью подпрограммы «regionprops» Matlab7, отслеживающей границы объекта и вычисляющей черно-белый вариант его изображения. К цилиндрическим объектам с площадью S и радиусом R относятся объекты с коэффициентом круглости $1 > \delta \geq 0,94$, где $\delta = 4\pi \frac{S}{R^2}$. Матрица, определяющая номер объекта и величину коэффициента круглости, может быть получена с помощью подпрограмм «bwboundaries» и «regionprops» Matlab7. Эксперимент проводился на цветном изображении реального объекта с искус-

ственными помехами движения и различными величинами длины расплывчатости. Точность определения координат центра отверстия, как показали экспериментальные исследования, не превышает 5 %.

Отдельные результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2.24.

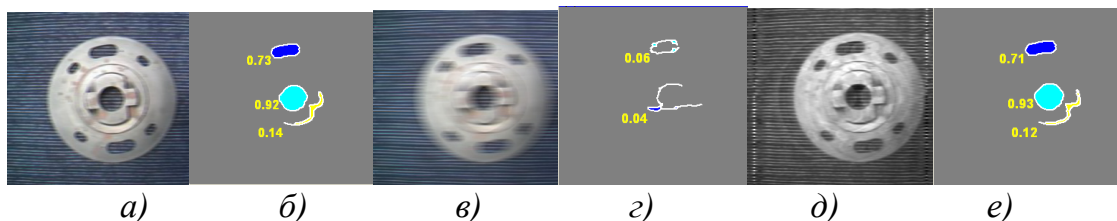


Рис. 2.24. Результаты экспериментальных исследований: а, в – изображения с линейными помехами 7 и 20 пикселей; д – восстановленное изображение объекта (в) с помощью приближенного алгоритма; б, г, е – распознавание контуров цилиндрических объектов а, в, д

Из представленных результатов видно, что увеличение помех движения приводит к невозможности определения формы объектов. После восстановления изображения возможно определение формы объектов даже при большой величине длины расплывчатости (до 20 пикселей). Определение координат местоположения подвижного объекта на конвейере в пикселях, осуществляется на основе коэффициента круглости.

В заключение остановимся на проблеме реализации исполнительного уровня системы управления. Следуя логике построения системы нечеткого управления, мы формируем цели элементарных операций с использованием нечетких отношений. При этом возможны дефаззификация этих отношений и использование обычного подхода к построению системы исполнительного уровня. Однако аппарат нечеткой логики можно в полной мере эффективно использовать и на этом уровне.

Существуют альтернативные принципы построения исполнительной системы. Первый подход заключается в том, что мы предполагаем известными те нечеткие правила управления системой, которые использует человек-оператор. Тогда эти правила можно формализовать и построить нечеткий контроллер, который их реализует в реальном времени. Примером является задача управления мобильным роботом по маякам, положение которых в рабочей зоне робота заранее неизвестно. В этом случае может быть применена схема логического вывода Мамдани, содержащая в себе как процедуру фаззификации, так и дефаззификации получаемых управляющих команд.

К сожалению, в большинстве случаев задачи, решаемые человеком-оператором при управлении мобильным роботом, не поддаются формализации. Примером может служить работа оператора мобильного робота с

адаптивной подвеской (три пары гусениц), перемещающегося по пересеченной местности. Опытный оператор справляется с этой сложной задачей путем выработки сенсорно-двигательного навыка управления, который трудно формализовать [92].

Для такого рода задач был предложен другой способ построения исполнительной системы, основанный на использовании гибридной сети, которая не является нейронной, но подобна ей по принципу работы. Эта сеть, обрабатывая информацию, получаемую при управлении роботом со стороны оператора, вырабатывает сама те нечеткие правила, которыми пользуется человек в характерных ситуациях. В этой системе используется схема нечеткого вывода, известная как схема Сунгено. Эксперименты подтверждают возможность реализации такой обучаемой управляющей структуры.

В качестве перспективного направления можно указать также применение нейронных сетей для анализа ситуаций и распознавания характерных сборочных ситуаций.

Визуальное слежение робота за перемещением подвижного объекта

Слежение за перемещающимся объектом осуществляется с помощью визуального сервоуправления (рис. 2.25), реализуемого с помощью видеокамеры СТЗ₂, расположенной на запястье робота, системы нечеткого моделирования и управления.

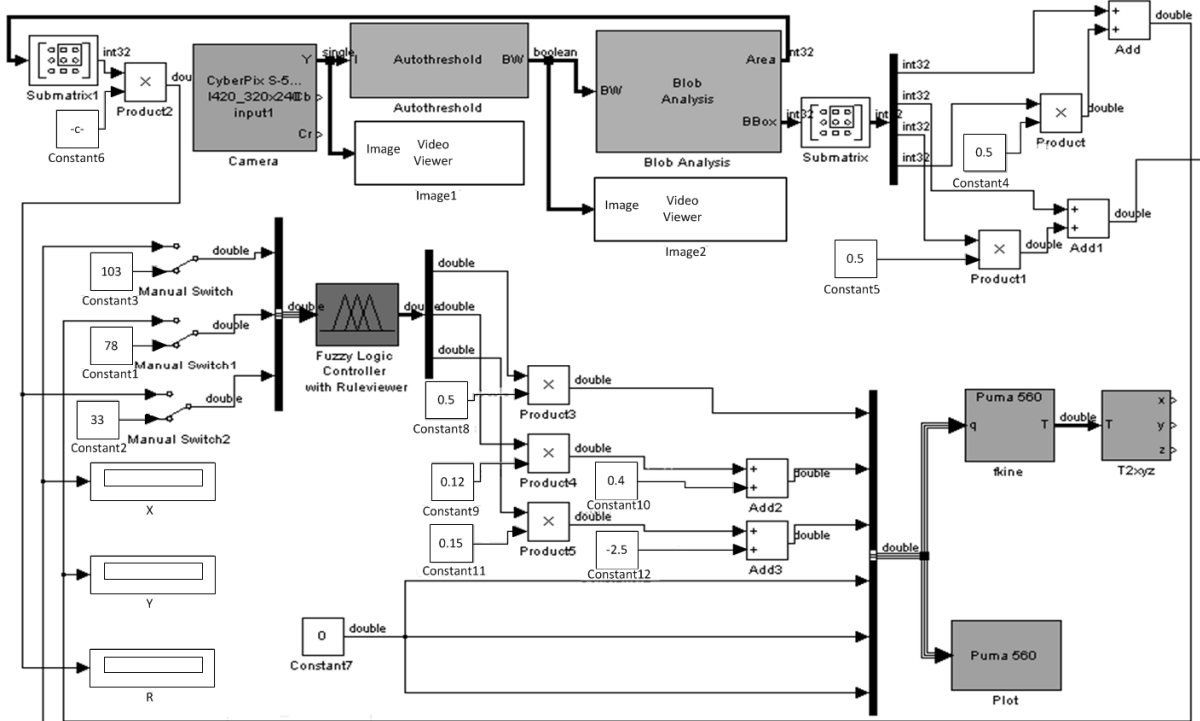


Рис. 2.25. Simulink модель и программа моделирования системы визуального слежения

ванной) величины F_{Z_z} , движение прекращается, и электропривод (ЭП) вертикального перемещения обеспечивает давление вала на подвижный объект с постоянной силой $F_k < F_g$ сборки.

Начиная с этого момента времени ЭП горизонтальных координат робота осуществляют произвольное перемещение в направлении свободного хода с одновременным движением вдоль оси Z . Если при движении вдоль координаты X или Y значение соответствующей силы F_x, F_y достигает предельного значения F_g , то осуществляется реверс ЭП данной координаты. Электропривод другой координаты, при этом, продолжает перемещение. Следовательно, ЭП координат X и Y независимо друг от друга совершают возвратно-поступательные движения с постоянными, не равными друг другу скоростями V_x и V_y . Поисковые движения производятся до тех пор, пока образующая торца одного объекта не «соскользнет» с фаски другого объекта. Силовое воздействие объекта уменьшится ввиду отсутствия прямого контакта и ЭП координаты Z движением со скоростью V_z произведет окончательное сопряжение объектов. БИУ осуществляет коррекцию скорости перемещения в функции сил F_x, F_y, F_z .

Структура системы управления (рис. 2.27), реализующей рассмотренные алгоритмы, содержит блоки идентификации СТЗ₁ и СТЗ₂, исполнительное устройство робота с измерительной системой и программно реализованный анализатор, включающий в себя наблюдатель, эталонную модель сборочного процесса и блок коррекции.

Сигналы с измерительной системы робота $\bar{F}_{сп}, \bar{M}_{сп}$ и модели \bar{F}_M, \bar{M}_M поступают на наблюдатель, который формирует функцию оценки $\Phi_K = \Phi_1$ правильности протекания сборочного процесса [34]:

$$\Phi_1 = \Phi((\bar{F}_M - \bar{F}_{сп}), (\bar{M}_M - \bar{M}_{сп})) \leq \varepsilon, \quad (2.15)$$

где ε – величина, стремящаяся к нулю и определяемая точностью измерения $\bar{F}_{сп}$ и $\bar{M}_{сп}$ и адекватностью эталонной математической модели. При выполнении условия (2.15) силы и моменты процесса сопряжения абсолютно или примерно равны силам и моментам на выходе его модели.

Если

$$\Phi_K = \Phi_2 = \Phi(\bar{F}_{сп} \leq \varepsilon_F, \bar{M}_{сп} \leq \varepsilon_M), \quad (2.16)$$

то система обеспечивает минимальные значения силовых взаимодействий сопрягаемых деталей. При нарушении хода сборочного процесса на выходе наблюдателя появляется не нулевой сигнал функции Φ_K и с помощью анализатора фиксируется событие несобираемости, определяются причины

несобираемости и формируются как воздействия сигнальной $U_{ск}$ и программной $U_{пк}$ коррекции, так и параметрической самонастройки $U_{снс}$ для завершения процесса сопряжения.

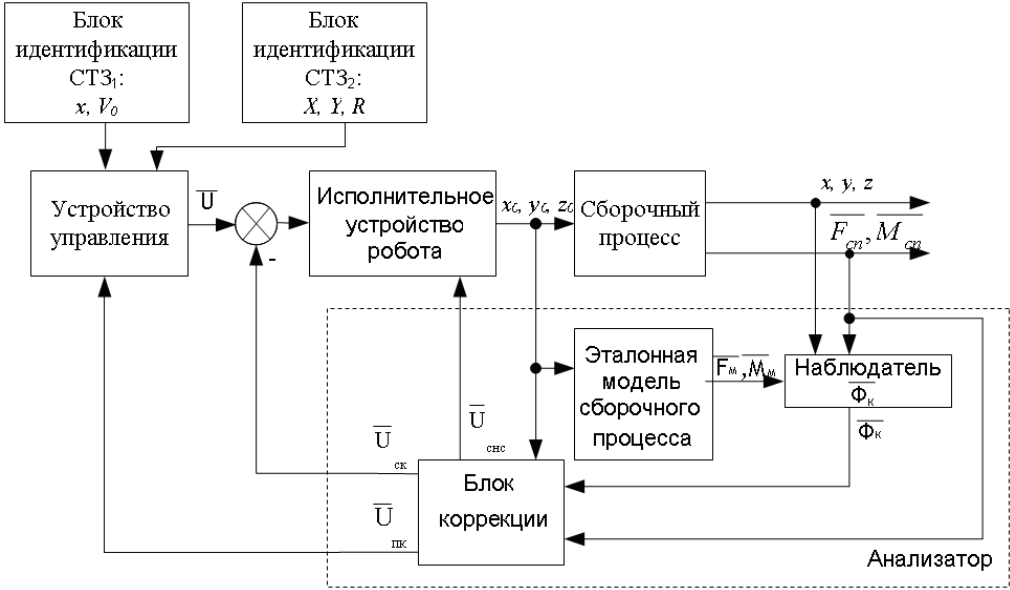


Рис. 2.27. Функциональная схема системы позиционно-силового управления

§ 2.5. Система позиционно-силового управления перемещением мобильного робота в трубопроводе с переменным сечением⁴

Большинство современных мобильных роботов функционируют в режиме так называемого дистанционного и/или дистанционно-автоматического управления, в том числе нечеткого управления. Специфика этого режима заключается в том, что часть операций, как правило, операции низшего уровня, выполняется в автономном режиме, т.е. без непосредственного участия человека-оператора. Операции же более высокого уровня, требующие принятия решений в сложных ситуациях, базируясь на множестве критериев, выполняются при непосредственном участии человека-оператора. Это объясняется тем, что, как правило, мобильные роботы работают в условиях значительной недетерминированности внешней среды, поэтому принятие решений роботом самостоятельно крайне затруднительно.

Функциональная схема управления траекторным движением с адаптацией силы поджатия колесных модулей к поверхности трубопровода представлена на рис. 2.28.

⁴ Данный параграф написан совместно с аспирантом Кадхим Дхиргаамом А. (республика Ирак).

Структура системы слежения МБР с автомобильной компоновкой шасси за программной траекторией (рис.2.29), в общем случае рассмотрена в известной работе [7] исходя из следующих условий и требований: программная траектория задается в явной или параметрической (в зависимости от времени) форме; робот оснащен стандартным набором датчиков обратных связей, измеряющих угловые скорости ведущих колес и углы поворота рулевых колес; при слежении за программной траекторией требуется контролировать нормальное отклонение от программной траектории и ошибку ориентации робота; структура системы слежения должна быть по возможности инвариантна по отношению к компоновке робота.



Рис. 2.28. Функциональная схема системы управления движением колесного МБР

Поскольку системы уравнений, описывающие выбранные случаи взаимодействия колесного МБР с поверхностью трубы, не имеют аналитического решения, позволяющего учитывать отрыв колес от поверхности, нелинейность тяговых усилий и сил сопротивления движению на колесах движителя, усилий в подвесках и т.п., то на их основе требуется разработка соответствующих компьютерных моделей в средах, позволяющих проводить исследование нелинейных систем (например, в среде Matlab 7.6, Simulink.). Для получения дополнительной информации о форме и особенностях поверхности трубопровода может быть использована система с

многокомпонентным датчиком или наблюдателем [65] сил и моментов, или мехатронный датчик типа, приведенного на рис. 1.36.

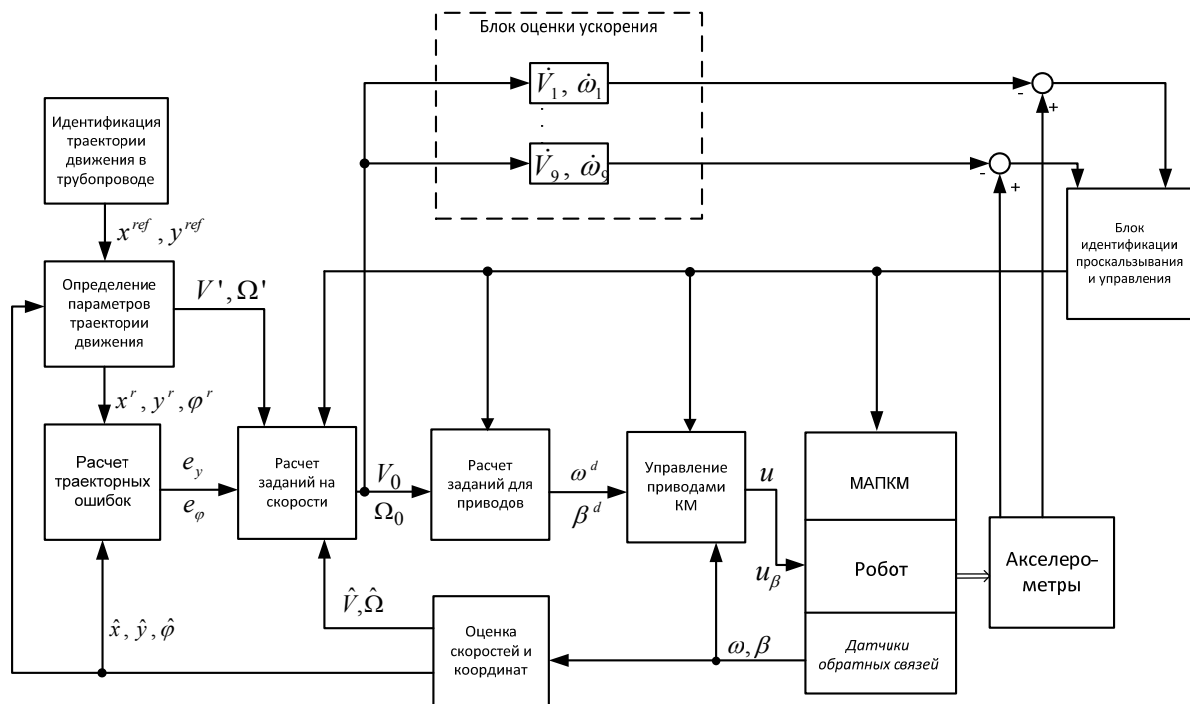


Рис. 2.29. Структурная схема слежения МБР за поверхностью трубопровода

При перемещении МБР в трубопроводе реализуется принцип движения в желаемом направлении вдоль наложенных на него удерживающих связей [15], который позволяет формировать «квазипрограммную» траекторию движения. С точки зрения позиционно-силового управления это нечеткое импедансное управление (рис. 2.30) [25-28, 66, 72, 96, 100, 125].

Рассматриваемая система управления имеет три обратных связи: по положению, силе и главную обратную связь с импедансным регулятором. Нечеткий механизм адаптации изменяет импеданс обратной связи в соответствии с невязкой между фактическим и желательным значением силы [125]. Нечеткий регулятор (механизм адаптации) имеет два входа: первый вход ΔF – отклонение текущего значения силы от требуемого значения силы; второй вход – аналог производной от силы F' . Выход нечеткого регулятора – $\Delta k, \Delta \xi$, – обеспечивает адаптацию параметров импедансного регулятора. Блок нечеткого устройства самонастройки обеспечивает прохождение возникающих в трубопроводе препятствий [116].

Наиболее простой вариант управления перемещением МБР в трубо-

проводе с переменным поперечным сечением – квазисвободное движение с адаптацией положения робота за счет механизма адаптации положения колесных модулей.

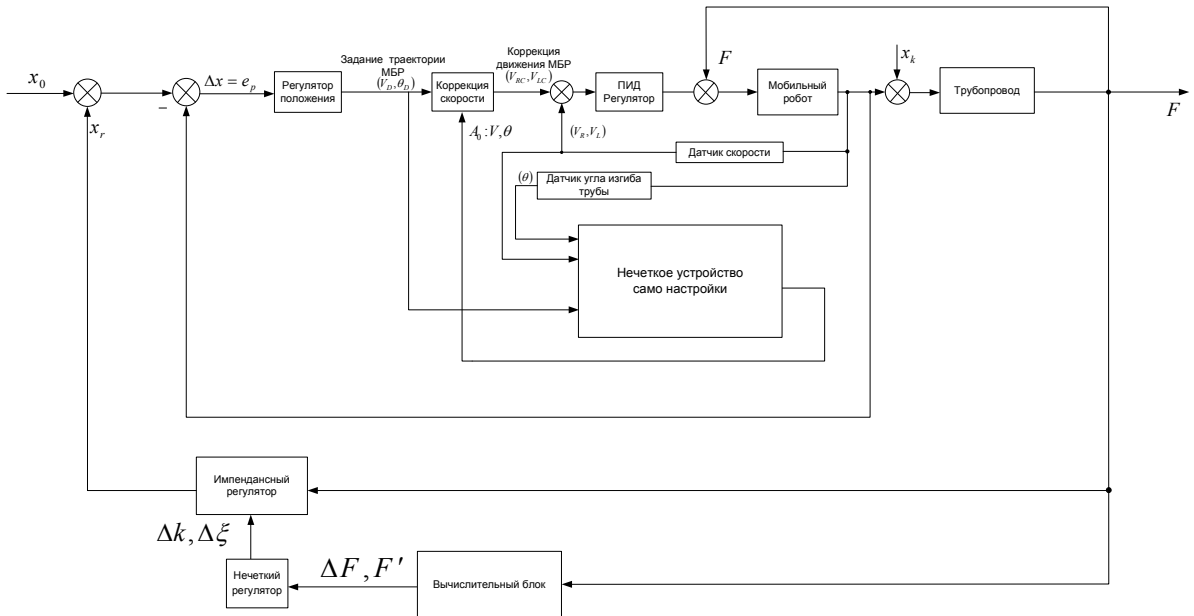


Рис. 2.30. Система нечеткого импедансного управления перемещением мобильного робота в трубопроводе

Упрощенная функциональная схема предлагаемой системы управления с адаптацией системы передвижения МБР к изменению поперечного сечения трубопровода показана на рис. 2.31.

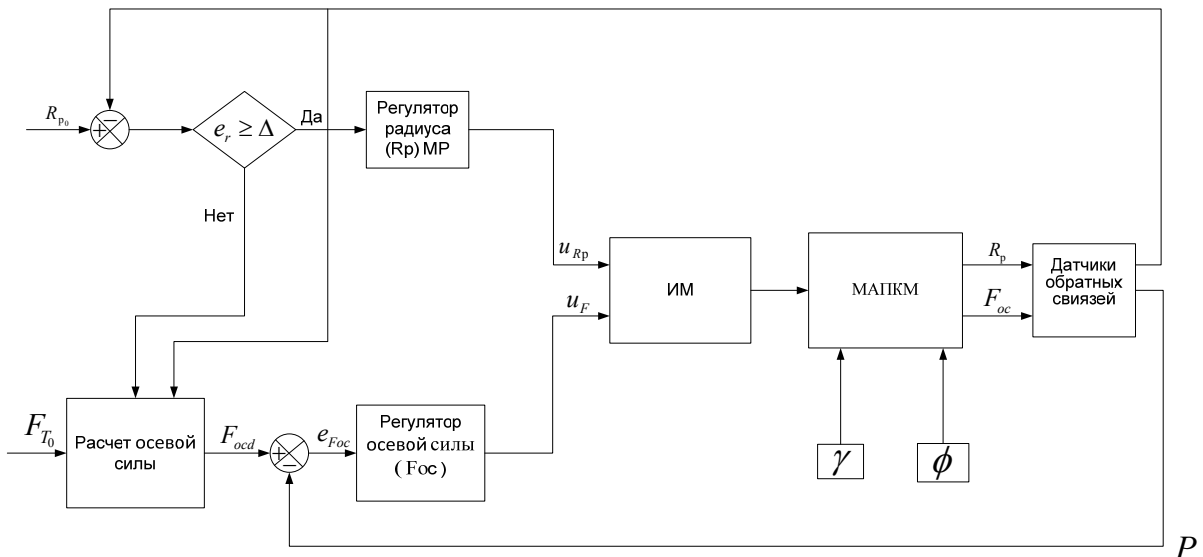


рис. 2.31. Функциональная схема системы позиционно-силового управления МАПКМ: R_{p0} , F_{T0} , ϕ – задания диаметра трубы, тяговой силы, угла наклона трубопровода

На первом этапе, до прижатия колесного модуля (КМ) к поверхности трубопровода, система работает в режиме позиционного управления. После контакта КМ с препятствием или поверхностью трубопровода система переводится в режим силового управления.

Моделирование характерных режимов адаптации механизма внутритрубного робота к диаметрам трубы осуществляется в среде Simulink MATLAB.

Свернутая схема моделирования системы позиционно-силового управления МАПКМ с ПИД-регуляторами в среде Simulink MATLAB представлена на рис. 2.32.

Свернутая модель включает в себя следующие подсистемы: расчет задания осевой силы (рис. 2.33, а), линейного электропривода (рис. 2.33, б); параметров U_1, U_2, U_3 и U_4 (рис. 2.33, в).

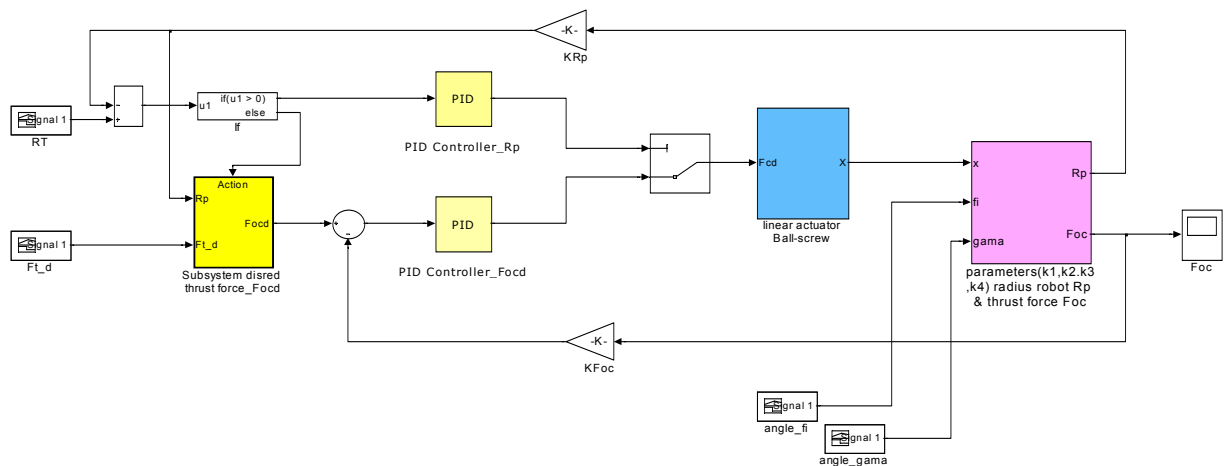
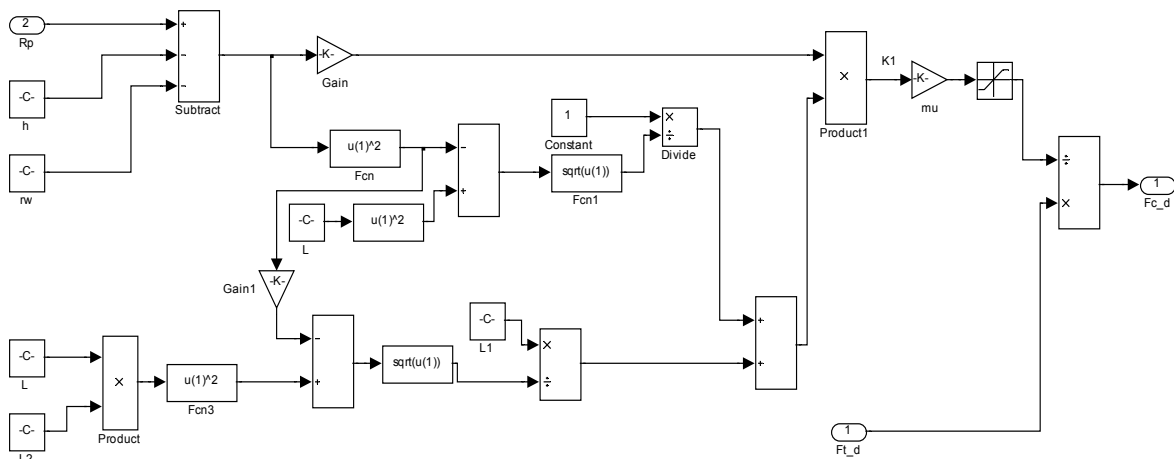
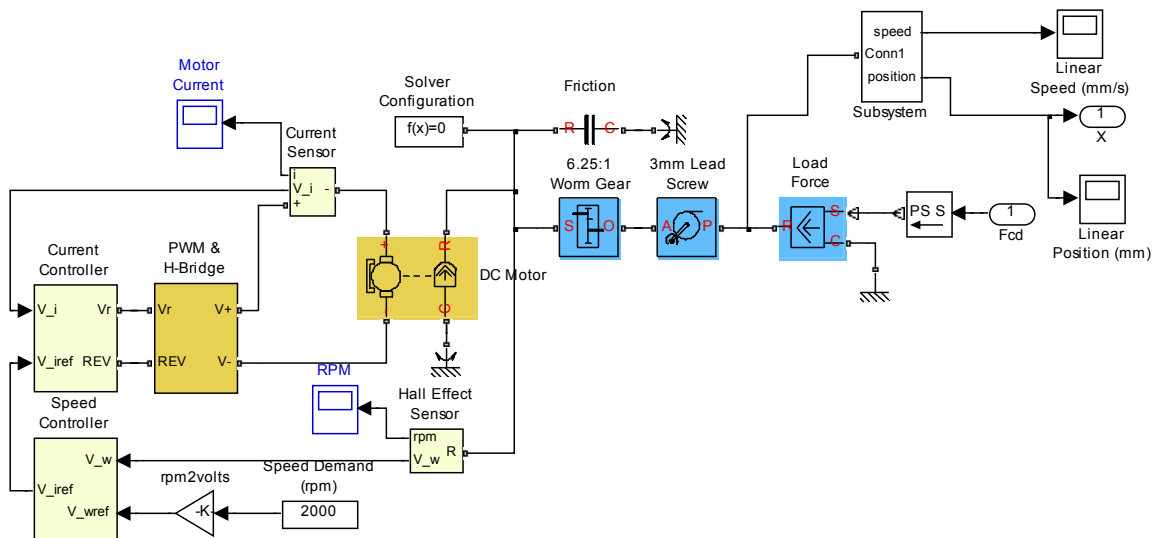


Рис. 2.32. Структурная схема модели МАПКМ в режиме позиционно-силового управления

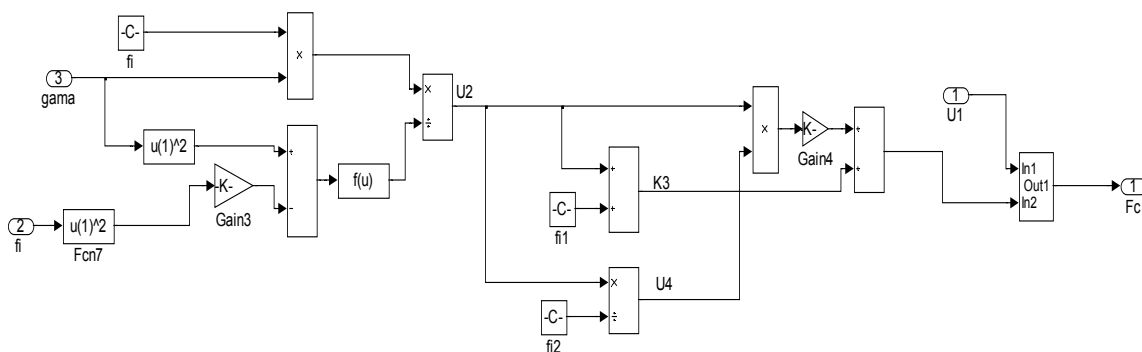


а)

Рис. 2.33. Подсистемы моделирования: а – расчет задания осевой силы; б – расчет линейного ЭП; в – расчет параметров U_1, U_2, U_3 и U_4



б)



в)

Рис. 2.33. Окончание

На рис. 2.34 приведены результаты исследования продольных скоростей ведущих колес МБР в изгибе трубы с различным диаметром и угловой ориентацией γ .

Из графиков видно, что ведущие колеса робота передвигаются в изгибе трубопровода с различными скоростями в зависимости от угловой ориентации γ .

На рис. 2.35 приведены результаты моделирования скорости движения ведущих колес v_{x1} , v_{x2} , v_{x3} МБР в отводе трубопровода с углом γ , при различных радиусах трубопровода.

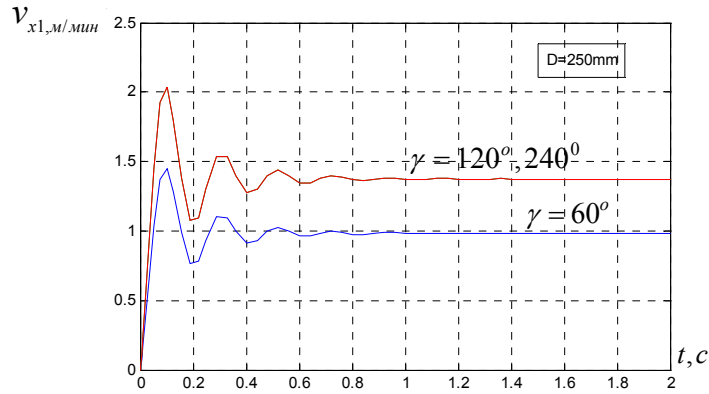


Рис. 2.34. Результат моделирования продольной скорости первого ведущего колеса МР в отводе трубопровода диаметром $D=250\text{мм}$ при различной угловой ориентации γ .

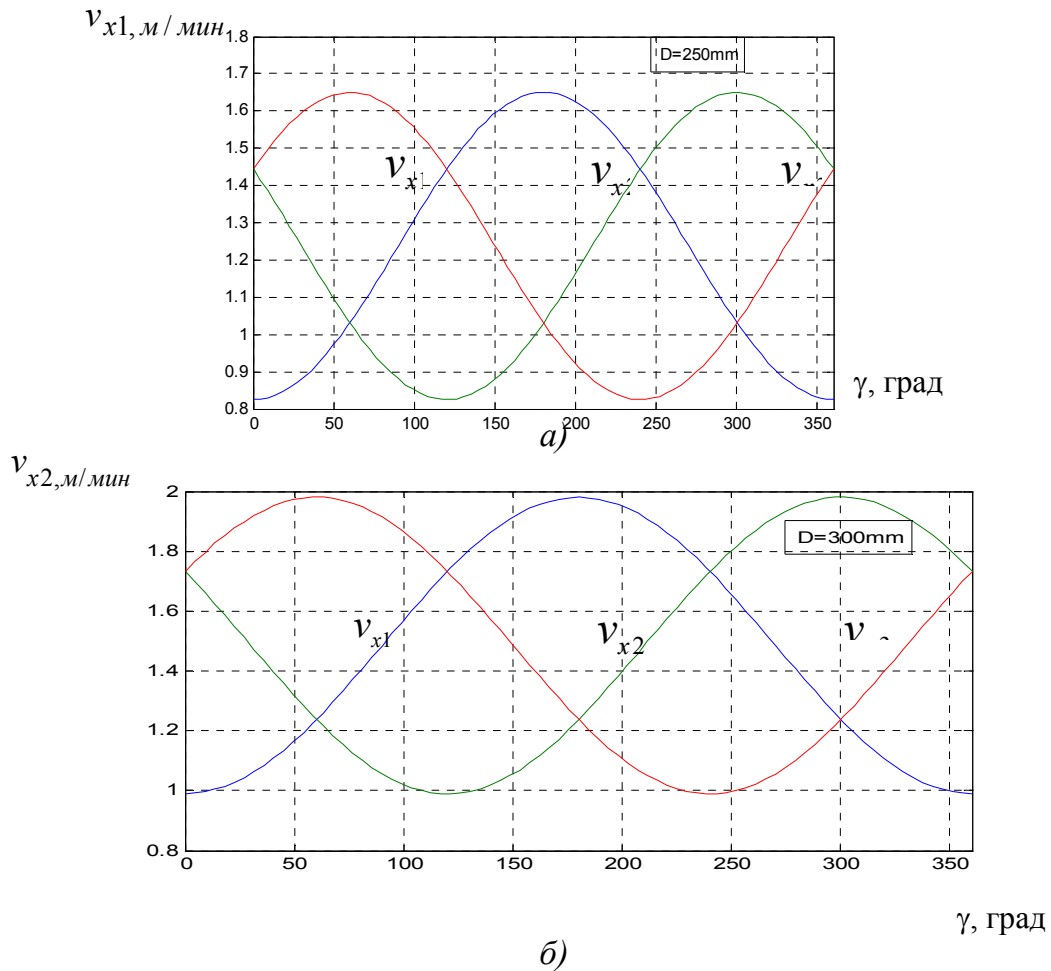


Рис. 2.35. Результаты моделирования продольной скорости ведущих колес v_{x1} , v_{x2} , v_{x3} МБР в в отводе трубопровода с диаметром: а – 250 мм; б – 300 мм; в – 350 мм

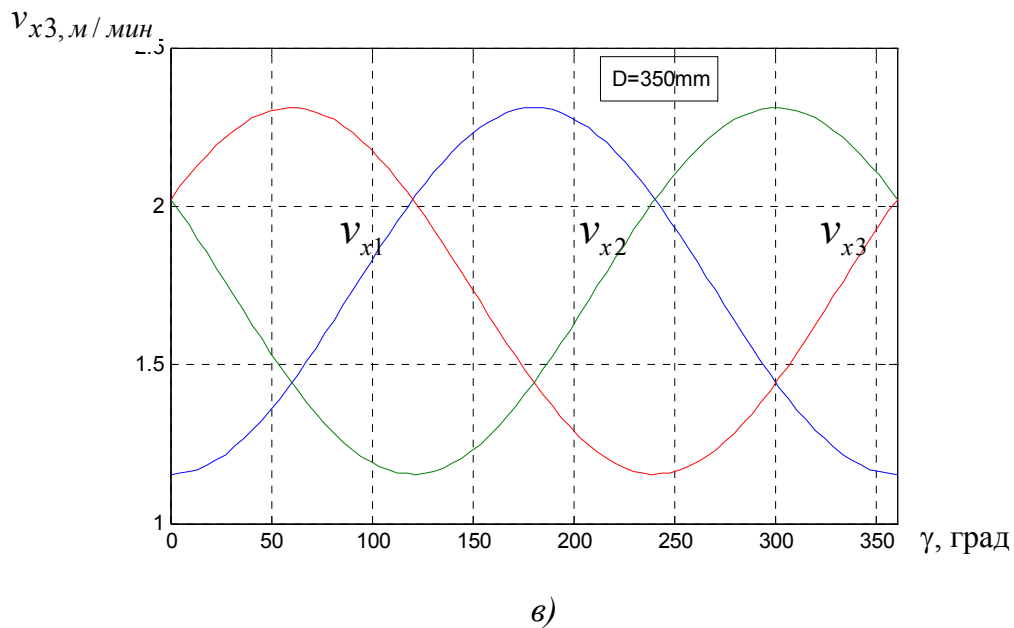


Рис. 2.35. Окончание

На рис. 2.36 и рис. 2.37 приведены графики величины осевой силы F_{oc} и ошибки в системе с нечетким регулятором для механизма адаптации внутритрубного робота с диаметрами трубопровода 250, 300, 350 мм со следующими значениями коэффициентов $K_1 = 1,23$, $K_2 = 16,5$, $K_3 = 0,33$.

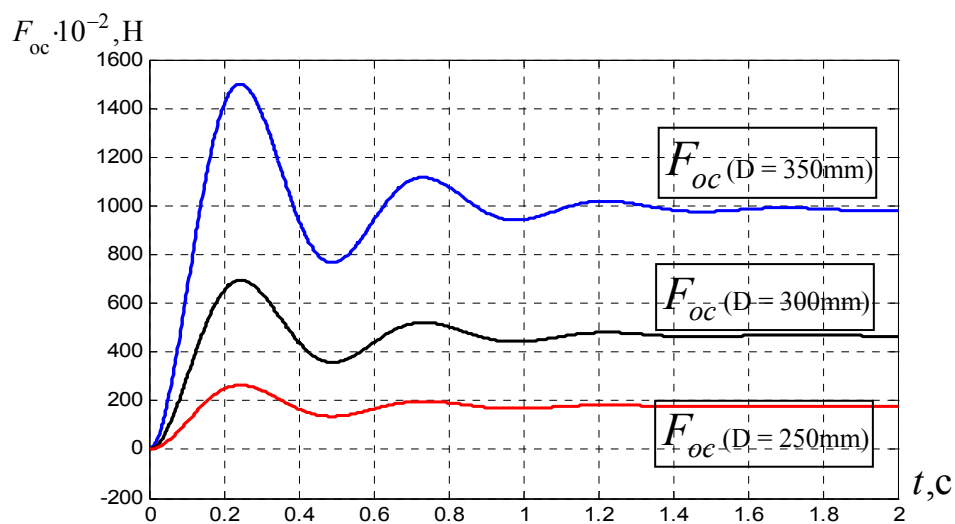


Рис. 2.36. Изменение осевой силы F_{oc} при диаметрах трубопровода 250, 300, 350 мм

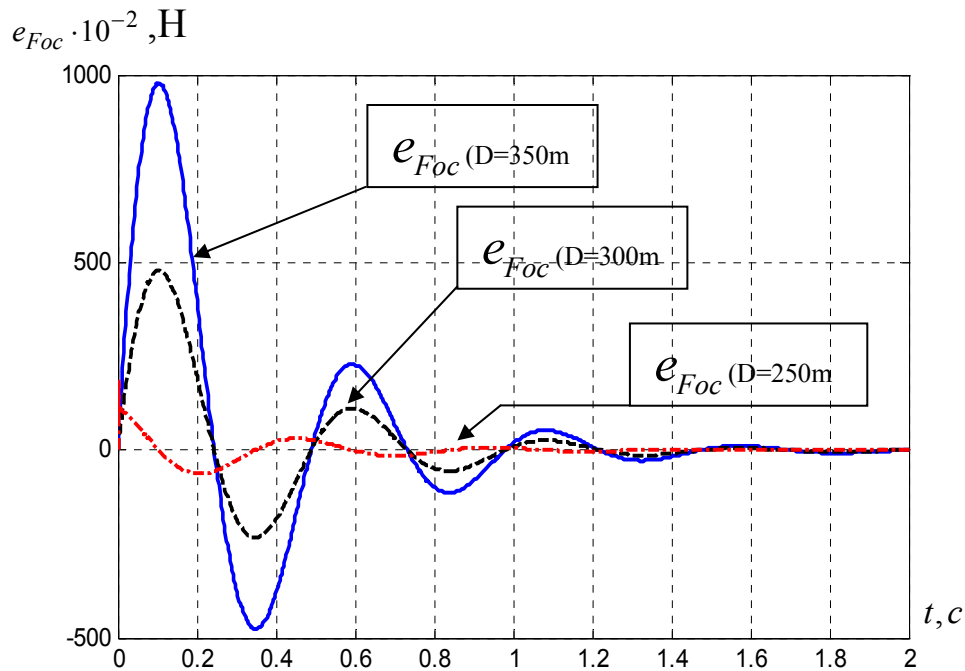


Рис. 2.37. Ошибка осевой силы $e_{F_{oc}}$ при диаметрах трубопровода 250, 300, 350 мм

Из данных рисунков следует, что величина осевой F_{oc} и ошибки $e_{F_{oc}}$ уменьшается с увеличением диаметра трубы.

Глава 3. СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Рабочее пространство шестистепенной МСПС – область возможных положений (ОВП) в общем случае в шестимерном пространстве шести обобщенных координат, чаще всего составляющих радиуса-вектора трех координат x, y, z центра платформы и трех углов поворота (например, углов Эйлера-Крылова (α, β, γ)).

Существенный момент при исследовании механизмов параллельной структуры – учет их особых конфигураций, которые приводят к нарушению структур механизма, предусмотренных t_{ij} функционированием. Различают два вида особого положения механизма, один из которых связан с исчезновением некоторых степеней свободы, другой – с появлением неуправляемой подвижности. Алгоритмы и структура системы управления исполнительными приводами полностью определяются целью управления, результатами кинематического и динамического анализа МСПС, в том числе результатами решения обратных задач и особыми положениями механизма.

§ 3.1. Анализ рабочих пространств и структур электроприводов мехатронных систем с параллельной структурой⁵

При выборе параметров МСПС и структуры ЭП важно учитывать не только максимум объема рабочего пространства, но и всевозможные углы ориентации выходного звена – характеристику, называемую сервисом [47], и особые положения, когда выходное звено может иметь неуправляемую подвижность. В соответствии с этим для решения задачи оптимизации необходимо разработать модель, характеризующую параметры рабочего пространства. Далее нужно построить алгоритм, чтобы были удовлетворены два критерия: объем рабочего пространства и общее число конфигураций при всевозможных ориентациях выходного звена.

Особые положения (сингулярности) механизмов параллельной структуры явились темой многих публикаций. Это не случайно, так как многочисленные достоинства данных механизмов (точность, нагрузочная способность) могут исчезнуть вблизи этих положений, может снизиться жесткость и утеряна управляемость.

Критерии таких особых положений разработаны Ф.М. Диментбергом. Вопросы исследования особых конфигураций пространственных механизмов рассмотрены в работах Ф.М. Диментберга, А.Г. Овакимова, П.А. Лебедева, В.В. Лунева, Д. Анджелеса, К. Сугимото, Б. Росса, Д. Даффи, В.А. Глазунова, Ж.П. Мерлет и других авторов.

Методика определения особых положений механизмов, имеющих параллельную структуру, с помощью математических критериев, а также возможность управления механизмами данного класса вблизи особых положений, обоснованная с помощью теории групп винтов, представлены в работах В.А. Глазунова с соавторами. Задача управления параллельным манипулятором состоит в том, чтобы перемещать подвижную платформу манипулятора – рабочий орган – согласно заданной траектории. Перемещение платформы осуществляется при помощи шести соединений (штанг) механизма. В работах [29, 30, 93, 94] решается задача компьютерного моделирования определения и управления положением и ориентацией подвижной платформы относительно базы. Для модели платформы входными переменными будут шесть сил, воздействующие на штанги, а выход-

⁵ Параграфы 3.1 и 3.2 написаны совместно с кандидатом технических наук Казым Хуссейном, Т. (республика Ирак).

ными – длины и скорости изменения длины штанг. Для моделирования механической части используется MATLAB/ SimMechanics, а для моделирования регулятора – Simulink. Верхняя и нижняя части каждой штанги прикрепляются к платформам карданными соединениями. Для имитации неподвижной части платформы Стюарта используется блок Ground, для моделирования движения штанги – блок Joint Actuator, на вход которого подается сформированный управляющий сигнал от регулятора. При помощи блока Joint Sensor измеряется скорость и положение штанги. Все элементы модели штанги объединяются в один блок, что позволяет сформировать в SimMechanics механическую модель всего параллельного манипулятора.

Алгоритмы компьютерных расчетов, моделирования и управления, разработанные Казым Хуссейн, Т. реализованы в Solidworks, SimMechanics и Matlab программной среде (рис. 3.1). Исследования основаны на решении обратной кинематической задачи, формализации связей, исключающих неоднозначность положения выходного звена и разработанного авторами алгоритма компьютерного моделирования в Solidworks программной среде.

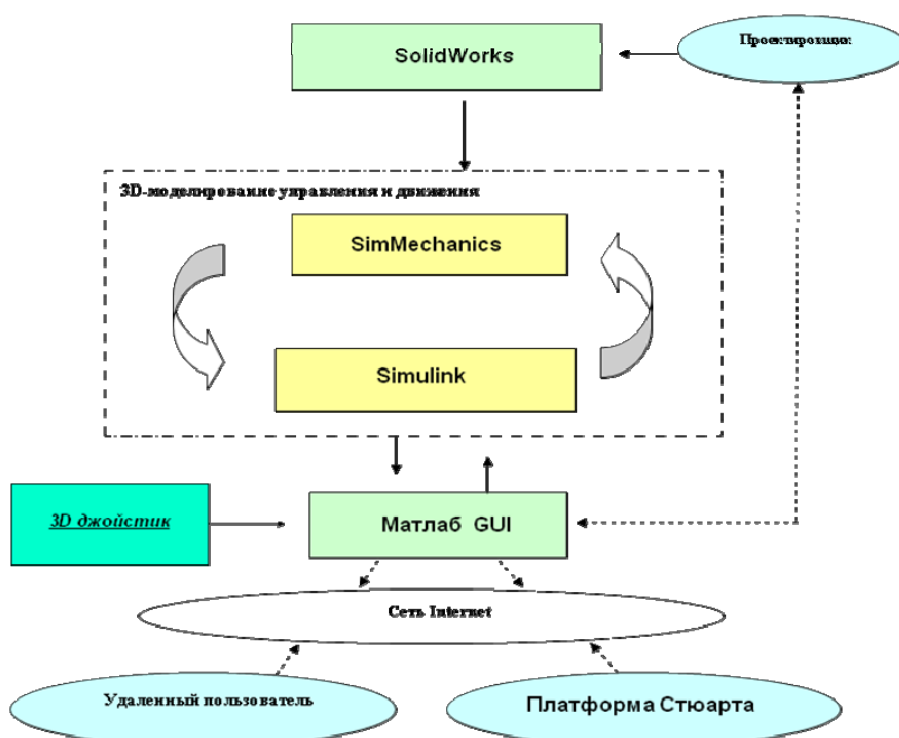


Рис. 3.1. Организация алгоритмов компьютерного моделирования и управления

Выходными сигналами механической модели будут шесть перемещений верхних шарниров. Формирование рабочего пространства осуществляется численными методами по специальному алгоритму (рис. 3.2).

Сущность алгоритма заключается в сканировании границы замкнутого пространства, которое и образует рабочее пространство с учетом ограничений кинематической структуры. Каждый отдельный блок алгоритма представляет собой совокупность множества элементарных математических вычислений. Для предварительной оценки рабочей области предлагается строить её сечения тремя ортогональными плоскостями (ZOX, ZOY и YOX), проходящими через точку центра платформы в исходном положении манипулятора. Этот метод позволяет с малыми вычислительными затратами оценить рабочую область проектируемого манипулятора с учетом ограничений минимальной и максимальной величин перемещения приводов штанг; отсутствия взаимных пересечений звеньев манипулятора, т.е. механизм не должен попадать в особые положения. Алгоритм вычислений представлен на рис. 3.3.



Рис. 3.2. Блок-схема алгоритма построения рабочей зоны МСПС

Отдельные результаты анализа рабочего пространства и положений мехатронной системы показаны на рис. 3.4.

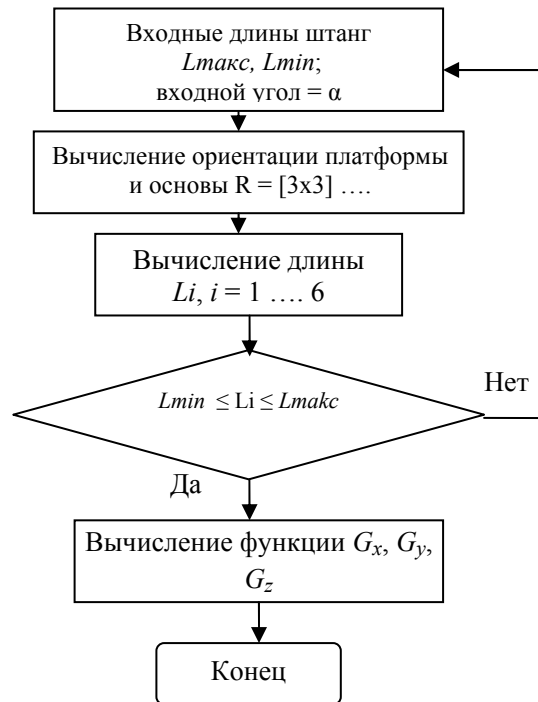


Рис. 3.3. Блок-схема вычислительного алгоритма

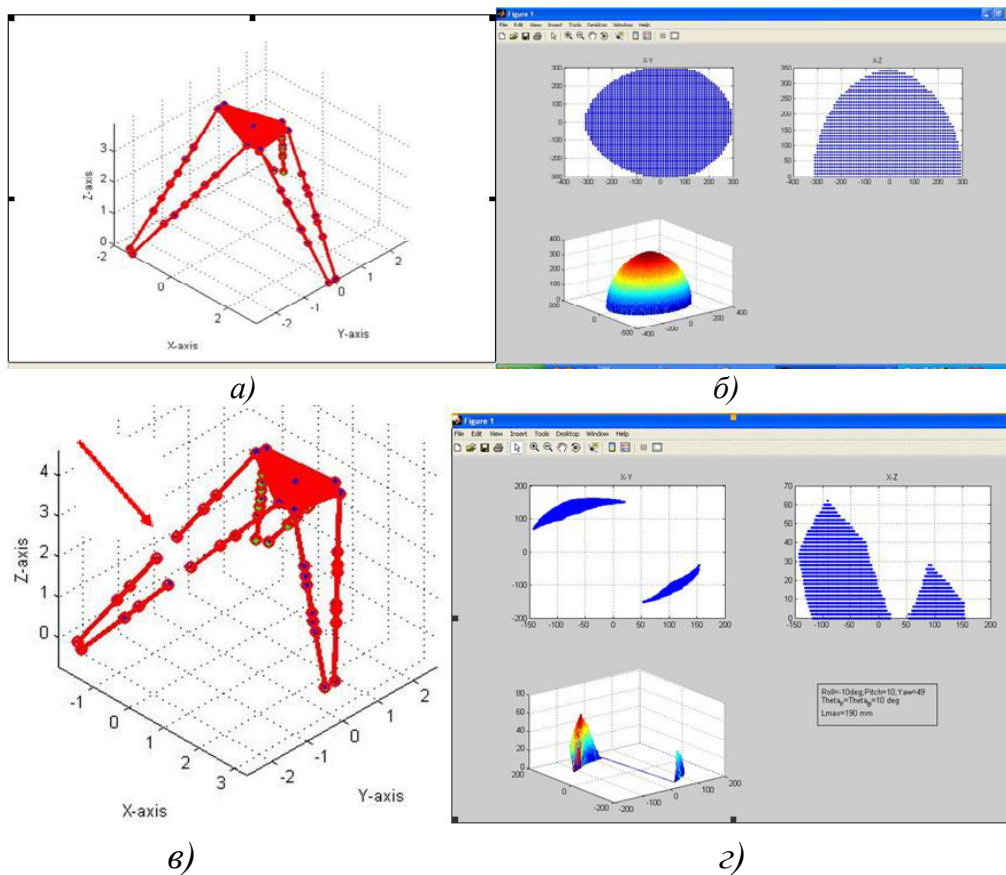


Рис. 3.4. Результаты моделирования шестистепенной МСПС: а, в – положения и ориентации подвижной платформы; б, г – сечения рабочей зоны

На рис. 3.4, *а, б* показаны как положения и ориентации подвижной платформы, так и сечения рабочей зоны ортогональными плоскостями XOY , XOZ и рабочие зоны в пространстве XYZ при следующих значениях углов α, β, γ : ($\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 0^\circ$; $\alpha = 0^\circ, \beta = 20^\circ, \gamma = 0^\circ$; $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 20^\circ$), а на рис. 3.4, *в, г* показаны аналогичные характеристики – при $\alpha = 10^\circ, \beta = 10^\circ, \gamma = 49^\circ$.

Проведенный анализ рабочих зон шестистепенных МСПС типа SSM(6-6), TSSM(6-3) и MSSM нулевого порядка для различных перемещений и ориентаций выходного звена показал, в частности наибольший объем рабочего пространства имеет мехатронная система SSM(6-6), Сочетание некоторых вариантов ориентаций платформ приводит к разрывности рабочих зон (рис. 3.4, *в, г*). Эта неоднородность показывает невозможность непрерывного перемещения платформы внутри рабочей зоны при следующих значениях углов: $\alpha = 10^\circ, \beta = 10^\circ, \gamma = 49^\circ$ и $(\alpha = -10^\circ, \beta = 10^\circ, \gamma = 49^\circ)$.

Полученные результаты цифрового моделирования показали исключительную важность синтеза структуры ЭП штанг платформы и алгоритмов управления их движением с учетом возникающих особых положений.

На этапе свободного движения выходного звена платформы Стюарта применяют алгоритмы позиционного управления и ЭП с главной обратной связью по положению. На начальном этапе особых положений происходит движение на границе свободной зоны [18, 67]. В этом случае наиболее целесообразно применение алгоритмов и структур систем согласованного (импедансного) ПСУ с позиционным и впоследствии с силовым доминированием (см. § 2.2). Этап позиционного управления предусматривает возможность робастного, импедансного и нечеткого управления [19, 22, 42, 52, 60, 83].

Обобщенная структура ЭП штанг, позволяющая реализовать в зависимости от состояния МСПС различные комбинации позиционного (ПИД, робастного, нечеткого), импедансного и независимого позиционно-силового управления, представлена на рис. 3.5.

Переход от одного управления к другому и обратный переход осуществляются с помощью микропроцессоров, реализующих соответственно логические переключательные функции или диагональные матрицы выбора.

При заклинивании МСПС осуществляется переход на чисто силовое

управление. Обобщенная структура системы управления (см. рис. 2.10) реализует алгоритм комбинированного ПСУ.

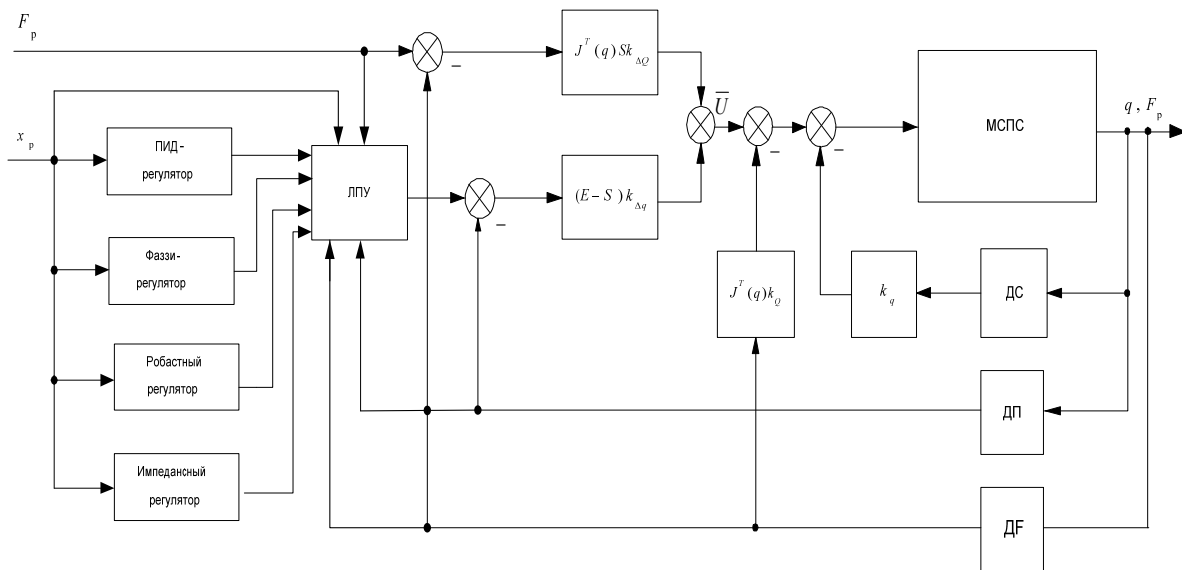


Рис. 3.5. Обобщенная структурная схема ЭП штанг МСПС

Для успешного применения комбинированного ПСУ как систем с переключением структуры [20, 24, 73], относящихся к системам связного регулирования, необходимо, кроме обеспечения устойчивости и качества, решить вопросы способа задания и согласования управляющих сигналов по положению и силе. Взаимосвязь уровня и знаков изменения управляющих сигналов положения S_0 и силы P_0 достигается представлением $A_{SF}(\varepsilon_s)$, $A_{FS}(F)$, $\Phi_S(S_0, F)$, $\Phi_F(F, \varepsilon_s)$ в виде

$$\begin{cases} A_{SF}(\varepsilon_s) = \text{sgn}(K_{SF}\varepsilon_s); \\ A_{FS}(F) = 0; \\ \Phi_S(S_0, F) = 1; \\ \Phi_F(F, \varepsilon_s) = F_0 A_{SF}(\varepsilon_s), \end{cases} \quad (3.1)$$

где K_{SF} – коэффициент усиления блока взаимосвязи каналов положения и силы.

Функциональная схема такой системы связного регулирования с мультипликативной перекрёстной связью в канале управления силой представлена на рис. 3.6 [77]. В структуре системы в блок взаимосвязи каналов $A_{SF}(\varepsilon_s)$ входят усилитель-ограничитель (V_0) и модуль выделения знака SGN ,

а функциональный регулятор канала силы $\Phi_F(F, \varepsilon_s)$ – блок умножения (БУ). В качестве сигналов задания используют сигнал S_0 требуемого перемещения и сигнал F_0 , определяющий требуемую силу. Знак сигнала задания F_0 , подаваемого на привод, совпадает со знаком ошибки привода по положению, что определяет однонаправленность прикладываемой силы и направления перемещения. При работе привода во время контакта штанги или выходного звена МСПС с объектом обеспечивается автоматическое изменение направления действия силы при изменении направления перемещения, но при переключении с канала силы на канал положения накопленный (за время управления по силе) сигнал ошибки по положению вызывает резкое перемещение выходного звена с объектом, что может вызвать соударение, нарушение ориентации и поломку МСПС.

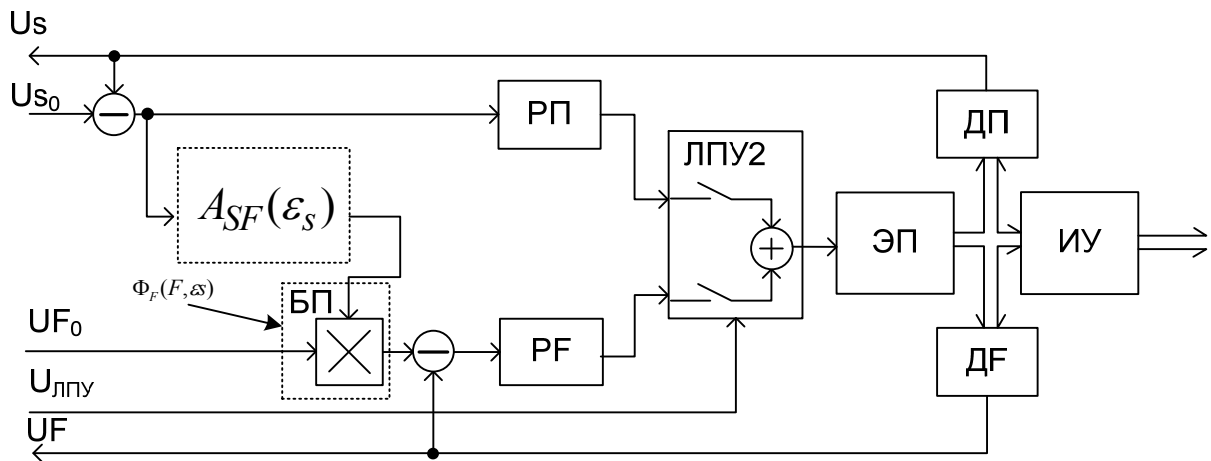


Рис. 3.6. Двухканальная система связанного позиционно-силового регулирования с мультипликативной перекрёстной связью¹

Характер изменения координат приведён на рис. 3.7 [77]. При линейном изменении сигнала задания по положению S_0 (кривая $S_0(t)$) и постоянной величине сигнала задания по силе F_0 (кривая $F_0(t)$) траектория движения схвата робота в свободной зоне также будет иметь линейный вид (кривая 2, участок $0 \dots t_1$).

Скорость перемещения S в установившемся состоянии равна скорости изменения сигнала задания, поскольку система астатическая. При контакте с объектом (момент t_1) перемещение прекращается и координатное положение штанги и выходного звена МСПС остаётся постоянным и равным

¹ А.с. 1290247 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления манипулятором / И.Н. Егоров, Р.С. Вишняков (СССР).

координате точки контакта с препятствием. Сигнал задания по положению S_0 , тем не менее, возрастает, увеличивается ошибка $\varepsilon_s = (S_0 - S)$. Одновременно с этим появляется сигнал с датчика силы ДФ, привод управления по положению переключается через коммутатор ЛПУ₂ на управление по силе (интервал $t_1 \dots t_2$) и формируется силовое воздействие на объект F (кривая $F(t)$), соответствующее сигналу задания F_0 . При этом сигнал позиционной ошибки ε_s не попадает на вход привода, так как ЛПУ₂ переключён на управление по силе. Если приводы МСПС работают по одному из алгоритмов, рассмотренных в гл. 2, то перемещение схвата робота по координатам X и Y приведет к тому, что в момент времени t_2 прекратится контакт робота с внешним объектом, сигнал с датчика силы ДФ станет равным нулю и ЛПУ₂ переключится на управление по положению для отработки накопившегося рассогласования ε_s (интервал времени $t_2 \dots t_3$). Ошибка, накопленная в канале положения, вызывает перемещение с большим ускорением и скоростью (больше требуемых), что может привести к недопустимым ударным явлениям.

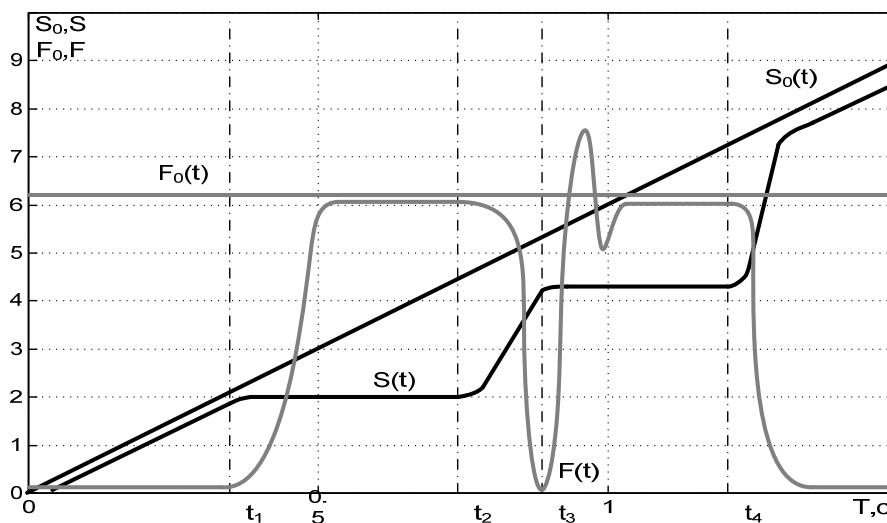


Рис. 3.7. Характер изменения координат в двухканальной системе с мультипликативной перекрёстной связью

Возможности систем управления ЭП МСПС могут быть существенно расширены применением параметрических силовых обратных связей (рис. 3.8). На рис. 3.8 использованы следующие обозначения: УУ – устройство управления; ЛБ – логический блок; КЗ – корректирующее звено; ДС – датчик силы; ИМ – исполнительный механизм; ДМ – датчик момента; ДП – датчик положения; M_n – моменты нагрузки; КЭ – ключевой элемент;

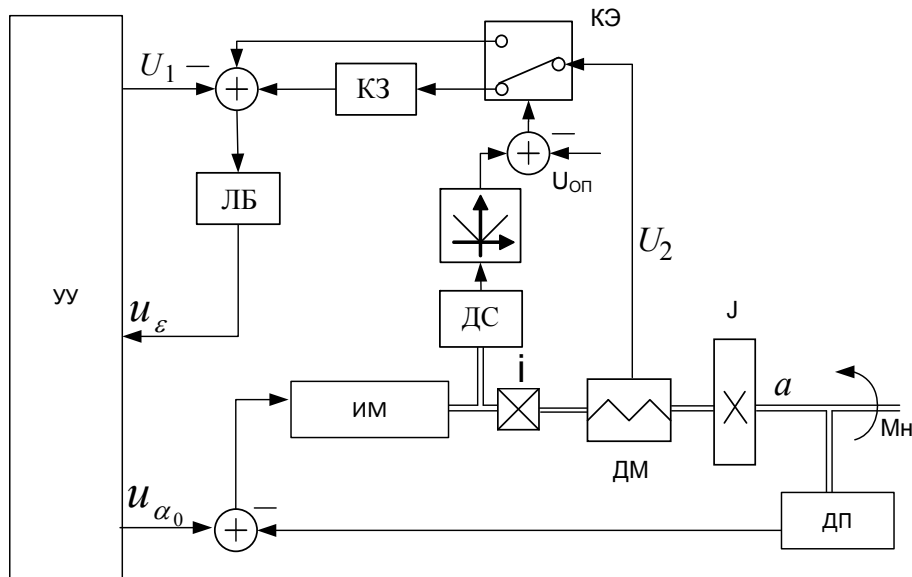


Рис. 3.8. Система управления ЭП с применением параметрических силовых обратных связей: U_1 , u_{α_0} – сигналы задания по моменту, перемещению; u_{ϵ} – сигнал моментной ошибки; U_2 – сигнал обратной связи по моменту КЭ – ключевой элемент $U_{оп}$ – опорный сигнал, определяющий $\dot{\alpha}_{min}$

В этом случае сигнал моментной ошибки U_{ϵ} формируется логическим блоком (ЛБ) и определяется, например, следующими функциями [21]:

$$U_{\epsilon} = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall |U_1| \leq v > |U_2| \\ 0 \forall |\dot{\alpha}_0| = c \end{cases} \quad (3.2)$$

$$U_{\epsilon} = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall \dot{\alpha}_0 \leq \dot{\alpha}_{min}; \\ U_1 \forall \dot{\alpha}_0 > \dot{\alpha}_{min}; \end{cases} \quad (3.3)$$

$$U_{\epsilon} = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall U_1 U_2 < 0 \wedge \dot{\alpha}_0 \leq v > \dot{\alpha} \vee U_1 U_2 > 0 \wedge \dot{\alpha}_0 \leq \dot{\alpha}_{min}; \\ U_1 \forall U_1 U_2 > 0 \wedge \dot{\alpha}_0 > \dot{\alpha}_{min}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $\dot{\alpha}_0$ – сигнал задания по скорости.

Минимальное значение скорости перемещения α_{min} устанавливается УУ. При реализации управляющим устройством логической функции (3.3) обратная силовая связь содержит как сопутствующие, так и противодействующие моменты: если скорость движения меньше или равна некоторому минимальному значению α_{min} . При перемещении ЗУ со скоростями, превышающими α_{min} , обратная связь не содержит информацию о моментах.

Если реализуется функция (3.3), то обратная связь содержит информацию о противодействующих моментах только при малых скоростях и выполняет опускание выходного звена без силовой обратной связи при больших скоростях. При соприкосновении выходного звена МСПС с упругим односторонним упором [18, 67] в системе могут возникнуть колебательные движения, которые устраняют уменьшением скорости движения или добротности системы. Применением в приводе (см. рис. 3.8) параметрического отражения моментов удастся обеспечить достаточную точность отражения при удовлетворительном качестве управления положением ИУ в случае его соприкосновения с объектом манипулирования или препятствием. При малой скорости перемещения ИУ ($\dot{\alpha}_0 < \alpha_{\min}$) сигнал с ДМ поступает непосредственно УУ. Если скорость ИУ превышает заданное минимальное значение $\dot{\alpha}_{\min}$, определяемое значением опорного напряжения $U_{оп}$, то ключевой элемент включает в канал управления корректирующее звено (КЗ), в качестве которого может применяться инерционное динамическое звено. Если потребуется изменить масштаб силовой обратной связи, то КЗ реализуется в виде пропорционального звена с переменным коэффициентом передачи n .

Проблема повышения быстродействия двухканальной системы при контактном взаимодействии может быть решена применением логического функционального регулятора силы $\Phi_F(F, \varepsilon_s)$ следующего вида:

$$\Phi_F(F, \varepsilon_s) = \begin{cases} K_{F1} \forall (K_{F2} \cdot F_0 - \varepsilon_s) > 0; \\ 1 \forall (K_{F2} \cdot F_0 - \varepsilon_s) \leq 0. \end{cases} \quad (3.5)$$

В этом случае структура системы будет выглядеть так, как это показано на рис. 3.9 [77].

Переходные процессы в системе при переключении структур показаны на рис. 3.10.

Переход в режим отработки сигнала задания F_0 происходит в момент времени t_1 . Коэффициент усиления усилителя U_I выбирается равным $(1 + \sigma) - 1$, где σ – величина перерегулирования привода в режиме регулирования силы.

На интервале $(t_1 \dots t_2)$ заданное значение силы соответствует $F_{02} = F_{01} - mF_{02}$, в момент времени t_2 текущее значение силы равно $F_{10} = F_0$, и ЛПУ_F соединит задатчик силы с сумматором на входе РС. На участке $(t_2 \dots t_3)$ сила $F = F_0$, а $S = 0$ (кривая 1). Если бы в момент времени t_2 ЛПУ₁ не переключился, то переходные процессы соответствовали бы кривой 2.

ским управлением $\Phi_s(S_0, F)$. В этом случае регуляторы $A_{SF}(\varepsilon_s)$, $A_{FS}(F)$, $\Phi_s(S_0, F)$, $\Phi_F(F, \varepsilon_s)$ примут вид:

$$\begin{cases} A_{SF}(\varepsilon_s) = \text{sgn}(K_{SF} \cdot \varepsilon_s); \\ A_{FS}(F) = \text{sgn}(K_{FS} \cdot F); \\ \Phi_s(S_0, F) = \begin{cases} K_S \cdot \int_0^\tau (S_0 - S'_0) \cdot dt \quad \forall A_{FS}(A) = 0 \wedge S_0 < S'_0; \\ S'_0 \quad \forall A_{FS}(F) = 1 \wedge S_0 = S'_0 \end{cases}; \\ \Phi_F(F, \varepsilon_s) = F_0 \cdot A_{SF}(\varepsilon_s), \end{cases} \quad (3.6)$$

где K_S , K_{SP} , K_{PS} – коэффициенты усиления соответствующих регуляторов; S'_0 – координата точки касания.

Структура системы, реализованной по данной схеме, представлена на рис. 3.11 [77]. Привод работает следующим образом: при движении в свободной зоне сигнал с датчика силы ДФ отсутствует, ЛПУ₂ коммутирует систему в режим замыкания по положению, а сигнал ошибки рассогласования по положению через ЛПУ_S, интегратор и сумматор приводит в движение исполнительный орган. При касании внешнего объекта сигнал с ДФ переключает ЛПУ_S и ЛПУ₂, сигнал позиционного задания S_0 фиксируется на уровне S'_0 , соответствующем координате точки касания.

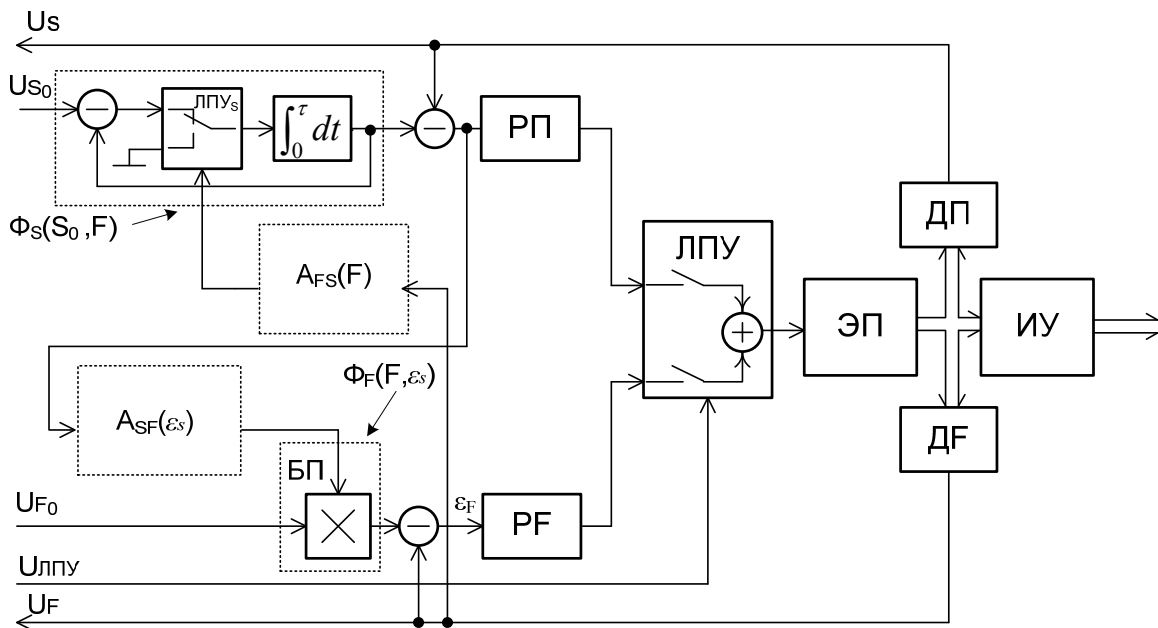


Рис. 3.11. Двухканальная система связного позиционно-силового управления с нелинейным функциональным регулятором положения с логическим управлением¹

¹ А.с. 1315297 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / В.Н. Кравченко, И.Н. Егоров (СССР).

При отработке управляющих алгоритмов приводами других штанг МСПС в какой-то момент времени сигнал с ДФ становится равным нулю, ЛПУ₂ переключается на управление положением, но сигнал задания, коммутируемый ЛПУ₃, начинает увеличиваться с уровня \dot{S}_0 , что обеспечивает плавность перемещения при переходе от контакта с объектом к работе в свободной зоне. Достижение сигнала \dot{S}_0 величины сигнала задания по положению S_0 обеспечивается наличием единичной отрицательной обратной связи, охватывающей интегратор.

Управление движением МСПС осуществляется как при действии, так и отсутствии действия внешних связей и сил, поэтому проблему оптимизации структуры системы управления целесообразно решать для обоих случаев. Поставленная задача достигается, в частности, введением логически управляемых нелинейных функциональных регуляторов положения и силы с перекрёстными связями (см. рис. 4.34 [77]), характеристика которых может выбираться системой управления МСПС в зависимости от выполняемого в текущий момент алгоритма управления. Переключение структур, выбор типа и вида регуляторов и их коэффициентов передачи в контурах положения и силы, формирование сигналов управления и другие функции осуществляются программным путём на уровне программно-алгоритмического обеспечения управляющей микроЭВМ исполнительного электропривода.

§ 3.2. Анализ динамики электроприводов мехатронных систем в режиме позиционного управления

Управление движением подвижной платформы в свободной зоне выполняется поэтапно: сначала осуществляется управление перемещением с помощью быстродействующих скоростных алгоритмов с малой точностью, затем реализуется более медленное позиционное управление точным перемещением.

Общий подход к анализу и синтезу линеаризованных ЭП заключается в составлении характеристического уравнения многомерного ЭП и осуществления прямого корневого метода синтеза, называемого модальным методом синтеза по заданному качеству процесса управления.

Распространенный метод улучшения работы ЭП МСПС – применение системы подчиненного регулирования с ПИ- или ПИД-регуляторами в контурах системы [30]. Широкое распространение получил автоматизированный синтез многомерных систем с помощью модальных регуляторов, частотных методов и алгоритмов управления на основе концепций обратных задач динамики.

К исполнительным ЭП МСПС предъявляются высокие требования по точности отработки задающего воздействия, монотонности переходного

процесса, отсутствию автоколебательных режимов и стабилизации статического положения равновесия выходного звена.

Исходная математическая модель исполнительных ЭП с самотормозящей механической передачей (СМП) рассматривалась в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha}(t) &= W_1(p) [U_{\text{ex}}(t) - K_3 \alpha_1'(t)]; \\ p M_1(t) &= T_s \{-M_1(t) + K_1 [U_{\alpha}(t) - K_2 p \alpha_1(t)]\}; \\ p^2 \alpha_1(t) &= J_1 [M_1(t) - \chi M_2(t)]; \\ p \alpha_1(t) &= \Omega_1(t); \\ M_2(t) &= (c + bp) [\alpha_1'(t) - \alpha_H(t)]; \\ p^2 \alpha_H(t) &= J_H^{-1} [M_2(t) - M_H(t) - M_{Tp}(p \alpha_H, M_2)]; \\ p \alpha_H(t) &= \Omega_H, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где $W_1(p) = (\frac{K_i}{s} + K_d s + K_p)$ – передаточная функция ПИД-регулятора; M_{Tp} – логико-математическое описание характеристики момента сухого трения; χ – динамическое передаточное отношение СМП.

Параметры K_p , K_i и K_d ПИД-контроллера оптимизированы для заданной траектории и максимального усиления с помощью блока (Signal Constraint) среды (Simulink Response) Optimization. После оптимизации были найдены следующие параметры ПИД-контроллера: $K_d = 6,4118 \text{e} + 003$, $K_i = 1,8593 \text{e} + 004$, $K_p = 6,3438 \text{e} + 004$.

Логико-математическое описание однозначной характеристики момента трения M_{Tp} представим в виде кусочно-линейной функции скорости и прикладываемого момента M_2 :

$$M_{Tp} = \begin{cases} |M_{Tp0}| + F_T |\Omega_H| \text{sgn} \Omega_H \vee 0 < |\Omega_H| < \Omega_T; \\ |M_{Tp1}| \text{sgn} \Omega_H \vee |\Omega_H| \geq \Omega_T; \\ M_2 [-M_{Tp0}, +M_{Tp0}] \equiv \Omega_H = 0 \wedge |M_2| < M_{Tp1}; \\ |M_{Tp0}| \text{sgn} M_2 \equiv \Omega_H = 0 \wedge |M_2| \geq M_{Tp1}, \end{cases}$$

где F_T – коэффициент наклона касательной к участку характеристики трения с отрицательной производной $dM_{Tp}/d\Omega_H$; Ω_T – скорость, соответствующая точке излома кусочно-линейной характеристики трения; M_{Tp0} , M_{Tp1} – моменты сопротивления, определяемые трением покоя и движения. Величины F_T , M_{Tp0} , M_{Tp1} принимаем постоянными.

При глобальных перемещениях характеристика момента сухого трения определяется равенством $M_{Tp} = |M_{Tp0}| \text{sgn} \Omega_H \vee \Omega_H \neq 0$.

Математическая модель СМП впервые была получена в работах профессора В.Л. Вейца. В работах [18, 67] СМП представлена в виде динамического звена Ψ , как звена с переменной структурой. В дальнейшем будем считать, что динамическое передаточное отношение СМП при глобальных перемещениях ($\Omega > \Omega_T$) определяется выражением

$$\chi = \begin{cases} (\eta U)^{-1} \equiv M_1 M_2 < 0; \\ -|\mu| U^{-1} \equiv M_1 M_2 > 0; \\ 0 \equiv M_1 M_2, \end{cases}$$

а при установочных перемещениях в особых положениях оно является функцией соотношения между направлениями вращения вала двигателя и передачи силового потока, характеризующегося знаком момента в зацеплении M_2 :

$$\chi = \begin{cases} (\eta U)^{-1} \equiv \text{sgn } \Omega_1 M_2 < 0; \\ -|\mu| U^{-1} \equiv \text{sgn } \Omega_1 M_2 > 0; \\ 0 \equiv \Omega_1 M_2 = 0. \end{cases}$$

В дальнейшем при исследовании ЭП с СМП полагается, что условия отсутствия динамического заклинивания как с абсолютно жесткими звеньями, так и в случае конечной жесткости звеньев передачи выполнены.

Анализ переходных процессов по всем координатам вектора состояния системы проводится численными методами согласно исходному уравнению. Псевдолинейные корректирующие устройства позволяют формировать амплитудные и фазовые характеристики независимо друг от друга и получать высокие динамические характеристики ЭП. В работе [67] показано, что самотормозящиеся (необратимые) механические передачи, широко применяющиеся в ИУ роботов, при линейном управлении двигателем и отсутствии внешних воздействий также относятся к псевдолинейным корректирующим устройствам.

Определение перемещений кинематических звеньев-штанг, обеспечивающих требуемые положения и ориентации платформы, осуществляется на основе решения задачи обратной кинематики.

Положение и ориентация подвижной платформы (рис. 3.12) определяются перемещениями (x, y, z) вдоль осей X, Y, Z с началом в точке O_b и углами поворота (α, β, γ) вокруг этих осей. Каждое кинематическое звено (штанга) определяется вектором \vec{S}_i – от точки B_i , расположенной на базе, к точке P_i на подвижной платформе с началом координат в точке O_p :

$$\vec{S}_i = R \vec{p}_i^p + \vec{l} - \vec{b}_i^b, \quad (3.8)$$

где $i=1,2, \dots, 6$; $l = [x, y, z]^T$; \vec{p}_i^p и \vec{b}_i^b – векторы положения опор платформы и базы относительно своих систем координат; R – матрица ортогонального преобразования из системы координат платформы в систему координат базы:

$$R = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ S\alpha C\beta & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $\left\{ \begin{array}{l} S\alpha = \sin \alpha, C\alpha = \cos \alpha \\ S\beta = \sin \beta, C\beta = \cos \beta \\ S\gamma = \sin \gamma, C\gamma = \cos \gamma \end{array} \right.$

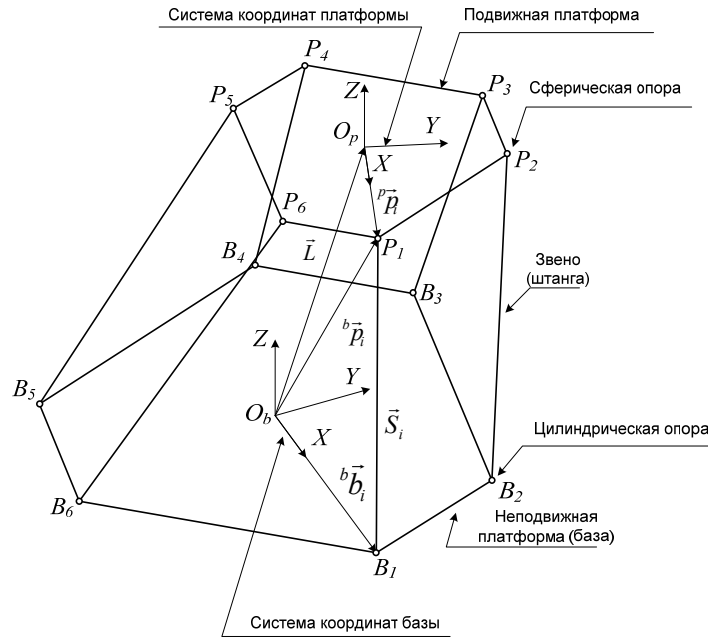


Рис. 3.12. Расчетная кинематическая схема МСПС

Из расчетной схемы базы и подвижной платформы (рис. 3.13) определим векторы \vec{p}_i^p и \vec{b}_i^b :

$$\vec{p}_i^p = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})^T = [r_p \cos \lambda_i \quad r_p \sin \lambda_i \quad 0]^T; \quad (3.10)$$

$$\vec{b}_i^b = (b_{xi}, b_{yi}, b_{zi})^T = [r_B \cos \delta_i \quad r_B \sin \delta_i \quad 0]^T, \quad (3.11)$$

где $\lambda_i = \frac{\pi}{3}i - \frac{\theta_p}{2}; \quad \delta_i = \frac{\pi}{3}i - \frac{\theta_B}{2}, \quad i=1, 3, 5$

$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_p; \quad \delta_i = \lambda_{i-1} + \theta_B, \quad i=2, 4, 6.$

Здесь λ_i, δ_i – углы между (OP_i, OB_i) и осью X; θ_p, θ_B – углы между первыми двумя опорами платформы и базы; r_p, r_B – радиусы платформы и базы.

Длину вектора \vec{S}_i можно найти по следующей формуле:

$$s_i = \|\vec{S}_i\| = \sqrt{S_{xi}^2 + S_{yi}^2 + S_{zi}^2}, \quad i=1, 2, \dots, 6. \quad (3.12)$$

В соответствии с выражениями (3.7) – (3.12) построена структурная схема вычислений длины шести штанг (S_i) и соответствующих перемещений выходных координат электроприводов по заданным параметрам положения и ориентации ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) подвижной платформы. Основные ограничения на перемещения выходного звена подобной мехатронной системы с жесткими приводными звеньями обусловлены ограниченностью длин кинематических звеньев-штанг, ходов приводов и условиями отсутствия особых положений.

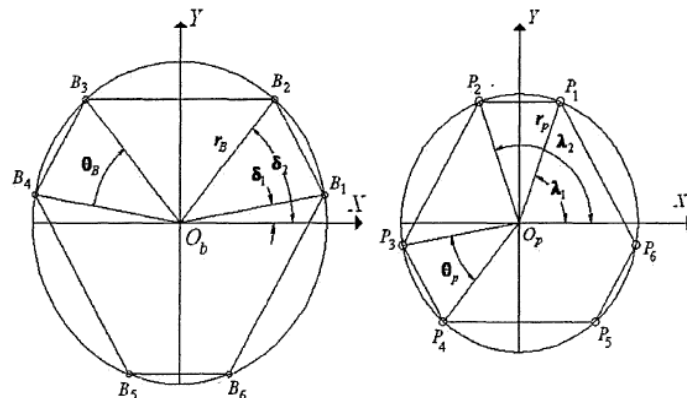


Рис. 3.13. Расчетная схема базы и подвижной платформы в плоскости XOY

Входными сигналами шести ЭП будут шесть выходов блока Inverse Kinematics (рис. 3.14).

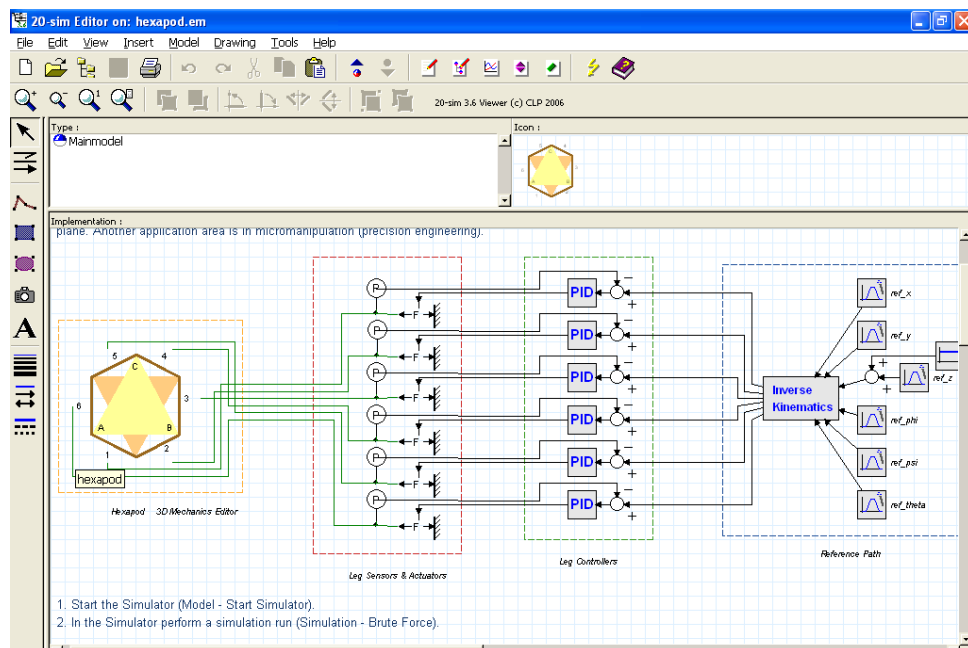


Рис. 3.14. Структурная схема решения обратной задачи кинематики МСПС

Исследование шестимерной системы автономных приводов МСПС проводилось с помощью SimMechanics-модели платформы Стюарта и подсистемы штанги, представленной на рис. 3.15.

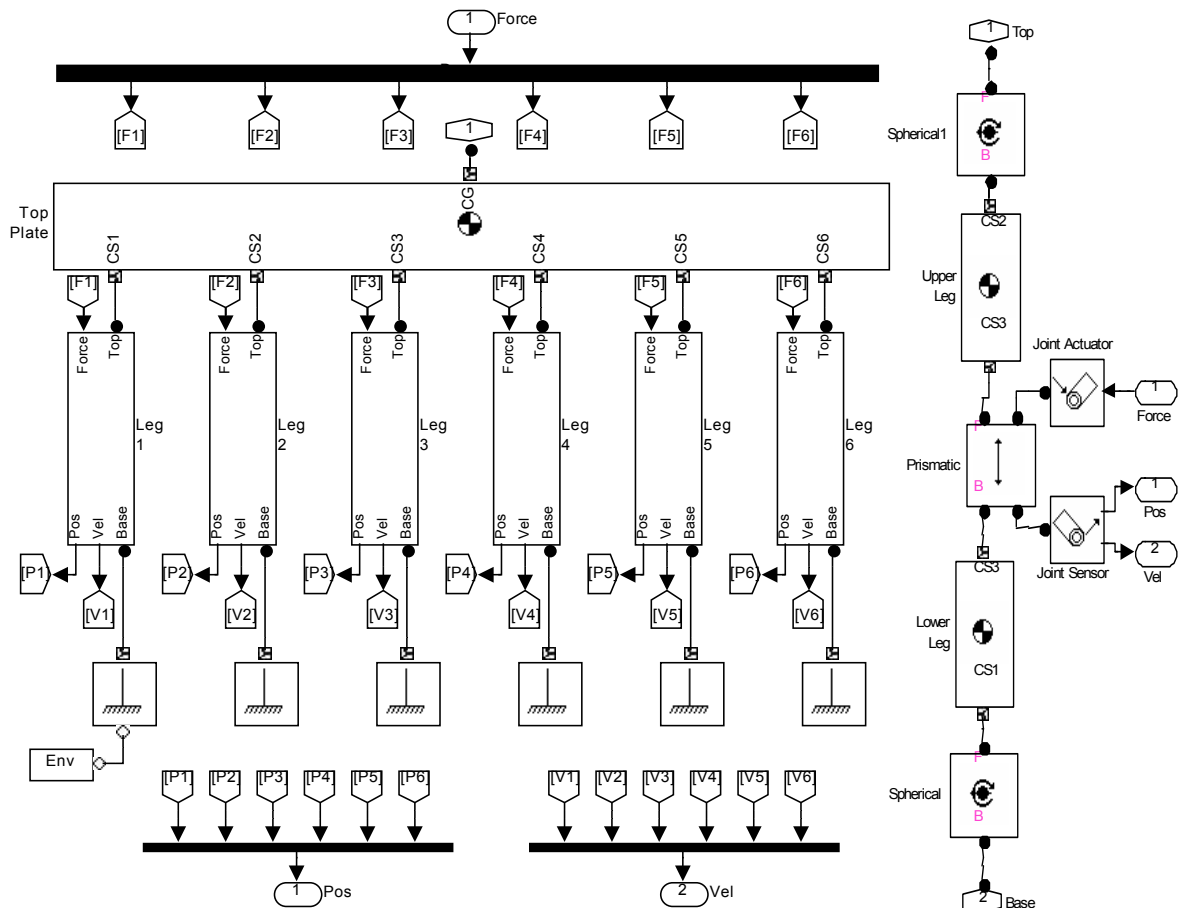


Рис. 3.15. SimMechanics-модель платформы Стюарта и подсистемы штанги

Для модели платформы входными переменными будут шесть сил (Force), развиваемых ЭП штанг, а выходными – величины перемещений и скорости перемещений штанг.

Для моделирования движения штанги используют блок Joint Actuator, на вход которого подается сформированный управляющий сигнал от регулятора. При помощи блока Joint Sensor измеряется скорость и положение штанги. Все шесть штанг воздействуют на подвижную платформу – блок Top Plate. Таким образом, мы получили модель параллельного манипулятора, которая оформляется в виде отдельной SimMechanics-модели. Окно

визуализации SimMechanics дает возможность видеть движение платформы при различных законах управления ЭП.

Simulink-модель системы управления платформой Стюарта при использовании SimMechanics-модели шестимерного манипулятора параллельной структуры показана на рис. 3.16.

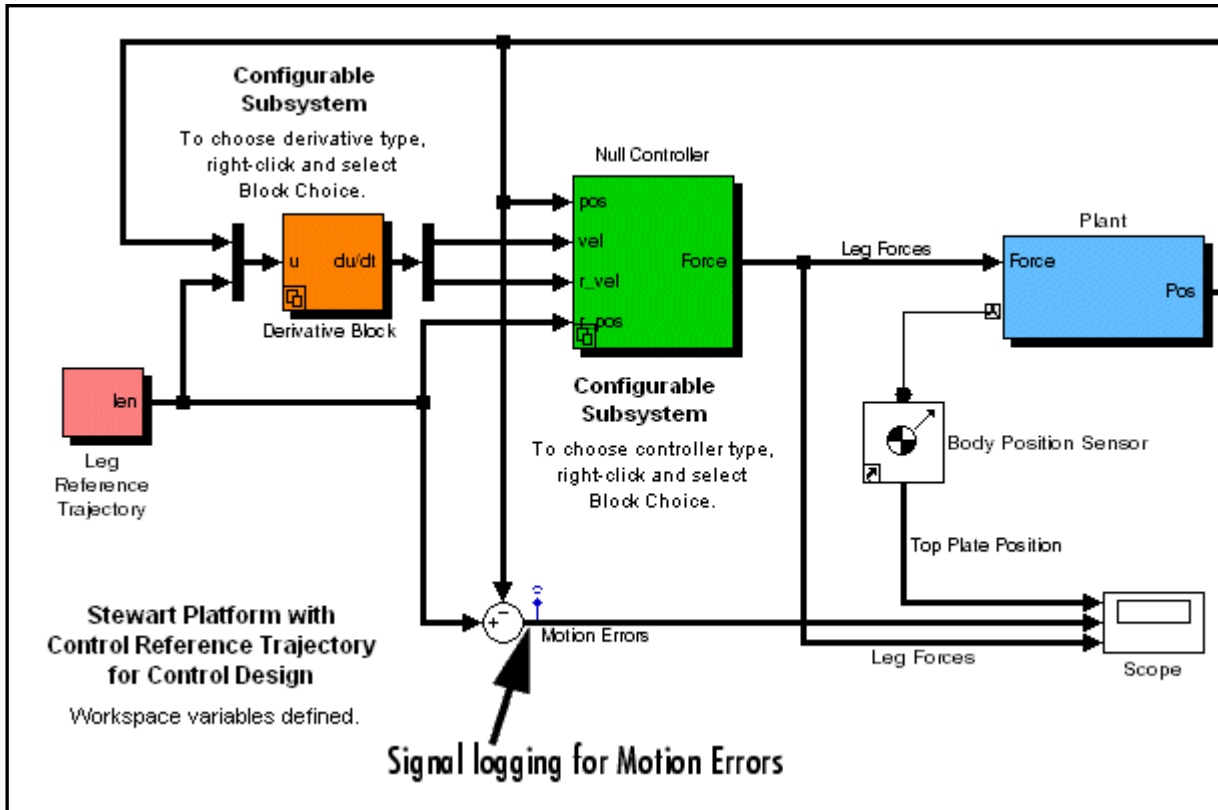


Рис. 3.16. Simulink-модель системы управления шестимерной SimMechanics-моделью платформы Стюарта

Модель ПИД-регулятора представлена на рис. 3.17.

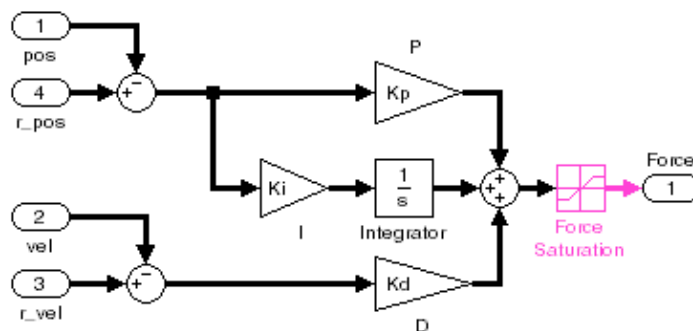


Рис. 3.17. Simulink-модель ПИД-контроллера

Было проведено моделирование движения подвижной платформы и рассчитаны переходные процессы в шести ЭП с ПИД-регуляторами (рис. 3.18) в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 3.19, были определены изменения нагрузок на выходные звенья ЭД при заданных конечных значениях координат положения центра массы платформы.

Если система разомкнута, то величина перемещений вдоль осей X , Y , Z и силы (рис. 3.20) непрерывно увеличивается, что приводит к разрыву штанг (рис. 3.21).

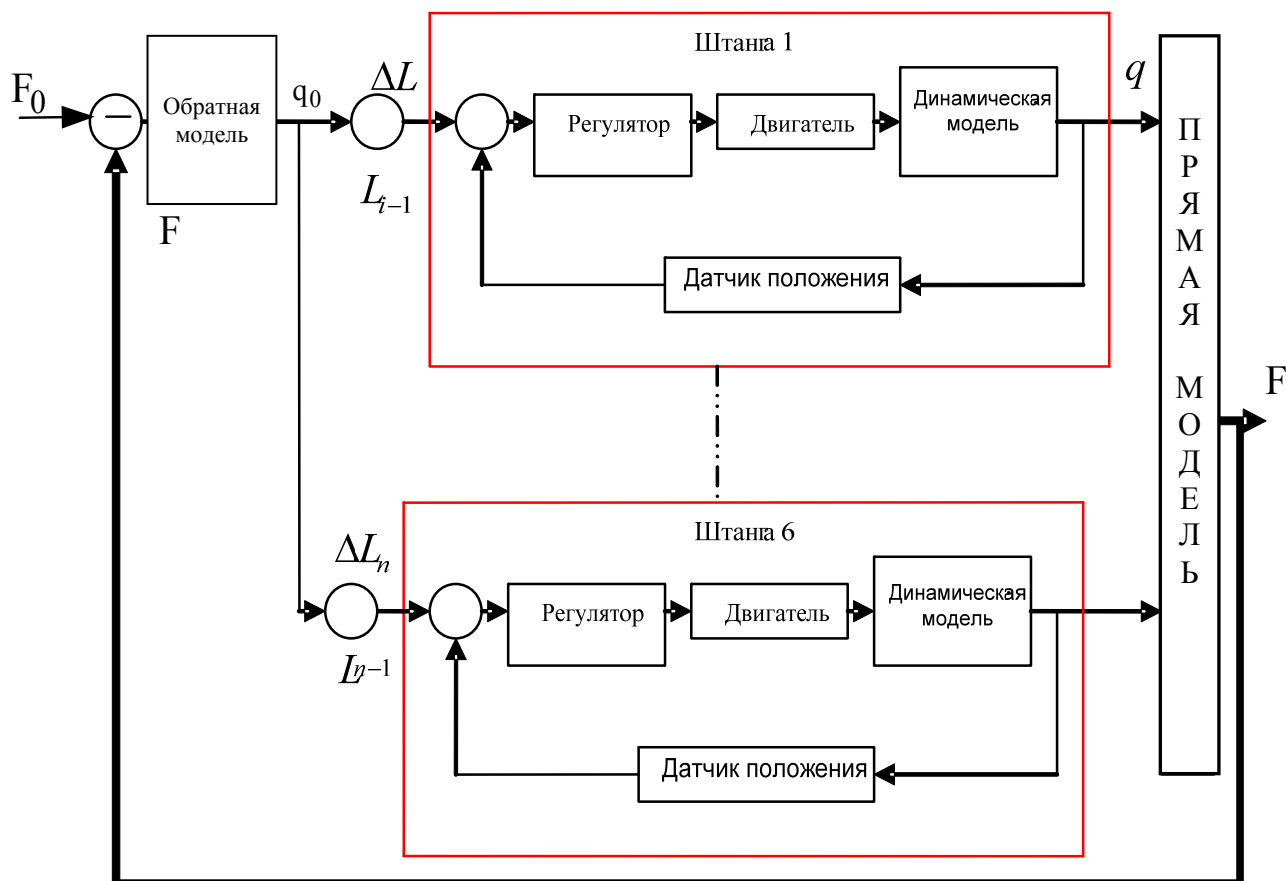


Рис. 3.18. Структурная схема шестимерной системы приводов МСПС

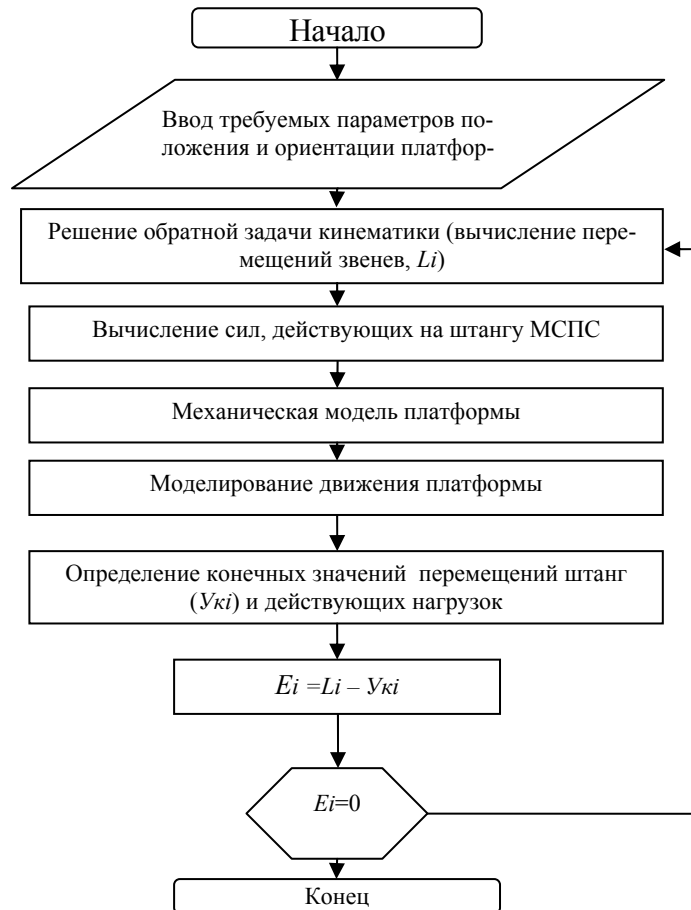


Рис. 3.19. Блок-схема алгоритма моделирования движения платформы с шестью степенями подвижности

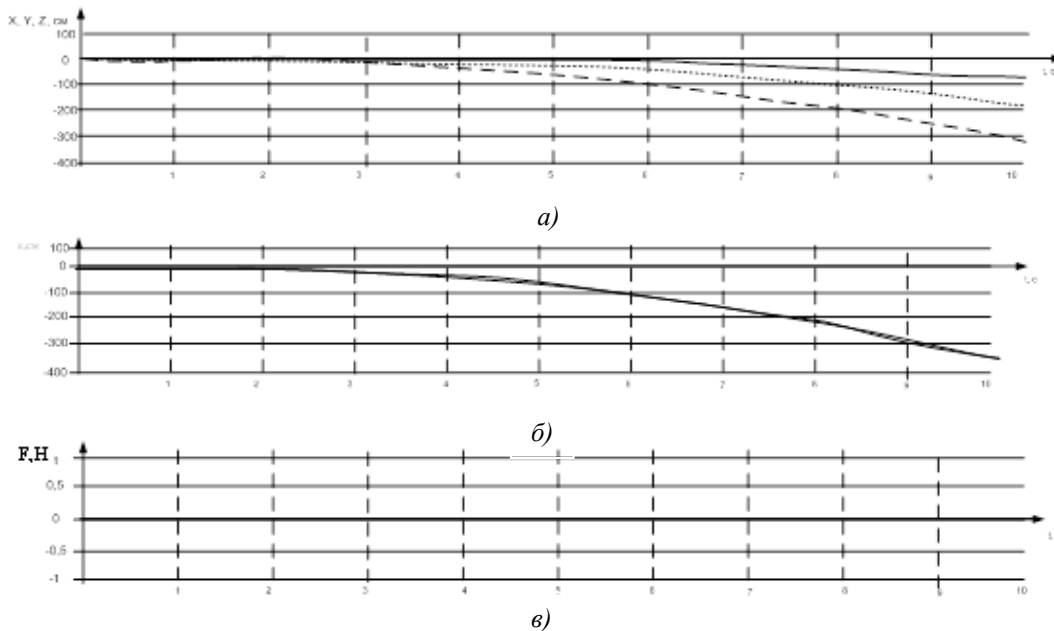


Рис. 3.20. Результаты моделирования разомкнутой системы управления ЭП штанг платформы Стюарта: а – перемещение сил вдоль осей (—), Y (---), Z (.....); б – величина ошибки перемещения; в – величина силы

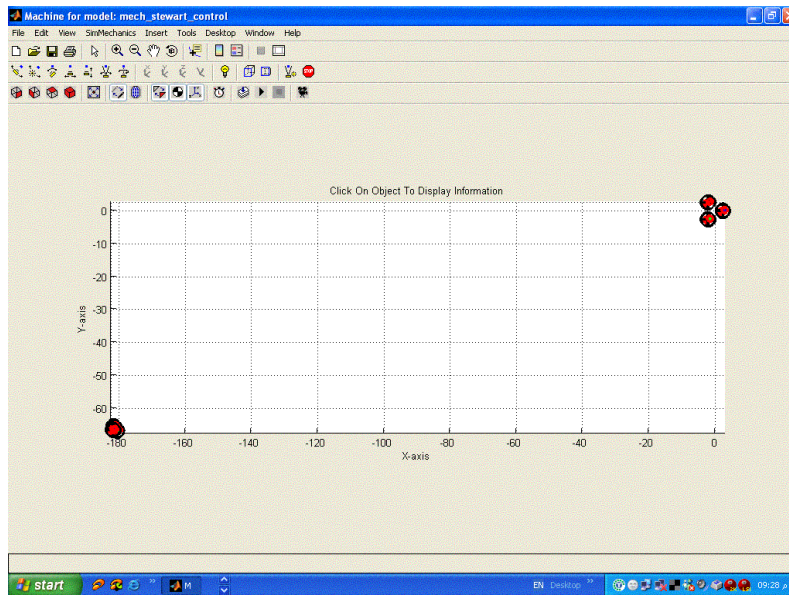


Рис. 3.21. SimMechanics окно визуализации модели платформы Stewart с разомкнутой системой управления

Если $K_i = 10000$, $K_p = 2000000$, $K_d = 45000$, $x = 0,15$ м, $y = 0,15$ м, $z = 0,20$ м, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, то осциллограммы изменения перемещений, ошибок положения и сил показаны на рис. 3.22.

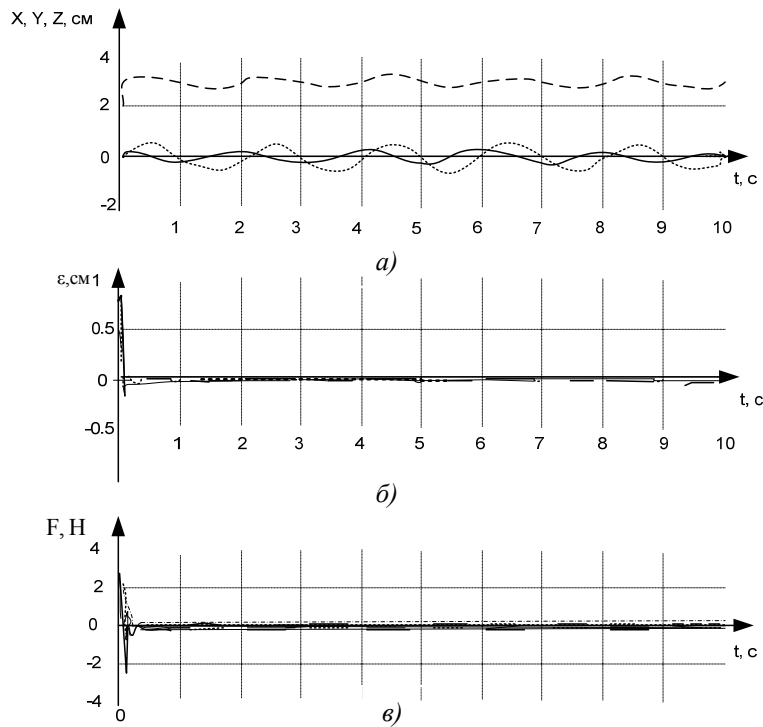


Рис. 3.22. Окно визуализации возможностей движения платформы Стюарта и силы с ПИД-контроллером: а перемещение, сил вдоль осей X (—), Y (---), Z (.....); б – величина ошибки перемещения; в – величина силы

На рис. 3.23 показаны перемещения выходной платформы от начального горизонтального положения $h = 2$ м до $h = 3$ м, затем до $h = 3,5$ м.

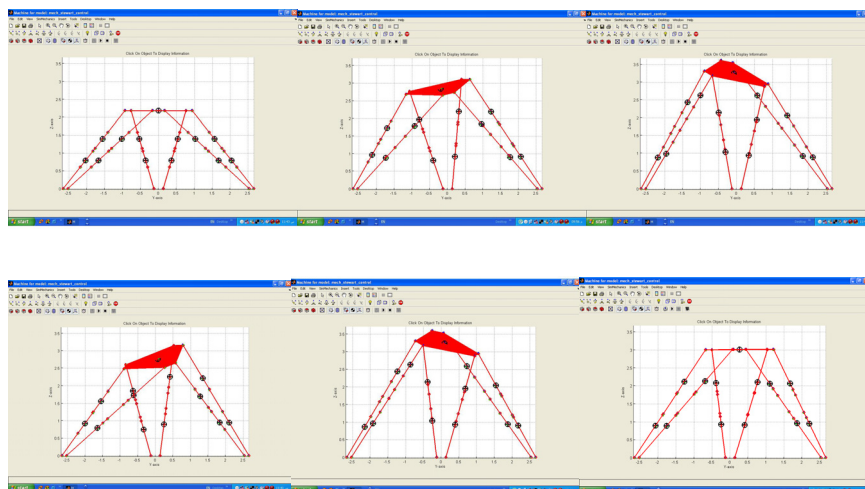


Рис. 3.23. SimMechanics окно визуализации движения платформы Стюарта с ПИД-контроллером

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что ПИД-регуляторы обеспечивают робастное в отношении действия нагрузок на выходные звенья ЭП управление платформой. Расхождение между требуемыми значениями перемещений штанг МСПС, полученными в результате решения обратной задачи кинематики, и конечными значениями перемещений в переходных процессах не выходят за пределы 2×10^{-4} м (таблица).

Перемещения штанг ЭП и конечные значения нагрузок (при $x = 0,15$ м, $y = 0,15$ м, $z = 0,20$ м, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 5^\circ$)

№ ЭПУ	Требуемый ход штанги по обратной задаче кинематики, м	Конечное значение перемещения штанги, м	Конечное значение нагрузки на штангу, Н	Ошибки
1	0,3717111	0,3717121	$0,9 \cdot 10^4$	0,000001
2	0,3218266	0,3218265	$1,82 \cdot 10^4$	0,0000001
3	0,1620921	0,1620991	$3,55 \cdot 10^4$	0,000007
4	0,0428132	0,0428131	$3,99 \cdot 10^4$	0,0000001
5	0,0115654	0,0115641	$1,32 \cdot 10^4$	0,0000013
6	0,0781922	0,0781922	$0,9 \cdot 10^4$	0

Результаты моделирования свободного движения шестимерной МСПС с автономными приводами в пределах рабочего пространства пока-

зали удовлетворительный характер переходных процессов длительностью не более 0,3 с как автономных приводов, так и выходного звена при различных входных воздействиях, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качеству приводов штанги.

§ 3.3. Анализ динамики и синтез двухканальных приводов с независимым позиционно-силовым управлением

Двухканальные приводы в режиме переключения структуры

Исследование периодических колебаний ЭП с независимым ПСУ проводят с целью анализа влияния переключения структуры (ЛПУ) на условия возникновения автоколебаний и устойчивость привода.

Дифференциальные уравнения ЭП при работе на упор [58] и переключением структуры по сигналу с датчика моментов представим в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} pM_1 = [(U_z - k_4 \Omega_1) K_7 M_1] T_9^{-1}; \\ p\Omega_1 = (M_1 - M_2 (\eta U)^{-1}) J_1^{-1}; \\ p\alpha_1 = \Omega_1; p\alpha_2 = \Omega_2; \\ pb_1 = M_2 (\alpha_1 - \alpha_2)^{-1} - C_1; \\ p\Omega_2 = (M_2 - M_3) J_2^{-1}; \\ pU_x = (Y - K_5 \Omega_1) (Tp + 1) K_3; \\ F(\alpha) = \begin{cases} 0 \forall (\alpha_c - \alpha_2) \geq 0; \\ (\alpha_c - \alpha_2) \forall (\alpha_c - \alpha_2) < 0; \end{cases} \\ Y = \begin{cases} (U\alpha_0 - K_6 \alpha_1) K_1 \forall M_3 = 0 \wedge (U\alpha_0 - K_6 \alpha_1) \geq 0; \\ \vee M_3 \geq 0 \wedge (U\alpha_0 - K_6 \alpha_1) < 0; \\ (U_{M_0} - K_{DM} M_3) K_2 \forall M_3 > 0 \wedge (U\alpha_0 - K_6 \alpha_1) > 0. \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (3.13), представлена на рис. 3.24, где $W_{PI} = K_1; W_{PM} = K_2; W_{PC} = K_3(1+Tp)p^{-1}; W_1 = K_7(1+T_9p)^{-1}; W_2 = (J_1p)^{-1}; W_3 = (Up)^{-1}; W_4 = c_1 + b_1p; W_5 = (J_2p^2)^{-1}; W_6 = (c_2 + b_2p)$.

Для исследования периодических колебаний ЭП в режиме переключения структуры исходная структурная схема привода выглядит так, как по-

казано на рис. 3.25, где через ЛЧ и ЭНЭ обозначены линейная и эквивалентная нелинейная часть привода:

$$\begin{cases} M(p) = \frac{k_3 k_7 U (c_1 + b_1 p) (T_3 p + 1)}{U^2 J_2 p^4 (k_7 k_4 + J_1 p (T_3 p + 1)) + k_3 J_2 p^3 U^2 k_7 (T_3 p + 1) + J_2 (T_3 p + 1) (c_1 + b_1 p) p^3}, \\ V(p) = \frac{k_6 (J_2 p^2 + c_1 + b_1 p) (J_2 p^2 + c_2 + b_2 p)}{c_1 + b_1 p}. \end{cases}$$

Эквивалентный нелинейный элемент (ЭНЭ) содержит два нелинейных элемента: НЭ₁ – нелинейность типа "односторонняя реакция упругого звена" и НЭ₂ – ЛПУ, соединенные между собой линейными звеньями.

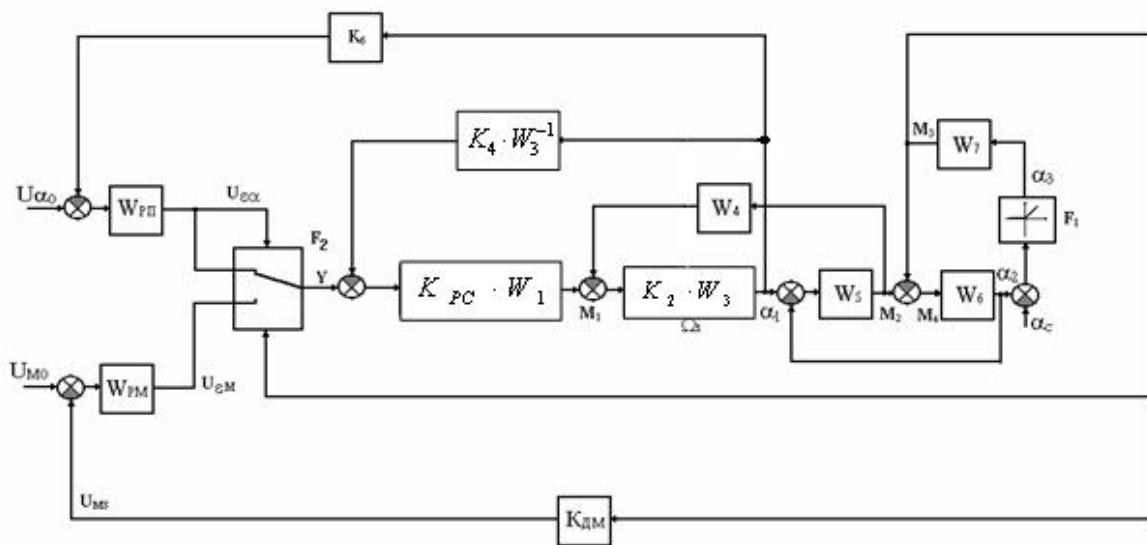


Рис. 3.24. Структурная схема привода с переменной структурой

ЛПУ переключает структуру с управления по положению на управление по комбинации сигналов $U\varepsilon_\alpha$ и M_3 :

$$Y = \begin{cases} U\varepsilon_\alpha(t), & \forall M_3 = 0 \wedge U\varepsilon_\alpha \geq 0, \vee M_3 \geq 0 \wedge U\varepsilon_\alpha < 0; \\ U\varepsilon_\alpha(t), & \forall M_3 > 0 \wedge U\varepsilon_\alpha < 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

Работу блока переключения структуры ЛПУ можно условно разделить на два режима: переключение структуры с позиционной на моментную по сигналу $M_3(t)$, и переключения структуры с моментной на позиционную по сигналу $U\varepsilon_\alpha(t)$, определяющему ошибку по положению. Вторым режим соответствует работе при постоянном контакте рабочего органа с поверхностью объекта работ, т.е. в линейной зоне нелинейности F_1 . Работу блока в этих режимах можно описать следующими выражениями:

Первый режим:

$$Y = \begin{cases} U\varepsilon_\alpha(t), \forall M_3 = 0 \wedge U\varepsilon_\alpha \geq 0; \\ U\varepsilon_M(t), \forall M_3 > 0 \wedge U\varepsilon_\alpha > 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

Второй режим:

$$Y = \begin{cases} U\varepsilon_\alpha(t) \forall M_3 \geq 0 \wedge U\varepsilon_\alpha \leq 0; \\ U\varepsilon_M(t) \forall M_3 > 0 \wedge U\varepsilon_\alpha > 0. \end{cases} \quad (3.16)$$

Рассмотрим первый случай. Блок переключения структуры ЛПУ представим в виде двух параллельно включенных коммутирующих элементов (КЭ) А и В, которые действуют следующим образом: если имеется контакт РО с ОР, то замкнут КЭ А, а если контакта нет ($M_3 = 0$), то замкнут КЭ В.

Полагаем, что $U_{\alpha 0} = 0$, $U_{M_0} = 0$, и определим характеристики ЛПУ элементов на границе свободной зоны:

$$A) Y = \begin{cases} 0, \forall M_3 = 0 \wedge U\varepsilon_\alpha \geq 0; \\ kx, \forall M_3 > 0 \wedge U\varepsilon_\alpha > 0; \\ x = U\varepsilon_M(t), \quad k = \operatorname{tg}\alpha = 1. \end{cases} \quad B) Y = \begin{cases} 0, \forall M_3 > 0 \wedge U\varepsilon_\alpha > 0; \\ kx, \forall M_3 = 0 \wedge U\varepsilon_\alpha \geq 0; \\ x = U\varepsilon_\alpha(t), \quad k = \operatorname{tg}\alpha = 1. \end{cases}$$

Найдем коэффициенты гармонической линеаризации каждого из этих двух нелинейных звеньев, для чего определим сначала выражения для координат в математической модели привода, предполагая, что $\alpha_2 = \alpha_0 + A \cdot \sin \omega t$:

$$\alpha_0(t) = F(\alpha_2) = Q_0 + QA \cdot \sin \omega t;$$

$$M_3(t) = Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 c_2^2} \cdot \sin(\omega t + \operatorname{arctg}(T_2 \omega));$$

$$M_4(t) = -A \omega J_2 \cdot \sin \omega t;$$

$$M_2(t) = Q_0 C_2 + \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \cdot \sin(\omega t + \operatorname{arctg} A_2 / A_1);$$

$$\alpha_4(t) = \frac{C_2 Q_0}{C_1} + D \cdot \sin(\omega t + E);$$

$$\alpha_1(t) = \frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} + \sin\left(\omega t + \operatorname{arctg} \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E}\right);$$

$$M_3(t) = k_{DM} M_3(t) = k_{DM} \left(Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right);$$

$$U_{\varepsilon_M}(t) = -k_2 U_{M3}(t) = -k_2 k_{DM} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right];$$

$$\alpha_4(t) = k_6 \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cos E} \cdot \sin\left(\omega t + \arctg \frac{D \sin E}{A + D \cos E}\right) \right];$$

$$U_{\varepsilon_\alpha}(t) = -k_1 \varepsilon_\alpha(t),$$

где $A_1 = QAC_2 - A\omega^2 J_2$; $A_2 = C_2 T_2 Q A \omega$; $T_1 = b_1 / c_1$;

$$D = \frac{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}}{\sqrt{C_1^2 + C_1^2 T_1^2 \omega^2}}; E = \arctg \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_1 B_1 + A_2 B_2}; T_2 = b_2 / c_2;$$

$$Z_{1A} = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{C_1^2 + C_1^2 T_1^2 \omega^2}}; B_1 = Z_{1A} C_1; B_2 = Z_{1A} \cdot C_1 T_1 \omega.$$

Пределы интегрирования ψ_1 и ψ_2 определим из условия $U_{\varepsilon_M}(t) = 0$:

$$\Psi_1 = -\arctg(T_2 \omega) + \arcsin \left(\frac{C_1 Q_0}{\sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2}} \right) + \pi;$$

$$\Psi_2 = 2\pi - \arctg(T_2 \omega) - \arcsin \left(\frac{C_1 Q_0}{\sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2}} \right).$$

Коэффициенты гармонической линеаризации для КЭ А вычислим по формулам:

$$F_{10} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\psi_1} -k_2 k_{DM} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] d\Psi -$$

$$- \frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_{\psi_2}^{2\pi} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] d\Psi;$$

$$q_1 = -\frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_0^{\psi_1} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \sin \Psi d\Psi -$$

$$- \frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_{\psi_2}^{2\pi} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \sin \Psi d\Psi;$$

$$q_1' = -\frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_0^{\phi_1} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \sin \Psi d\Psi -$$

$$-\frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_{\phi_2}^{2\pi} \left[Q_0 C_2 + \sqrt{Q^2 A^2 C_2^2 + T_2^2 Q^2 A^2 \omega^2 C_2^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \cos \Psi d\Psi.$$

Коэффициенты гармонической линеаризации для КЭ В имеют вид:

$$F_2^0 = -\frac{k_1 k_6}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arcsin \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] d\Psi;$$

$$q_2 = -\frac{k_1 k_6}{\pi A} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arcsin \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \sin \Psi d\Psi;$$

$$q_2' = -\frac{k_1 k_6}{\pi A} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arcsin \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \cos \Psi d\Psi.$$

Рассмотрим второй режим, описываемый выражением (3.16). Блок переключения структуры аналогичным образом представлен в виде двух параллельно включенных коммутирующих элементов С и Д, которые действуют следующим образом: если при наличии контакта РО с ОР ошибка по положению отрицательная, то замкнут КЭ С, в противном случае замкнут КЭ Д.

Так же, как и в первом режиме, полагая, что $U\alpha_0 = 0$, $U_{m0} = 0$, $\alpha_2 = \alpha_c + A \sin \omega t$, определим характеристики коммутирующих элементов:

$$C) Y = \begin{cases} 0, & \forall U\varepsilon_\alpha \geq 0; \\ kx, & \forall U\varepsilon_\alpha < 0; \\ x = U\varepsilon_\alpha(t), & k = \operatorname{tg}\alpha = 1. \end{cases}$$

$$D) Y = \begin{cases} kx, & \forall U\varepsilon_\alpha \geq 0; \\ 0, & \forall U\varepsilon_\alpha < 0; \\ x = U\varepsilon_M(t); & k = \operatorname{tg}\alpha = 1. \end{cases}$$

Пределы интегрирования ψ_3 и ψ_4 определим из условия, что $U\varepsilon_\alpha(t) = 0$, $Q = 1$, $Q_0 = \alpha_0$:

$$\Psi_3 = \pi + \arcsin \frac{\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0}{\sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E}} - \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E};$$

$$\Psi_4 = 2\pi - \arcsin \frac{\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0}{\sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E}} - \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E}.$$

Коэффициенты гармонической линеаризации для КЭ С

$$\begin{aligned}
F_3^0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\phi_3} -k_1 k_6 \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] d\Psi - \\
&- \frac{k_1 k_6}{2\pi} \int_{\phi_4}^{2\pi} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] d\Psi; \\
q_3 &= \frac{k_1 k_6}{\pi A} \int_0^{\phi_3} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \sin \Psi d\Psi - \\
&- \frac{k_1 k_6}{2\pi} \int_{\phi_4}^{2\pi} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \sin \Psi d\Psi; \\
q_3' &= -\frac{k_1 k_6}{\pi A} \int_0^{\phi_3} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \cos \Psi d\Psi - \\
&- \frac{k_1 k_6}{2\pi} \int_{\phi_4}^{2\pi} \left[\frac{C_2 Q_0}{C_1} + \alpha_0 + \sqrt{D^2 + A^2 + 2AD \cdot \cos E} \cdot \sin \left(\omega t + \arctg \frac{D \cdot \sin E}{A + D \cdot \cos E} \right) \right] \cos \Psi d\Psi.
\end{aligned}$$

Ко-

эффиценты гармонической линеаризации для КЭ Д

$$\begin{aligned}
F_4^0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_3}^{\phi_4} -k_2 k_{DM} \left[Q_0 C_2 + Q \sqrt{A^2 C^2 + T_2^2 A^2 \omega^2 C_1^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] d\Psi; \\
q_4 &= \frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_{\phi_3}^{\phi_4} \left[Q_0 C_2 + Q \sqrt{A^2 C^2 + T_2^2 A^2 \omega^2 C_1^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \sin \Psi d\Psi; \\
q_4' &= -\frac{k_2 k_{DM}}{\pi A} \int_{\phi_3}^{\phi_4} \left[Q_0 C_2 + Q \sqrt{A^2 C^2 + T_2^2 A^2 \omega^2 C_1^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg(T_2 \omega)) \right] \cos \Psi d\Psi.
\end{aligned}$$

Из анализа частотных характеристик определено, что в первом режиме введение нелинейного звена ЛПУ уменьшает устойчивость системы, так как его ФЧХ имеет отрицательный фазовый сдвиг в области средних частот. С увеличением частоты уменьшается амплитуда сигнала, проходящего через нелинейный элемент. С ростом амплитуды увеличивается не только коэффициент усиления нелинейного звена А, но и отрицательный фазовый сдвиг. Для КЭ В, наоборот, уменьшаются коэффициент усиления и отрицательный фазовый сдвиг. Во втором режиме ФЧХ имеет в основном положительные фазовые сдвиги и при увеличении частоты уменьшается усиление нелинейного звена, что повышает запасы устойчивости в нелинейной системе.

Таким образом, только в первом режиме работы ЛПУ может ухудшаться устойчивость нелинейного привода.

Работа двухканального исполнительного ЭП в режиме переключения в пространстве состояний системы "РО-ОР" приводит к декомпозиции привода на два независимых привода – позиционного и привода регулирования силы. Это позволяет проводить анализ и синтез данных сепаратных

приводов по отдельности с последующим исследованием влияния ЛПУ на устойчивость и качество переходных процессов двухканального привода.

Для успешного применения рассматриваемых ЭП с переключением структуры необходимо, кроме обеспечения устойчивости и качества приводов, решить целый ряд вопросов, связанных со способом задания и соотношения управляющих сигналов по положению и силе.

Для качественного анализа колебательных движений в ЭП второго порядка с переменной структурой целесообразно воспользоваться методом фазовой плоскости. По виду фазовых траекторий можно судить о свойствах рассматриваемого привода и, более того, выбирая соответствующим образом соотношение задающих сигналов, можно сформировать фазовые траектории таким образом, чтобы получить необходимое качество переходных процессов.

Предположим, что собственное движение такого ЭП описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} p\Omega = (k_3 U_{я} - k_3 k_4 \Omega - M_k) / J; \\ p\alpha = \Omega; \\ U_{я} = \begin{cases} \Omega_0 k_1 - k_1 k_5 \Omega, & \text{при } \alpha < \alpha_c; \\ M_0 k_2 - k_2 k_{DM} M_k, & \text{при } \alpha > \alpha_c; \end{cases} \\ M_k = \begin{cases} C_{DM} (\alpha - \alpha_c), & \text{при } \alpha > \alpha_c; \\ 0, & \text{при } \alpha < \alpha_c, \end{cases} \end{cases} \quad (3.17)$$

где J – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Структурная схема ЭП, соответствующая системе уравнений (3.17), показана на рис. 3.25.

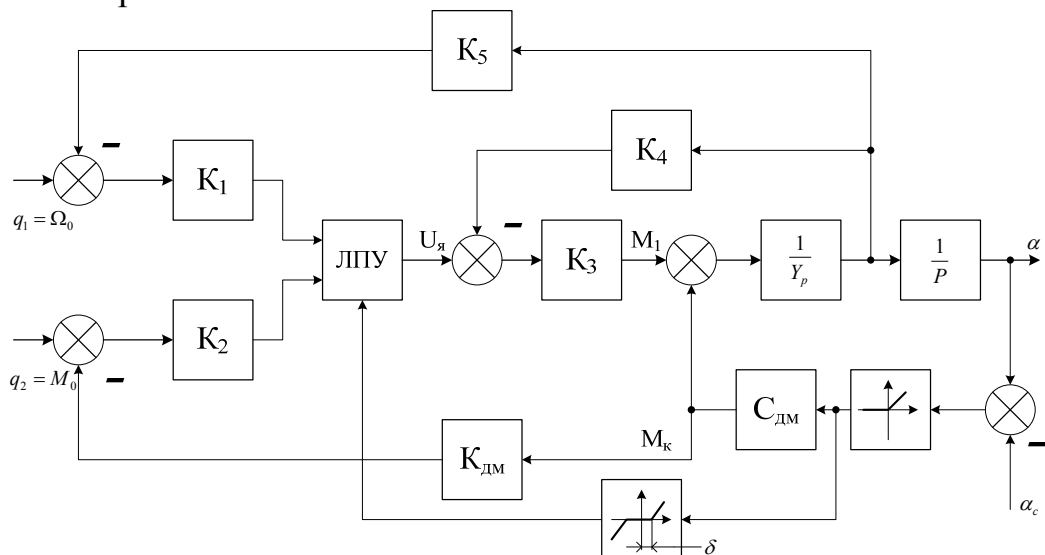


Рис. 3.25. Структурная схема двухканального ЭП с переменной структурой

При $\alpha < \alpha_c$ из (3.17) получаем уравнение вида:

$$(T_1 p + 1) p \alpha = b_1, \quad (3.18)$$

где $T_1 = J / K_3 (K_4 + K_1 K_5)$; $b_1 = g_1 k_1 / K_4 + K_1 K_5$.

Проинтегрировав уравнение (3.18), получим уравнение фазовых траекторий:

$$\alpha = -T_1 (y + b_1 \ln|b_1 - y|) + C_1,$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

При $\alpha > \alpha_c$ из (3.17) получаем уравнение динамики привода:

$$J p^2 \alpha + k_3 k_4 p \alpha + C_{DM} (1 + k_2 k_3 k_{DM}) \alpha = q_2 k_2 k_3 + C_{DM} \cdot \alpha_c (1 + k_2 k_3 k_{DM})$$

Вводя новые обозначения

$$a_1 = k_3 k_4 / J; \quad a_2 = \frac{C_{DM}}{J} (1 + k_2 k_3 k_{DM}); \quad b_2 = \frac{k_2 k_3}{J} q_2 + \frac{C_{DM}}{J} (1 + k_2 k_3 k_{DM}) \alpha_c,$$

преобразуем это уравнение к следующему виду:

$$p^2 \alpha + a_1 p \alpha + a_2 \alpha = b_2, \quad (3.19)$$

при условии, что $\alpha = \alpha_c + b_2 a_2^{-1}$.

Это уравнение совпадает с уравнением

$$p^2 \alpha + a_1 p \alpha + a_2 \alpha = 0. \quad (3.20)$$

Следовательно, фазовые траектории для уравнения (3.19) соответствуют фазовым траекториям уравнения (3.20) с началом координат в точке α_c :

$$\alpha_c' = \frac{b_2}{a_2} = \alpha_c + \frac{k_2 k_3 q_2}{C_{DM} (1 + k_2 k_3 k_{DM})} = \alpha_c + \Delta \alpha.$$

Здесь $\Delta \alpha$ соответствует деформации датчика силы при установившемся значении M_k .

Исходная система уравнений может быть представлена в виде уравнений (3.18) и (3.19). Изменение структуры приводов происходит при $\alpha = \alpha_c$.

Подставляя данные ЭП перемещения штанг МСПС

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = 440; \quad K_2 = 22; \quad K_3 = 0,13 \text{ Н} \cdot \text{мВ}^{-1}; \quad K_4 = 0,164 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}; \\ K_5 = 0,016 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}; \quad T_s = 0,0024 \text{ с}; \quad J_1 = 0,000175 \text{ кгм}^2; \\ J_2 = 0,00011 \text{ кгм}^2; \quad c = 500 \text{ Нм} \cdot \text{рад}^{-1}; \quad b = 0,03 \text{ Нм} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}; \\ C_{DM} = 1,2 \text{ Нм} \cdot \text{рад}^{-1}; \quad b_{DM} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Нм} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}; \quad J_{DM} = 1 \cdot 10^{-8} \div 2 \cdot 10^{-7} \text{ кгм}^2; \\ K_{DM} = 0,6 \text{ В}(\text{Нм})^{-1}. \end{array} \right.$$

в уравнения (3.18) и (3.19) при $\alpha_c = 0,1$ рад и изменяя q_1 и q_2 , получим фазовые траектории привода, отражающие наиболее характерные движения изображающей точки (рис. 3.26, а, б).

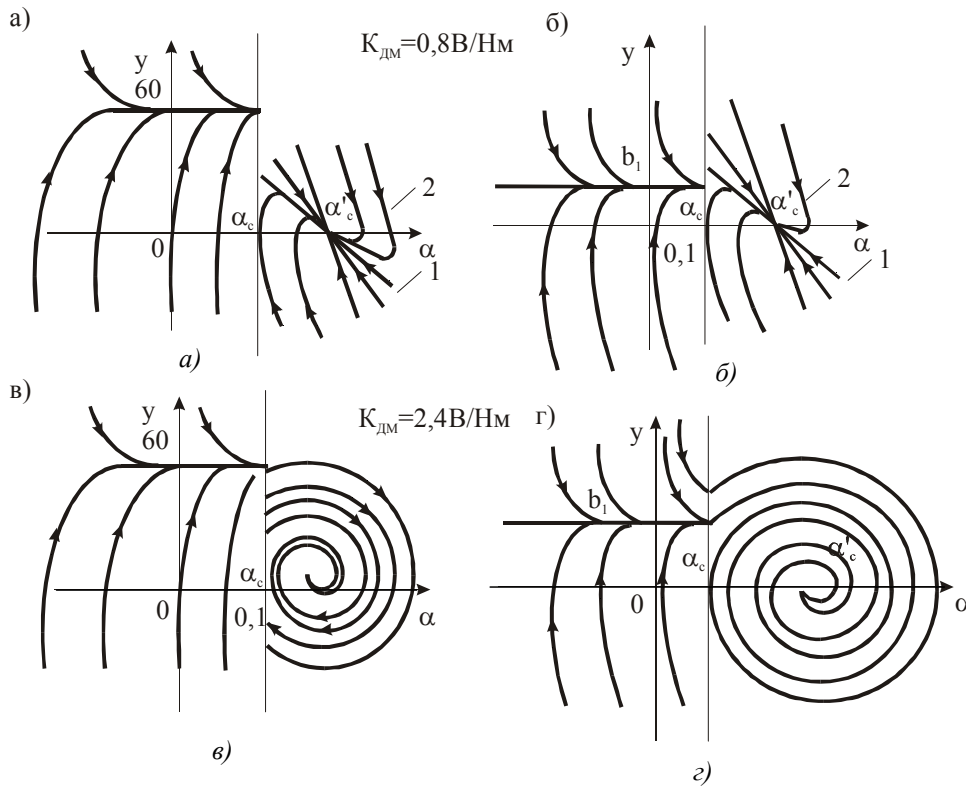


Рис. 3.26. Фазовые портреты двухканального ЭП с переменной структурой: а – $q_1 = 1$ В; $q_2 = 0,3$ В; б – $q_1 = 0,25$ В; $q_2 = 0,75$ В; в – $q_1 = 1$ В; $q_2 = 0,5$ В; г – $q_1 = 0,25$ В; $q_2 = 1,25$ В

Рис 3.26, в, г отражают фазовые траектории при увеличении параметров $S_{дм}$ и $K_{дм}$ по величине, соответственно, до $1,5$ Нм·рад⁻¹ и $2,4$ В(Нм)⁻¹.

Из полученных фазовых портретов ЭП можно сделать следующие выводы.

1. При $\alpha < \alpha_c$ качественно фазовый портрет не изменяется, движение изображающей точки изменяется лишь количественно.

2. При $\alpha > \alpha_c$ изменение параметров привода приводит к трем качественно отличным друг о друга фазовым траекториям:

а) α и y изменяются по аperiodическому закону при следующих параметрах привода (см. рис. 3.26 а, б, прямые 1):

$$\left. \begin{aligned} & A < B^2; \\ & -\frac{B}{2} - \sqrt{D} \leq \frac{\Omega}{\alpha} \leq \frac{B}{2} + \sqrt{D} \end{aligned} \right\}, \quad (3.21)$$

где $A = \frac{4C_{DM}}{J}(1 + K_2 K_3 K_{DM})$; $B = K_3 K_4 / J$; $D = (B/2)^2 - A$;

б) α и u изменяются по апериодическому закону с перерегулированием (см. рис. 3.26, а, б, кривые 2), если

$$\left. \begin{aligned} A < B^2; \\ \frac{\Omega}{\alpha} > -\frac{B}{2} + \sqrt{D}; \\ \frac{\Omega}{\alpha} > -\frac{B}{2} - \sqrt{D} \end{aligned} \right\}; \quad (3.22)$$

в) имеют место затухающие колебания с одним или несколькими переключениями ЛПУ (см. рис. 3.26, в, г) при $B^2 \ll A$.

Количество переключений зависит от соотношения корней уравнения (3.19) и значений b_1 и $\Delta\alpha$.

Если $B^2 \ll A$, то привод стремится к незатухающим колебаниям, не выходя за пределы границы устойчивости.

При выполнении условий (3.21) и (3.22) возможно только одно переключение ЛПУ, причем для выполнения варианта (3.21) необходимы следующие условия:

Если

$$\left(-\frac{a_1}{2} - \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_2} \right) \leq \frac{b_1}{\Delta\alpha} \leq \left(-\frac{a_1}{2} + \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_2} \right),$$

где $b_1 \Delta^{-1} \alpha = E g_1 g_2^{-1}$, то для обеспечения апериодических переходных процессов при начальных условиях $\alpha_0, d\alpha_0/dt$, обеспечивающих при $\alpha = \alpha_c$ равенство $d\alpha/dt = b_1$, необходимо следующее соотношение g_1 и g_2 :

$$\left. \begin{aligned} q_1 \leq q_2 E \left(-\frac{B}{2} + \sqrt{D} \right); \\ q_1 \geq -q_2 E \left(\frac{B}{2} + \sqrt{D} \right); \end{aligned} \right\}.$$

Здесь $E = K_1 K_4 A / 4K_2 B(K_4 + K_1 K_5)$.

Важные вопросы проектирования рассматриваемых ЭП – учет времени срабатывания ЛПУ при переключении от датчика контакта, учет запаздывания сигнала с датчика контакта, а также управление ЛПУ от датчика силы через пороговый элемент.

Движение этого привода описывается системой уравнений (3.17) при

условии, что $\alpha_c = \delta\alpha_c$, где параметр определяется временем запаздывания срабатывания ЛПУ, временной погрешностью датчика контакта или величиной уровня пропуска сигналов с датчика силы на управление ЛПУ через пороговый элемент. Структурная схема ЭП показана на рис. 3.27 (при условии, что $\delta \neq 0$).

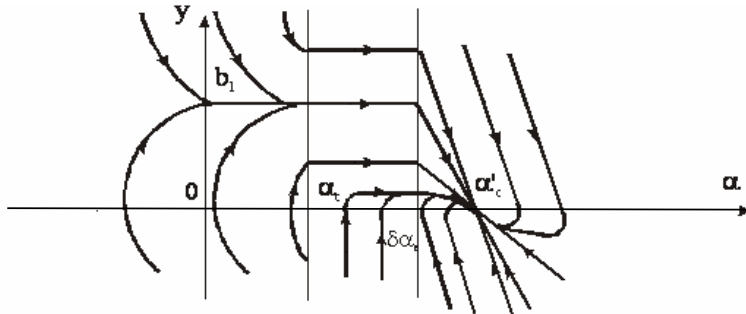


Рис. 3.27. Фазовый портрет двухканального ЭП с учетом задержки срабатывания ЛПУ

Данный привод на фазовой плоскости (см. рис. 3.27) имеет две линии переключения, определяемые α_c и $\delta\alpha_c$. До линии $\delta\alpha_c$ фазовый портрет описывается уравнениями систем (3.18) и (3.19) при значениях коэффициентов a_1, a_2, b_2 , измененных следующим образом:

$$a_1 = \frac{k_3}{J}(k_4 + k_1 k_5); \quad a_2 = \frac{C_d}{J}; \quad b_2 = \frac{k_3}{J} k_1 q_1 + \frac{C_d}{J} \alpha_c,$$

после линии $\delta\alpha_c$ – уравнением (3.19) с исходными значениями этих коэффициентов.

Для протекания монотонных переходных процессов должно выполняться следующее условие:

$$\left. \begin{aligned} g_2 \leq & \frac{(-q_1 k_1 + \delta\alpha \cdot C_{DM} / k_3) A J}{4(K_4 + K_1 K_5) K_2 K_3 \left(\frac{B}{2} + \sqrt{D} \right)}; \\ g_2 \geq & \frac{(q_1 k_1 - \delta\alpha \cdot C_{DM} / k_3) A J}{4(K_4 + K_1 K_5) K_2 K_3 \left(-\frac{B}{2} + \sqrt{D} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

где $A < B^2$; $\delta\alpha = \delta\alpha_c - \alpha_c$.

Анализ выражений (3.23) показывает, что величина $\delta\alpha$ мало влияет на граничное значение q_1 и q_2 . Судя по фазовому портрету (см. рис. 3.27), при выполнении (3.23) величина $\delta\alpha$ должна несколько увеличивать длительность переходных процессов.

Скользящие режимы в двухканальных приводах с переменной структурой

Условия существования скользящего режима на гиперплоскости S можно получить, исходя из того, что в точках S векторы фазовых скоростей структур обоих режимов управления (скорости и силы) должны быть направлены навстречу друг другу, либо должны принадлежать S [73].

Условия, при выполнении которых на гиперплоскости S существует скользящий режим, имеют следующий вид:

$$\lim_{S \rightarrow +0} S < 0, \quad \lim_{S \rightarrow -0} S \geq 0. \quad (3.24)$$

Рассмотрим возможность получения скользящих режимов в ЭП при переключении ЛПУ по следующему алгоритму:

$$U = \begin{cases} \Omega_0 k_1 - k_1 k_5 \Omega, & \text{при } \varepsilon_\Omega < \varepsilon_M; \\ M_0 k_2 - k_2 k_{DM} M_k, & \text{при } \varepsilon_\Omega > \varepsilon_M, \end{cases} \quad (3.25)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\Omega &= \Omega_0 - k_5 \Omega; \\ \varepsilon_M &= M_0 - k_{DM} M_k. \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

При изменении M_k ошибка ε_M принимает следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_M &= M_0, & \text{при } \alpha < \alpha_c; \\ \varepsilon_M &= M_0 - k_{DM} C_{DM} \alpha + k_{DM} C_{DM} \alpha_c, & \text{при } \alpha > \alpha_c. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

В соответствии с (3.26) и (3.27) существуют четыре области, ограниченные линиями переключения, в которых изменяются параметры и структура ЭП.

$$\left. \begin{aligned} 1. & \left\{ \begin{aligned} \alpha < \alpha_c; \\ p\alpha > \frac{\Omega_0 - M_0}{k_5}; \end{aligned} \right\} & 2. & \left\{ \begin{aligned} \alpha < \alpha_c; \\ p\alpha < \frac{\Omega_0 - M_0}{k_5}; \end{aligned} \right\} \\ 3. & \left\{ \begin{aligned} \alpha > \alpha_c; \\ \alpha < \alpha_c + \frac{M_0 - \Omega_0 + k_5 p\alpha}{k_{DM} C_{DM}}; \end{aligned} \right\} & 4. & \left\{ \begin{aligned} \alpha > \alpha_c; \\ \alpha > \alpha_c + \frac{M_0 - \Omega_0 + k_5 p\alpha}{k_{DM} C_{DM}}; \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Уравнения динамического состояния ЭП в каждой области имеют следующий вид:

– в первой области – уравнения (3.28);

– во второй области – уравнения

$$(T_{1p}' + 1)p\alpha = b_1',$$

где

$$T_1' = J / k_3 k_4; \quad b_1' = \frac{k_2}{k_4} M_0;$$

– в третьей области – уравнения

$$p^2\alpha + a_1p\alpha + a_2\alpha = b_2,$$

где

$$a_1 = k_3(k_4 + K_1K_5)/J; \quad a_2 = C_{DM}/J; \quad b_2 = (\Omega_0 K_1 K_3 + \alpha_c C_{DM})/J.$$

– в четвертой области – уравнения

$$p^2\alpha + a_1p\alpha + a_2\alpha = b_2,$$

$$\text{где } a_1' = k_3k_4/J; \quad a_2' = \frac{C_{DM}}{J}(1 + k_2k_3k_{DM}); \quad b_2' = \frac{k_2k_3}{J}M_0 + \frac{C_{DM}}{J}(1 + k_2k_3k_{DM})d_c.$$

Фазовые портреты двухканального ЭП с управлением ЛПУ по минимуму ошибки представлены на рис. 3.28. Как видно из рис. 3.28, б, в приводе возможен скользящий режим на отрезке прямой АВ. Однако это достигается изменением параметров ЭП в режиме управления силой до колебательного процесса. После прохождения АВ изображающая точка двигается по собственной фазовой траектории ЭП.

Подобный синтезированный привод увеличивает возможность более широкого изменения выходных воздействий Ω_0 и M_0 без ухудшения качественных характеристик. За счет наклона линии АВ несколько увеличивается быстродействие привода.

Алгоритм управления ЛПУ (3.25) реализуется с помощью селектора ЭП, представленного на рис. 3.29. Сигнал с селектора поступает на ЛПУ, который включает тот канал управления, в котором величина ошибки является минимальной, т.е. через ЛПУ проходит меньшая из положительных величин ошибок по скорости или моменту. Если в каналах управления скоростью и моментом возможно перерегулирование, т.е. отрицательные значения ошибок, то коммутируется тот канал управления, в котором есть перерегулирование. Если сигналы обоих ошибок отрицательны, то селектор обеспечивает прохождение сигнала ошибки по моменту.

Применение ЭП с рассмотренным алгоритмом управления расширяет функциональные возможности роботов при работе с подвижным упором, но не обеспечивает полностью требуемое быстродействие управления моментом, несмотря на то, что управление скоростью и моментом происходит одновременно.

Необходимо провести синтез структуры ЭП таким образом, чтобы обеспечить требуемое быстродействие отработки задаваемого момента.

Как видно из рассмотренных структурных построений оптимальной линией переключения является линия СД, параллельная оси u с точкой α_c' на оси α (рис. 3.30), описываемая следующим уравнением:

$$S = K(\alpha - \alpha_c') + \alpha, \quad (3.29)$$

где коэффициент K определяет наклон линии СД к оси u .

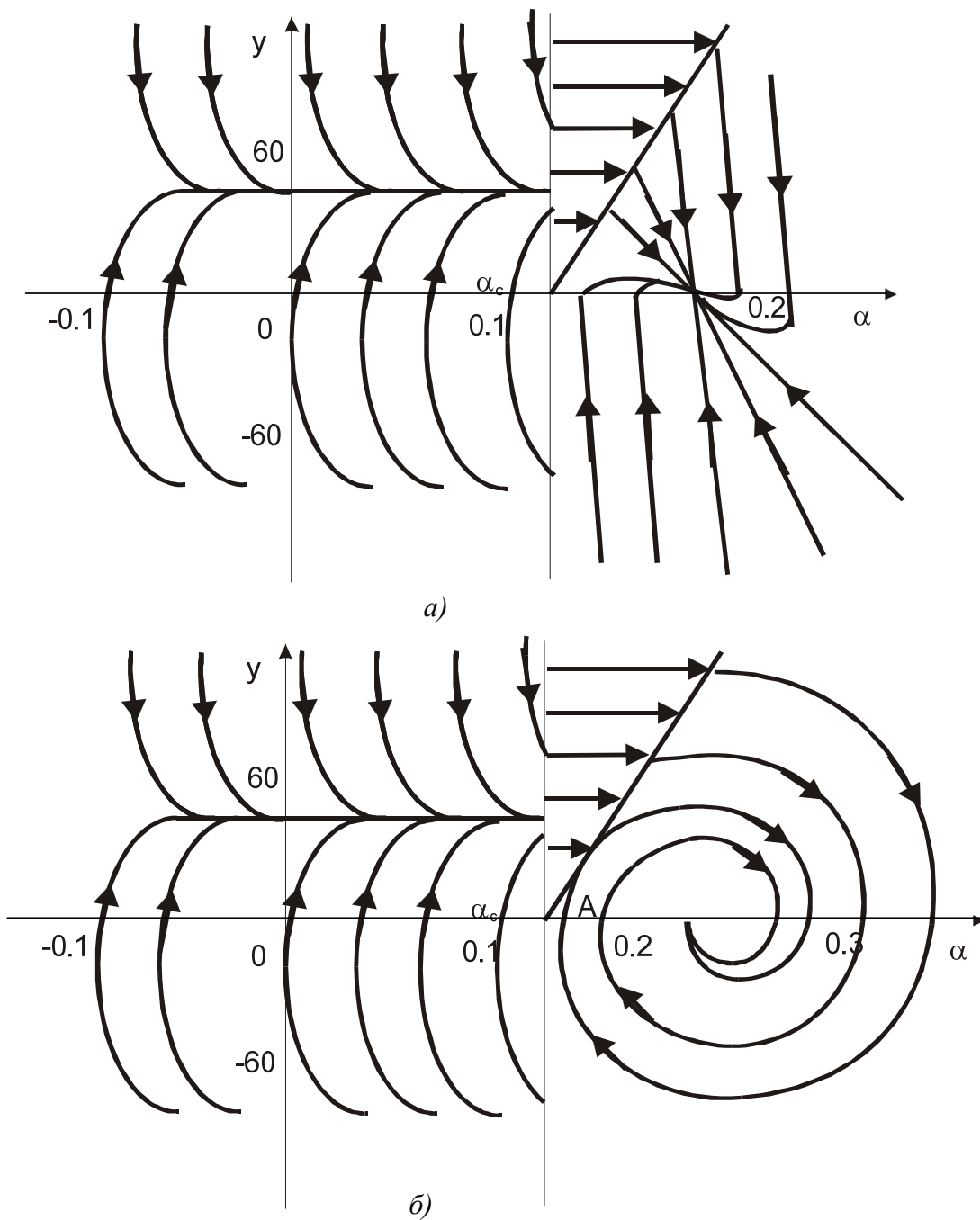


Рис. 3.28. Фазовые портреты двухканального ЭП с переключением структуры по минимуму ошибки: а – $U_{\Omega 0}=U_{M 0}=1B$; $K_{\text{дм}}=0,3 \frac{B}{\text{Нм}}$; б – $U_{\Omega 0}=1B$; $U_{M 0}=5B$; $K_{\text{дм}}=2,4 \frac{B}{\text{Нм}}$

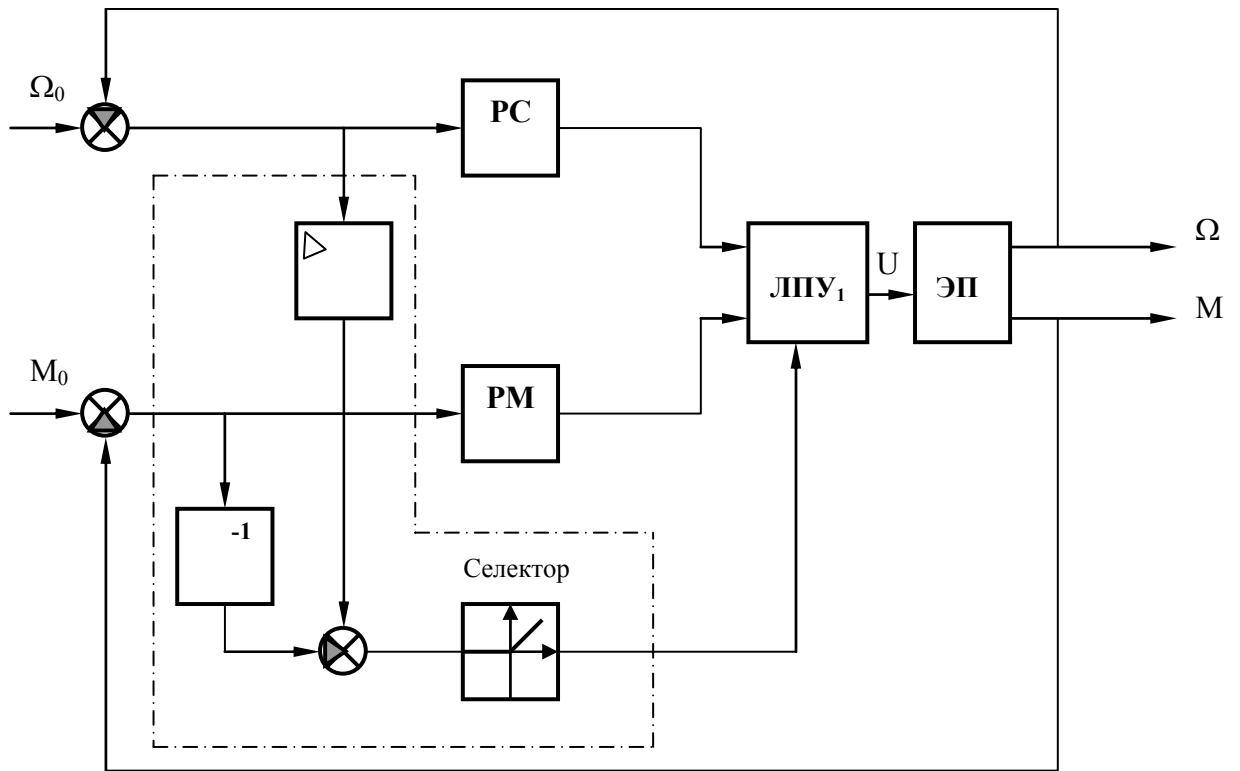


Рис. 3.29. Двухканальный ЭП с переключением структуры по минимуму ошибки

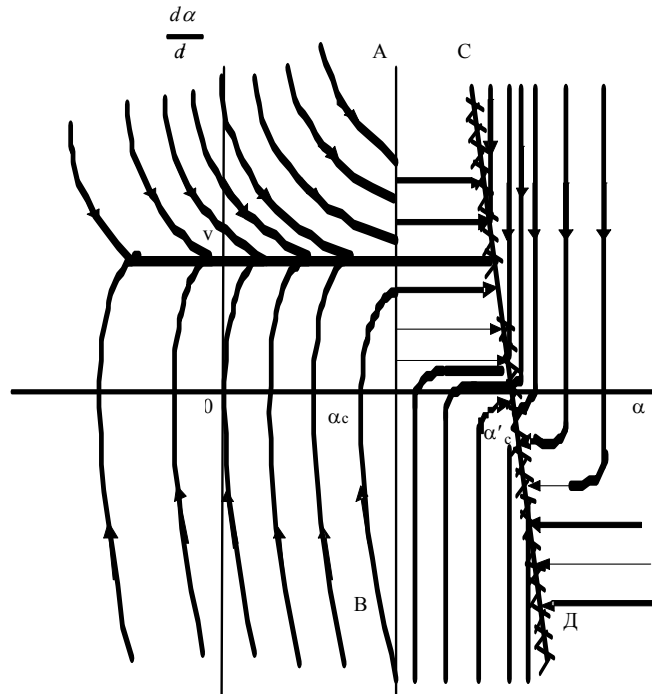


Рис. 3.30. Фазовый портрет ЭП с организацией скользящего режима

В системе приводов ИУ робота произвольного порядка, перемещающей РО вдоль технологической траектории, представляющей собой многообразие пересечения поверхностей разрыва $S = 0$, возникает многомерный скользящий режим относительно этой траектории.

Если после прохождения изображающей точки линии СД изменить задающее воздействие по скорости на обратное по знаку, то получим

$$\alpha'_c = \alpha_c - \frac{k_1 k_3}{C_{DM}} \Omega_0.$$

В этом случае фокус фазовых траекторий будет расположен левее α'_c (см. рис. 3.30).

Если

$$K = \frac{k_3}{2J} k_4' + \sqrt{\left(\frac{k_3 k_4'}{2J}\right)^2 - \frac{C_{DM}}{J}}, \quad (3.30)$$

где $k_4' = k_4 + k_1 k_5$, то линия СД будет линией переключения с устойчивым вырожденным движением.

Если

$$\left. \begin{aligned} K < \frac{k_3 k_4'}{2J} + \sqrt{\left(\frac{k_3 k_4'}{2J}\right)^2 - \frac{C_{DM}}{J}}, \\ K > \frac{k_3 k_4'}{2J} - \sqrt{\left(\frac{k_3 k_4'}{2J}\right)^2 - \frac{C_{DM}}{J}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

то при условии

$$\left(\frac{k_3 k_4'}{J}\right)^2 > 4C_{DM}/J \quad (3.32)$$

линия СД будет линией скольжения.

Выразим линию СД соотношением следующего вида:

$$\varepsilon_1 M_0 = \varepsilon_2 \Omega_0 k_{II}, \quad (3.33)$$

где K_n – коэффициент переключения, определяемый как

$$k_{II} = k^{k_4 + k_1 k_5} / k_4 (1 + k_2 k_3 k_{DM}). \quad (3.34)$$

Коэффициент K в данном выражении выбирается из неравенства (3.30) или (3.31).

При $r\alpha < 0$ и $\alpha > \alpha_c$ целесообразно ввести управление по моменту.

На основании полученных выражений алгоритм управления можно представить следующим образом:

$$U_{\alpha} = \begin{cases} \Omega_0 k_1 - k_1 k_5 \Omega, & \text{при } \alpha < \alpha_c \vee \text{при } \alpha > \alpha_c \text{ и } \varepsilon_{\Omega} M_0 < \varepsilon_{\alpha} \Omega_0; \\ -\Omega_1 k_1 - k_1 k_5 \Omega, & \text{при } \alpha > \alpha_c \text{ и } \varepsilon_{\Omega} M_0 < \varepsilon_{\alpha} \Omega_0; \\ M_0 k_2 - k_2 k_{DM} M_k, & \text{при } \alpha > \alpha_c \text{ и } p\alpha < 0; \\ q_1 k_1 - k_1 k_5 \Omega. & \end{cases} \quad (3.35)$$

Функциональная схема двухканального ЭП с организацией скользящих режимов представлена на рис. 3.31.

Количественная и качественная оценка работы синтезированного ЭП определялась расчетом переходных процессов методом численного интегрирования исходной нелинейной системы дифференциальных уравнений.

Электропривод с переключением ЛПУ от датчика контакта при $\alpha c = 0$ имеет один режим управления – управление силой. Из анализа переходных процессов этого привода с $U_{M0} = 1$ В, при различных значениях K_{DM} следует, что апериодические переходные процессы существуют до $K_{DM} < 0,6$ В (Нм)⁻¹.

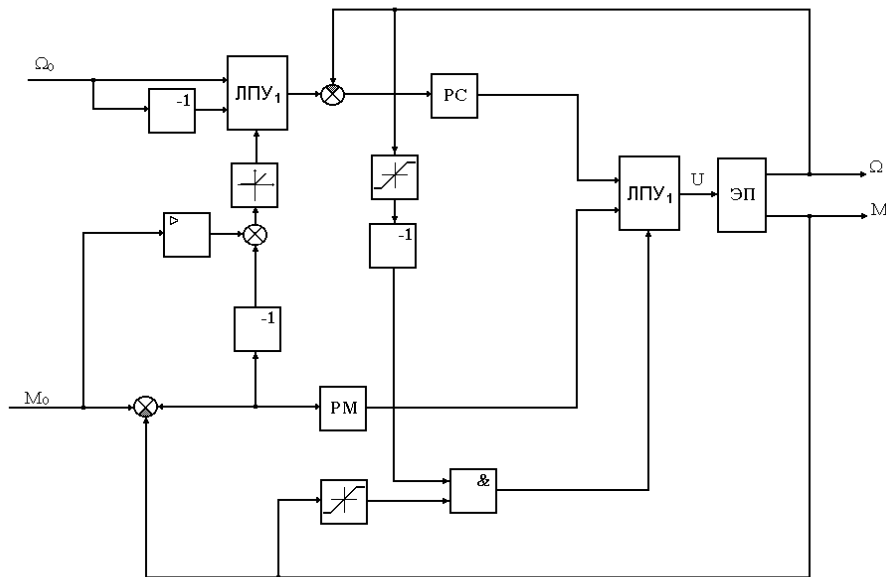


Рис. 3.31. Двухканальный ЭП с организацией скользящих режимов

Применение в приводах СМП в силу характерной разрывности его динамического передаточного отношения в функции состояния привода приводит к тому, что механическая передача выполняет функции псевдолинейного или нелинейного корректирующего звена нового типа. Оно не только улучшает устойчивость привода и плавность его перемещения на нижнем пределе диапазона регулирования, но также в силу свойства необратимости улучшает энергетические показатели и надежность привода при значительной доле стационарных положений равновесия, особенно при действии потенциальных и упругих сил.

Глава 4. СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ СТЮАРТА ПУСКОВОГО КОМПЛЕКСА

Чаще всего, с одной стороны, оператор и устройство автоматического управления не могут находиться около рабочего пространства пускового комплекса ввиду экстремальных условий эксплуатации технологического оборудования и пусковых установок с БЛА. С другой стороны, во время работы комплекса ввиду параллельности кинематической структуры платформы Стюарта, подвижное звено которой является пусковым столом, возможно возникновение сингулярных конфигураций, затрудняющих процесс управления. Неидеальность связей (наличие сил и моментов сил трения в кинематических парах) приводит к тому, что вблизи особых положений может произойти заклинивание механизма. Таким образом, работоспособность механизма будет теряться не в самом особом положении, а в некоторой окрестности этого положения.

Это приводит к необходимости силомоментного очувствления платформы Стюарта и применения дистанционного или дистанционно-автоматического управления.

Отличительный признак МСПС с дистанционным управлением – участие человека в процессе управления. Естественный интеллект и органы чувств позволяют оператору быстро ориентироваться в рабочей обстановке, анализировать условия работы, принимать необходимые решения и выбирать рациональные алгоритмы выполнения технологических операций. Это и определяет применение МСПС с дистанционным управлением для выполнения сложных и нетиповых операций с недетерминированными вариативными объектами как при обычных, так и экстремальных условиях работы.

Степень участия человека-оператора в эргатической системе "человек – МСПС" не только определяется сложностью выполняемой операции, но и существенно зависит от структуры самой системы и принципа дистанционного управления. Так, при командном, копирующем и полуавтоматическом видах управления МСПС человек постоянно обеспечивает формирование движений исполнительного устройства. В первом случае оператор управляет приводом каждой штанги по отдельности нажатием на соответствующие кнопки дистанционного пульта управления. Во втором случае оператор управляет перемещением и ориентацией подвижной платформы с

рабочим органом с помощью дистанционно удаленного ЗУ, кинематически подобного МСПС. При полуавтоматическом управлении оператор взаимодействует с ЗУ с помощью многостепенной рукоятки, сигналы с которой через ЭВМ поступают на приводы штанг МСПС.

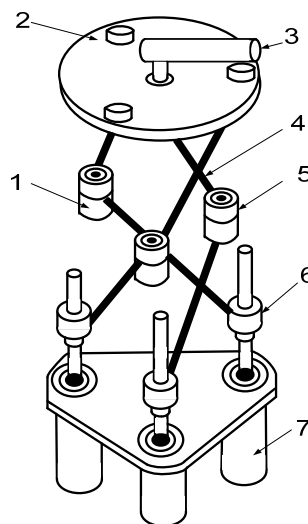
Супервизорное и диалоговое управления МСПС позволяют в значительной степени освободить человека от выполнения простейших, повторяющихся движений и работать в режиме координирования действий робота. Весьма эффективны при выполнении разнообразных операций с помощью роботов системы комбинированного дистанционно-автоматического управления. В подобных робототехнических системах оператор подключается к управлению лишь в моменты выполнения наиболее сложных действий робота [18, 120].

§ 4.1. Системы копирующего управления движением и ориентацией выходного звена платформы Стюарта

В случае дистанционного копирующего управления с пассивным или активным отражением сил и моментов кинематическая структура задающего устройства совпадает с кинематикой управляемой МСПС (рис. 4.1). ЗУ оснащаются устройствами формирования автономных сигналов задания S_0 , \dot{S}_0 , F_0 или сигналов взаимосвязанного управления типа $S_0 \vee \wedge \dot{S}_0$, $F_0 \vee S_0$, $F_0 \vee (S_0 \vee \wedge \dot{S}_0)$, $F_0 \wedge S_0$.



а)



б)

Рис. 4.1. Пример задающего устройства системы копирующего управления МСПС: а – общий вид мехатронной системы; б – кинематическая схема задающего устройства; 1 – потенциометр; 2 – платформа; 3 – рукоятка джойстика; 4 – штанга; 5 – пассивный сустав; 6 – датчики; 7 – исполнительные ЭД

С точки зрения реализации идей ПСУ системы дистанционного, командного, копирующего, полуавтоматического, позиционного силового управления манипулятором целесообразно разделить на две группы – системы одно- и двустороннего действия.

К системам одностороннего действия, обеспечивающим однонаправленную передачу перемещения от задающего устройства к исполнительному, относят системы с командным, копирующим и полуавтоматическим управлением без отражения сил и моментов [18, 67].

Все разновидности систем копирующего управления манипуляторами ДСД разделяются на две группы: симметричные и несимметричные системы. Общий признак систем ДСД при дистанционном управлении – наличие канала управления положением (КУП) и канала отражения сил (КОС), расположенных соответственно на ИУ и ЗУ.

Основа симметричных систем ДСД (СДСД) – электроприводы с позиционной главной обратной связью, расположенные как на ЗУ, так и ИУ. Функциональные схемы данных систем при копирующем управлении представлены на рис. 4.2.

Схема на рис. 4.2, а объединяет три вида систем:

- 1) систему дополнительных корректирующих обратных связей через ($U_{\text{ДМ1}}, U_{\text{ДМ2}}$) и $U_{\text{ЭМ}}$;
- 2) систему с позиционными обратными связями и корректирующими связями $U_{\text{ДМ1}}$ и $U_{\text{ДМ2}}$, охватывающими КУП и КОС;
- 3) систему с позиционными обратными связями и корректирующими связями $U_{\text{ЭМ}}$, охватывающими КУП и КОС.

Для получения информации о моментах, действующих в ЭП задающего и исполнительного устройств, могут быть использованы обратные связи с датчиками моментов (ДМ) и упругие элементы с соответствующим подключением датчиков положения.

В несимметричных системах ДСД (НСДСД) прямого включения позиционные ЭП расположены на ИУ, за ЭП с главной обратной связью по моменту – на ЗУ. В несимметричных системах ДСД обратного включения ЭП расположены в обратном порядке: позиционные ЭП – на ЗУ, ЭП с главной обратной связью по моменту – на ИУ.

НС ДСД в зависимости от способа отражения сил подразделяются на системы с активным и пассивным отражением сил.

Активные системы отражения усилий наилучшим образом создают эффект присутствия человека-оператора в зоне проведения работ. Вместе с тем массогабаритные параметры силовых элементов на стороне оператора соизмеримы с параметрами силовых исполнительных элементов манипулятора, поэтому при проектировании манипуляционного робота с активными системами отражения моментов ЗУ komponуют по блочному принципу раз-

мещения приводов, поскольку модульная компоновка связана со значительными трудностями уравнивания ЗУ.

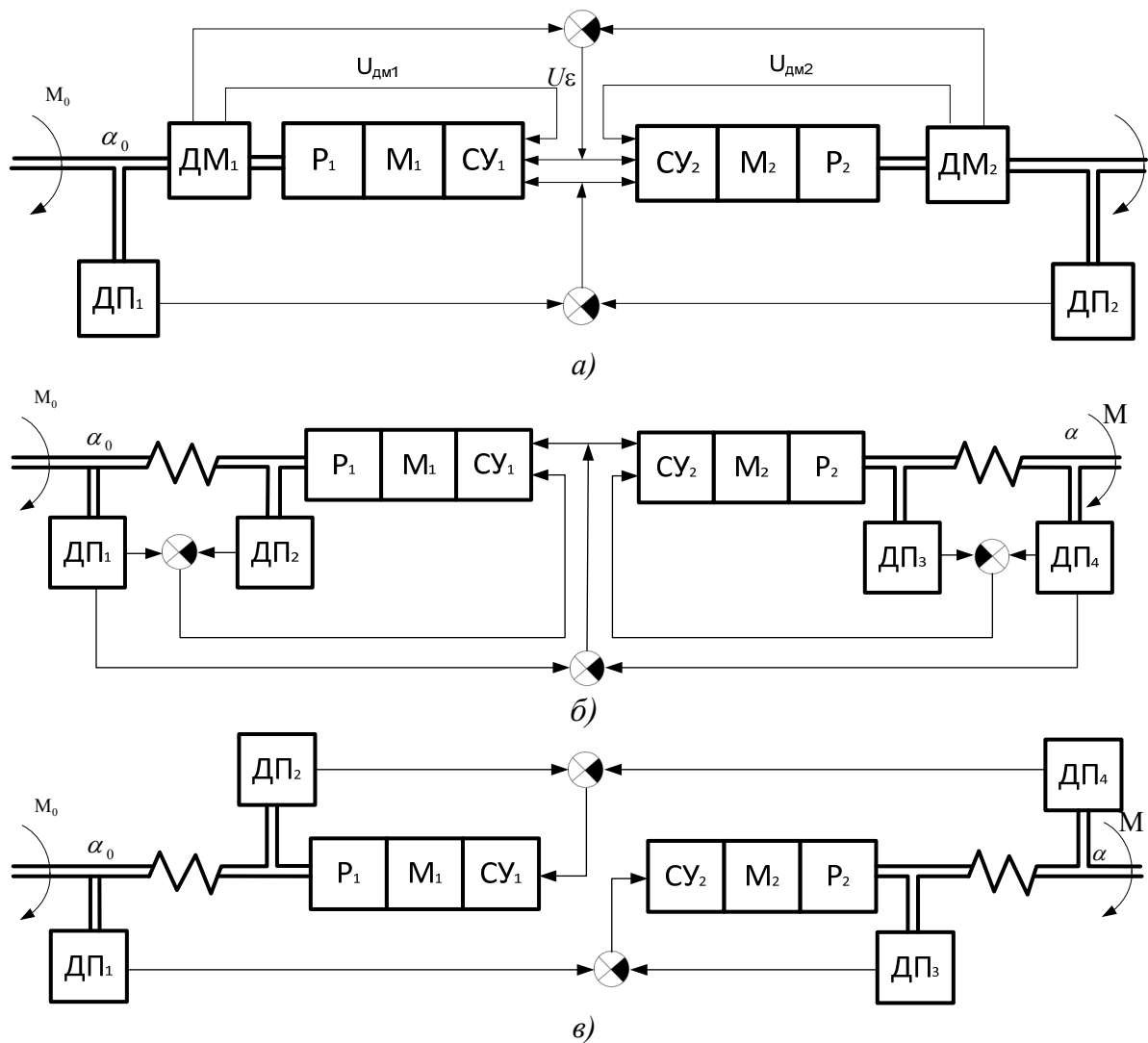


Рис. 4.2. Функциональные схемы симметричных систем ДСД при копирующем управлении МСПС: а – с моментными и позиционными обратными связями от ДМ и ДП; б – с моментными и позиционными обратными связями от ДП₁ и ДП₂; в – с позиционными обратными связями

В пассивных системах отражения моментов в качестве загрузителей могут применять фрикционные тормозные муфты с электро-, гидро- или пневмоуправлением, порошковые электромагнитные муфты, электрогидравлические загрузатели, обгонные муфты. Пассивные системы отражения моментов подразделяются на два основных вида – линейные и нелинейные. Структурная схема пассивной системы линейного отражения моментов аналогична схеме активной системы. Момент сопротивления движению вала оператора в этих системах пропорционален значению сигнала

устройства измерения момента нагрузки и, следовательно, значению момента нагрузки на выходном валу привода штанги.

Применение нелинейных систем пассивного отражения моментов (рис. 4.3) в МСПС с копирующим управлением позволяет значительно снизить физические нагрузки и утомляемость оператора в процессе дистанционного проведения работ, так как на руке оператора воспроизводятся лишь заранее заданные предельные усилия. Это особенно важно при «работе» в зоне особых положений МСПС.

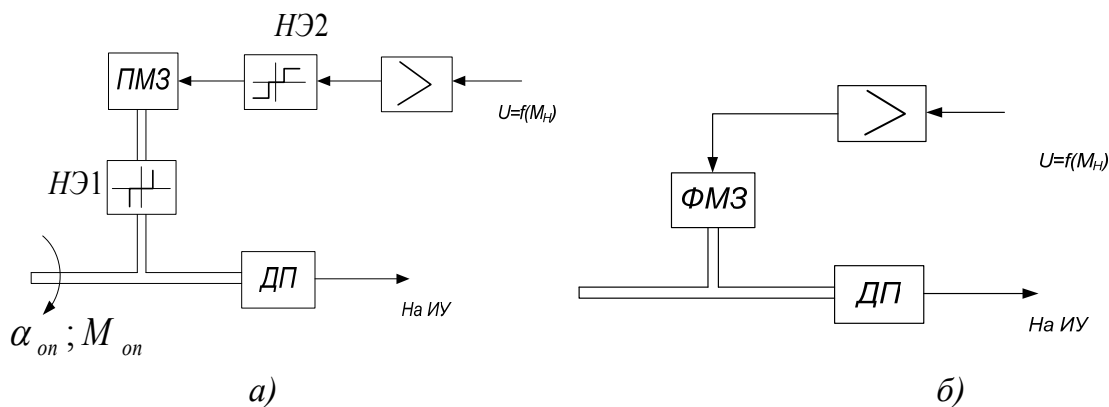


Рис. 4.3. Структурные схемы систем с нелинейным отражением моментов нагрузки: а – с пассивным моментным нагрузителем ПМЗ; б – с фазочувствительным нелинейным моментным нагрузителем ФМЗ

В нелинейной системе отражения моментов (рис. 4.3, а) усиленный сигнал нагрузки через нелинейный пороговый элемент НЭ₂ воздействует на пассивный моментный нагрузитель ПМЗ, представляющий собой тормозящий элемент с трением без смазочного материала, препятствующий перемещению задающей оси исполнительной следящей системы (ИСС) в сторону увеличения момента нагрузки. Зона нечувствительности НЭ₂ определяет максимально допустимое значение момента нагрузки. Возможность реверса задающей штанги при заторможенном ПМЗ обеспечивается механическим нелинейным элементом НЭ, представляющим собой устройство с регулируемым значением зоны нечувствительности, которое зависит от динамических параметров привода штанги МСПС и выбирается при ее отладке.

В нелинейной системе отражения моментов, показанной на рис. 4.3, б, в качестве элемента, запрещающего движение штанги ЗУ при достижении моментом нагрузки заданного значения, применяется фазочувствительный нелинейный моментный нагрузитель ФМЗ, принцип действия которого подобен принципу работы обгонной муфты.

Положительное качество нелинейных систем отражения моментов – способность исключения избыточности силовой информации, что позволя-

ет минимизировать физические нагрузки оператора в процессе дистанционного выполнения работ и повысить производительность биотехнической системы «оператор-манипулятор».

Задача регулирования усилий в заданном диапазоне, лежащем в пределах физических возможностей человека-оператора, решается в большинстве случаев с помощью обратимых следящих систем, воспроизводящих на руке оператора усилия нагрузки. Однако для МСПС большой грузоподъемности пропорциональное воспроизведение нагрузки неприемлемо, а ввод масштабирования в тракт отражения приводит к искажению информации. Системы с линейным отражением усилий характеризуются избыточностью информационного канала обратной связи по моменту и тем не менее вносят большие погрешности при воспроизведении больших усилий, что связано с физиологическими и психологическими особенностями оператора как элемента биотехнической системы.

Для повышения надежности работы системы в зоне особых положений МСПС необходимо, чтобы канал отражения был активным, т.е. единичный сигнал нагрузки должен препятствовать движению ЗУ в сторону увеличения рассогласования, а следовательно, и усилия. В то же время необходимо обеспечить возможность свободного движения ЗУ в обратном направлении. Эта задача может быть решена либо соединением вала ЗУ с электромагнитным тормозом, управляемым сигналом нелинейной обратной связи по моменту через элемент с гистерезисной характеристикой, либо применением фазочувствительного моментного загрузжателя.

Возможность сохранения динамических параметров при высокой точности силового воздействия на объект манипулирования можно обеспечить посредством внутреннего контура нелинейной обратной связи по моменту в ИСС (рис. 4.4).

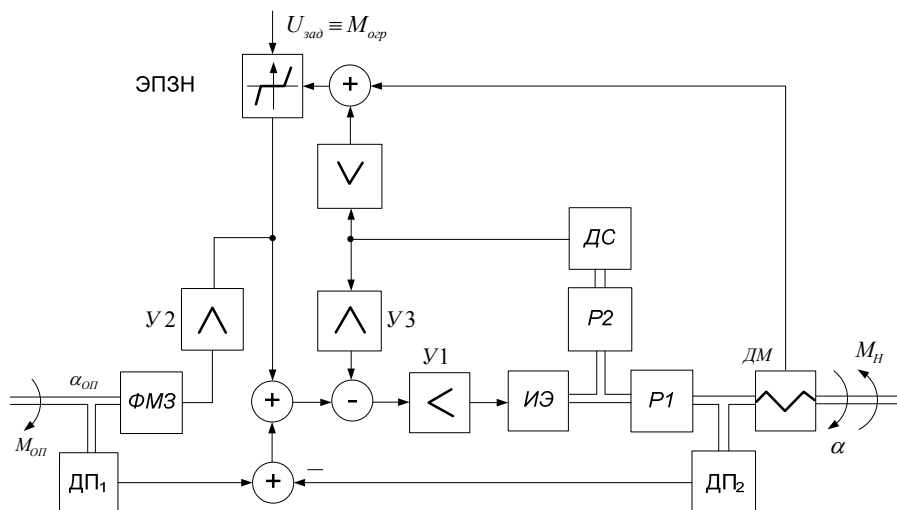


Рис. 4.4. Функциональная схема следящей системы с управляемым дозированием усилий

Система с дозированием усилий [18, 67] – разновидность систем с пассивным отражением усилий – отличается нелинейным воспроизведением усилий и наличием контура регулирования момента, стабилизирующего значение момента двигателя на заданном предельном уровне. Принцип нелинейного воспроизведения усилий исключает необходимость затрат энергии оператора при всех промежуточных значениях усилий, меньших $M_{огр}$, и требует незначительных затрат при достижении $M_{огр}$. Таким образом, сокращение избыточности силовой информации позволяет существенно снизить утомляемость оператора, а возможность автоматического управления силовым воздействием значительно повышает точность системы, состоящей из исполнительной следящей системы с координатой вала штанги ЗУ α_0 и вала штанги МСПС α , тракта отражения усилий, контура регулирования момента и устройства задания значения момента. Исполнительная система каждой штанги состоит из датчиков положения задающей ДП₁ и исполнительной ДП₂ осей, усилителя главной обратной связи $У_1$ и редуктора $Р_1$. Стабилизация системы по скорости осуществляется сигналом датчика скорости ДС через усилитель УЗ. Контур регулирования момента реализует отрицательную обратную связь по моменту. Сигнал датчика момента, пропорциональный значению момента нагрузки M_n , проходит через элемент с переменной зоной нечувствительности (ЭПЗН). Угол наклона его линейных участков определяется коэффициентом жесткости C кинематической передачи данного движения. Выходной сигнал ЭПЗН вычитается из сигнала главной обратной связи исполнительной системы. Для повышения запаса устойчивости системы в режиме «упора» при особом положении сигнал датчика ДМ на входе НЭ складывается с согласованным усилителем $У_3$ сигналом датчика скорости ДС, который через повышающий редуктор $Р_2$ связан с валом ИУ.

Канал отражения усилий, включающий усилитель $У_2$ и фазочувствительный моментный загрузатель ФМЗ, управляется выходным сигналом ЭПЗН при достижении значения, превышающего значение зоны нечувствительности.

Состояние систем ДСД симметричного и несимметричного типа определяется угловыми координатами α_0 для ЗУ и α для ИУ, моментом M_0 , прикладываемым оператором к ЗУ, и моментом M_n , действующим на РО МСПС со стороны ОР. Данные системы относятся к классу двухканальных взаимосвязанных ЭП.

Один из самых сложных вопросов динамики систем ДСД – вопрос определения доминирующей координаты, которая зависит от режима работы системы. В общем случае манипулятор работает по какой-либо комбинации четырех основных режимов [67].

Структурная схема системы ДСД для каждого режима работы отлична от структурных схем для других режимов работы. Следовательно, системы ДСД являются системами ПСУ с переменной структурой. Принципиальное отличие дистанционного ПСУ от систем автоматического ПСУ заключается в том, что формирование или коррекция сигналов позиционного или силового доминирования осуществляется посредством замыкания силовых обратных связей через человека-оператора, который вместе с ЗУ выполняет функции управляющего устройства.

Из анализа структур приводов штанг МСПС с дистанционным и автоматическим ПСУ следует, что базовые структуры приводов штанг исполнительной мехатронной системы и задающих устройств одинаковы. Они представляют собой приводы с главными обратными связями по S при регулировании перемещения, по \dot{S} – при регулировании скорости и по F при регулировании сил и моментов.

Решить задачу создания высокоэффективных дистанционно управляемых МСПС с широкими функциональными возможностями применением динамической коррекции, основанной на введении различных корректирующих звеньев, не всегда возможно, поэтому целесообразно осуществлять нелинейную коррекцию [18, 67], применение которой приводит к изменению принципа естественного, свойственного человеку-оператору, ручного биотехнического управления МР.

Нелинейная коррекция несимметричных систем ДСД возможна как в канале отражения сил, так и управления положением.

Нелинейная коррекция канала отражения сил, осуществляемая с помощью функциональных и логических законов управления, применяется для компенсации влияния нелинейностей, повышения устойчивости, точности и быстродействия отражения сил.

Например, быстродействие отражения усилий можно повысить применением динамической нелинейности вида

$$U = U_{\varepsilon i} - K_1 |U_{\varepsilon i}| \dot{U}_{\varepsilon i} + K_2 \varepsilon_i^2,$$

где U – выходной сигнал регулятора; K_1, K_2 – постоянные коэффициенты; $U_{\varepsilon 1} = U_{\varepsilon} = (U_1 - U_2)$ – сигнал ошибки КОС; $U_{\varepsilon 2} = U_{\varepsilon 3} = (U_{\varepsilon 1} - k_{\text{он}} \alpha_{\text{он}})$ – сигнал ошибки системы с интегрированием моментных и позиционных сигналов; $i = 1, 2, 3$.

Введением статической нелинейности вида

$$U = K_1 (1 + K_2 |U_{\varepsilon i}|) U_{\varepsilon i}$$

можно обеспечить более эффективное воздействие регулятора КОС при большом значении моментной составляющей ошибки $U_{\varepsilon 1}$ и большой запас устойчивости в установившемся режиме.

Возможности обратимых систем ДСД могут быть существенно рас-

ширены применением параметрических законов отражения сил. В этом случае сигнал ошибки U_ε формируется логическим блоком ЛБ (рис. 4.5) и определяется, например, следующими функциями:

$$U_\varepsilon = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall |U_1| \leq \vee > |U_2| \equiv |\dot{\alpha}_{\text{оп}}| \neq 0; \\ 0 \forall |\dot{\alpha}_{\text{оп}}| = 0; \end{cases} \quad (4.1)$$

$$U_\varepsilon = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall \dot{\alpha}_{\text{оп}} \leq \dot{\alpha}_{\text{мин}}; \\ U_1 \forall \dot{\alpha}_{\text{оп}} > \dot{\alpha}_{\text{мин}}; \end{cases} \quad (4.2)$$

$$U_\varepsilon = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall U_1 U_2 < 0 \wedge \dot{\alpha}_{\text{оп}} \leq \vee > \dot{\alpha} \vee U_1 U_2 > 0 \wedge \dot{\alpha}_{\text{оп}} \leq \dot{\alpha}_{\text{мин}}; \\ U_1 \forall U_1 U_2 > 0 \wedge \dot{\alpha}_{\text{оп}} > \dot{\alpha}_{\text{мин}}; \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\text{где } U_1 = k_{\text{ДМ1}} (M_{\text{оп}} + J_{\text{оп}} p^2 \alpha_{\text{оп}}); \quad U_2 = k_{\text{ДМ2}} (M_{\text{н}} + J_{\text{н}} p^2 \alpha_{\text{н}}).$$

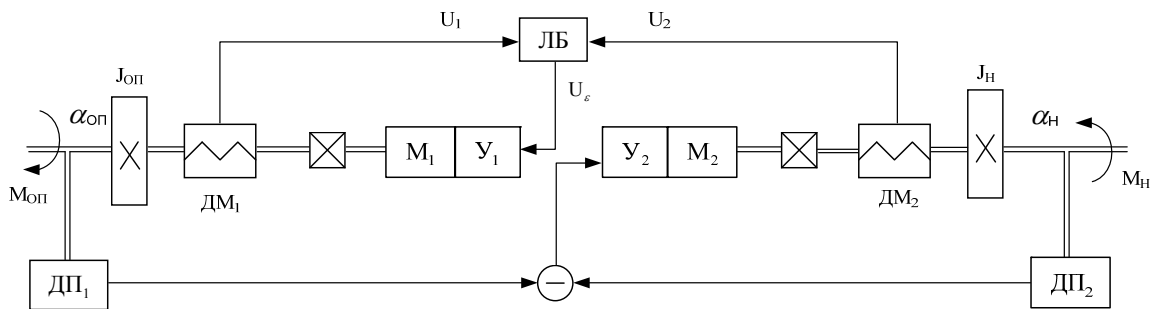


Рис. 4.5. Система ДСД с параметрическим отражением моментов

Минимальное значение скорости перемещения ЗУ $\alpha_{\text{мин}}$ устанавливается оператором. При реализации функции (4.1) во избежании аварийных ситуаций фиксируется положение ЗУ при нулевом значении скорости его перемещения. В остальных случаях оператор ощущает как сопутствующие, так и противодействующие моменты.

Нетрудно видеть, что при реализации управляющим устройством логической функции (4.2) оператор ощущает как сопутствующие, так и противодействующие моменты (если скорость движения ЗУ меньше или равна некоторому минимальному значению $\alpha_{\text{мин}}$). При перемещении ЗУ со скоростями, превышающими $\alpha_{\text{мин}}$, оператор не ощущает отраженных моментов.

Если реализуется функция (4.3), то оператор ощущает отраженные противодействующие моменты только при малых скоростях и выполняет операции типа «опускание верхней платформы» без ощущения отраженных моментов при больших скоростях.

Параметрическое отражение сил и моментов может осуществляться блоками не только в функции скорости перемещения ЗУ, но и в функции,

например, развиваемых моментов, расстояния от верхней платформы до объекта работ и т.д.

Как уже отмечалось, при соприкосновении штанги или верхней платформы с упругим односторонним упором в системе ДСД могут возникнуть колебательные движения, которые устраняют уменьшением скорости движения штанги или уменьшением добротности моментного загрузателя. Однако в первом случае ухудшается динамика мехатронной системы, а во втором – снижается точность отражения усилий.

Свойство полной обратимости системы управления при выполнении ряда операций затрудняет работу оператора и вызывает быстрое его утомление. Примером таких операций могут служить периодически повторяющиеся операции длительного удержания подвижной платформы с объектом, например БЛА в неподвижном положении, особенно при действии внешних активных и потенциальных сил и моментов.

Наиболее простой путь повышения эффективности работы МСПС с копирующим управлением при выполнении операций, связанных с длительным удержанием объекта манипулирования в неподвижном положении или активном действии со стороны ОР, – применение в КОС и КУП обратимой системы ДСД самотормозящихся механических передач, выполняющих роль нелинейных корректирующих устройств с использованием неизменяемой части системы путем перестройки ее структуры. Несимметричные системы ДСД с СМП в КОС и КУП относятся к необратимым системам [18, 67].

Однако при силомоментном воздействии нагрузки на отдельную штангу или подвижную платформу возможно нарушение необратимости системы вследствие того, что СМП могут терять свои свойства самоторможения, ограниченной жесткости кинематических звеньев МСПС и зазоров как в этих звеньях, так и в измерительной системе мехатронной системы. Необходимое условие создания необратимых систем ДСД несимметричного типа – применение не только СМП, но и нелинейного корректирующего устройства, формирующего с помощью логического блока ЛБ (см. рис. 4.5) нелинейный (логический) закон отражения сил и моментов:

$$U_{\varepsilon} = \Psi(U_1, U_2) = \begin{cases} (U_1 - U_2) \forall |U_1| > |U_2| \wedge 0 < U_1 U_2 < 0; \\ 0 \forall |U_1| \leq |U_2|. \end{cases} \quad (4.4)$$

При выполнении работ в частично или полностью неопределенной обстановке возникает необходимость в использовании систем управления, сочетающих в себе свойства обратимых и необратимых систем. Такие системы реализуются в классе систем с переменной структурой.

Они получили название двухрежимных или комбинированных [18, 67] систем ДСД (рис. 4.6).

Логический блок при автоматическом переключении структуры рабо-

тает в двух режимах: в первом режиме, когда реализуется обратимая система, обеспечивается алгебраическое суммирование сигналов U_1 и U_2 , а во втором режиме – реализуются логические функции вида (4.4) и (4.5). При ручном управлении изменение структуры осуществляет оператор с помощью ключевого элемента.

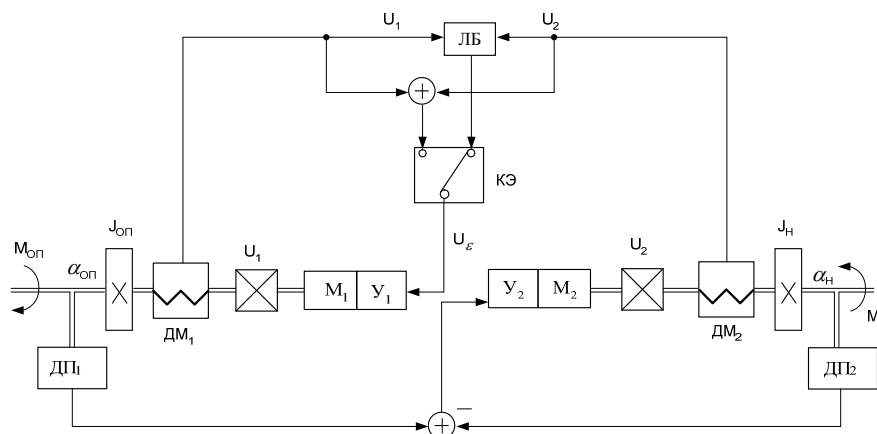


Рис. 4.6. Двухрежимная система ДСД

Число режимов работы систем ДСД в общем случае определяется не только направлениями движения (от ЗУ к ИУ и наоборот), но и количеством видов отраженных моментов.

Например, необратимая система ДСД с отражением противодействующих моментов может быть тоже отнесена к двухрежимным системам, т.к. в ней сочетаются два вида отраженных моментов – отражение противодействующих моментов и отсутствие отражения моментов. Так как существует множество видов отраженных моментов, то системы ДСД могут быть и двухрежимными, т.е. системами, в которых сочетаются в различных комбинациях отражение сопутствующих, противодействующих, параметрически дозированных, непрерывных и дискретных, активных и пассивных моментов. Выбор вида отражения моментов определяется назначением МСПС.

Переключение многорежимных систем ДСД, классифицированных по принципу отражения моментов, осуществляется автоматически, а систем, классифицированных по количеству направлений движения, – оператором.

§ 4.2. Системы полуавтоматического управления движением и ориентацией подвижной платформы мехатронной системы⁶

В качестве ЗУ, позволяющего формировать траекторию движения подвижной платформы МСПС посредством сигналов управления перемеще-

⁶ Параграф написан совместно с кандидатом технических наук Казым Хуссейном Т. (республика Ирак).

нием и скоростью перемещения, используют пространственную мышшь 3Dconnexion (рис. 4.7). Схема формирования траектории представлена на рис. 4.8.

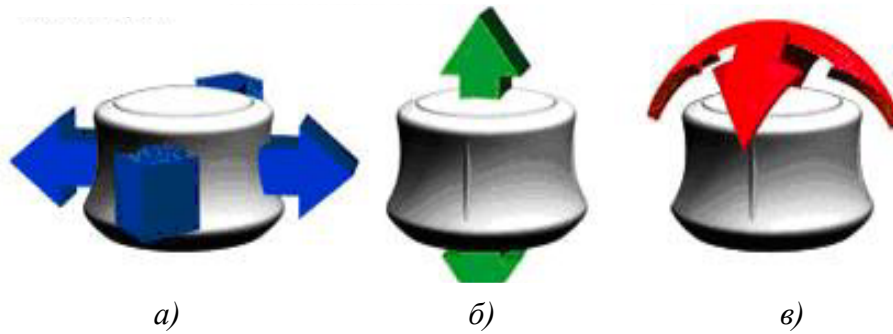


Рис. 4.7. Изменение направления движения, масштаба изображения и вращения модели: а – навигация; б – изменение масштаба; в – вращение

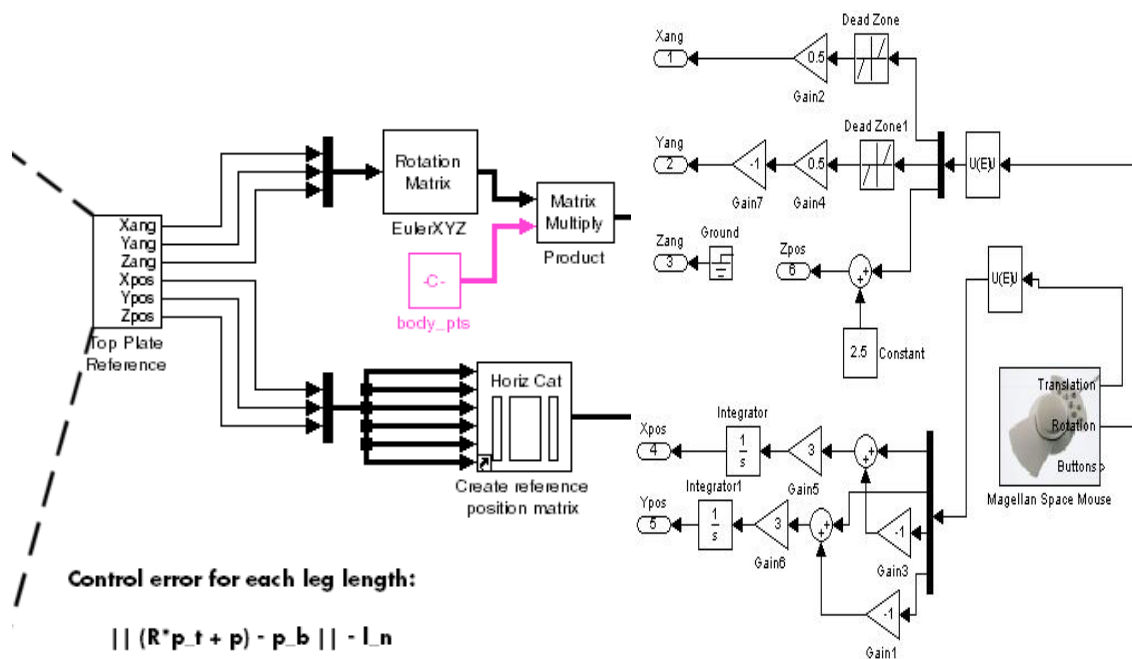


Рис.4.8. Схема формирования траектории движения с помощью пространственной мыши Magellan Space Mouse

Особенность систем полуавтоматического ПСУ одностороннего действия – замыкание корректирующих связей через управляющую ЭВМ.

Так, например, в системе, показанной на рис. 4.9 [18, 20, 25], подпру-

жиненная рукоятка задает модуль вектора скорости β_1 РО. Обратная связь формируется в виде зависимости

$$\Psi(F_N, \dot{S}) = F_N \|\dot{S}\| \cos(F_N \wedge \dot{S}),$$

где F_N – главный вектор внешних сил, приложенных к РО.

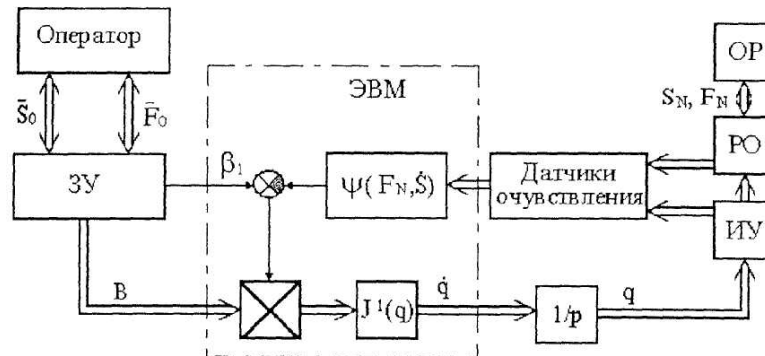


Рис. 4.9. Структурная схема системы полуавтоматического ПСУ одностороннего действия: $B = [\beta_2 \beta_3 \beta_4]$ – вектор угловых координат ЗУ

Тогда алгоритм работы полуавтоматической системы ПСУ одностороннего действия может быть записан в следующем виде:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)[\beta_1 - \Psi(F_N, \dot{S})]B.$$

Управление МСПС от рукоятки малых перемещений позволило распространить принцип управления с активным отражением сил, применяемый в мехатронных системах с копирующим управлением, на мехатронные системы с полуавтоматическим управлением [18, 26, 67, 78, 124]. Функциональные системы ДСД при полуавтоматическом управлении могут быть представлены в виде, показанном на рис. 4.10.

Обобщенная структурная схема сепаратной моментно-скоростной системы (МСС) ДСД симметричного типа показана на рис. 4.10, а. Данная система представляет собой сочетание двух взаимосвязанных систем, первая из которых, расположенная на стороне оператора, замкнута по положению, вторая, расположенная на стороне нагрузки, – замкнута по скорости.

Вторая разновидность МСС ДСД – системы несимметричного типа. В этих системах моментный загрузочный элемент замкнут не только по моменту, как в копирующих системах ДСД, но и по положению. Такое включение придает ему свойства «электрической пружины» и обеспечивает малые перемещения выходного вала. Сигнал, пропорциональный этому перемещению, подается на вход замкнутой по положению системы на стороне нагрузки через интегратор, в результате чего и достигается управление скоростью выходного вала исполнительной системы.

Исполнительная часть МСС ДСД несимметричного типа может быть построена по аналогии с исполнительной частью МСС ДСД симметричного типа, однако, вариант с интегратором и замкнутым по положению приводом (рис. 4.10, б) более предпочтителен, так как это исключает «просадку» системы при отсутствии управляющего сигнала на выходе интегратора.

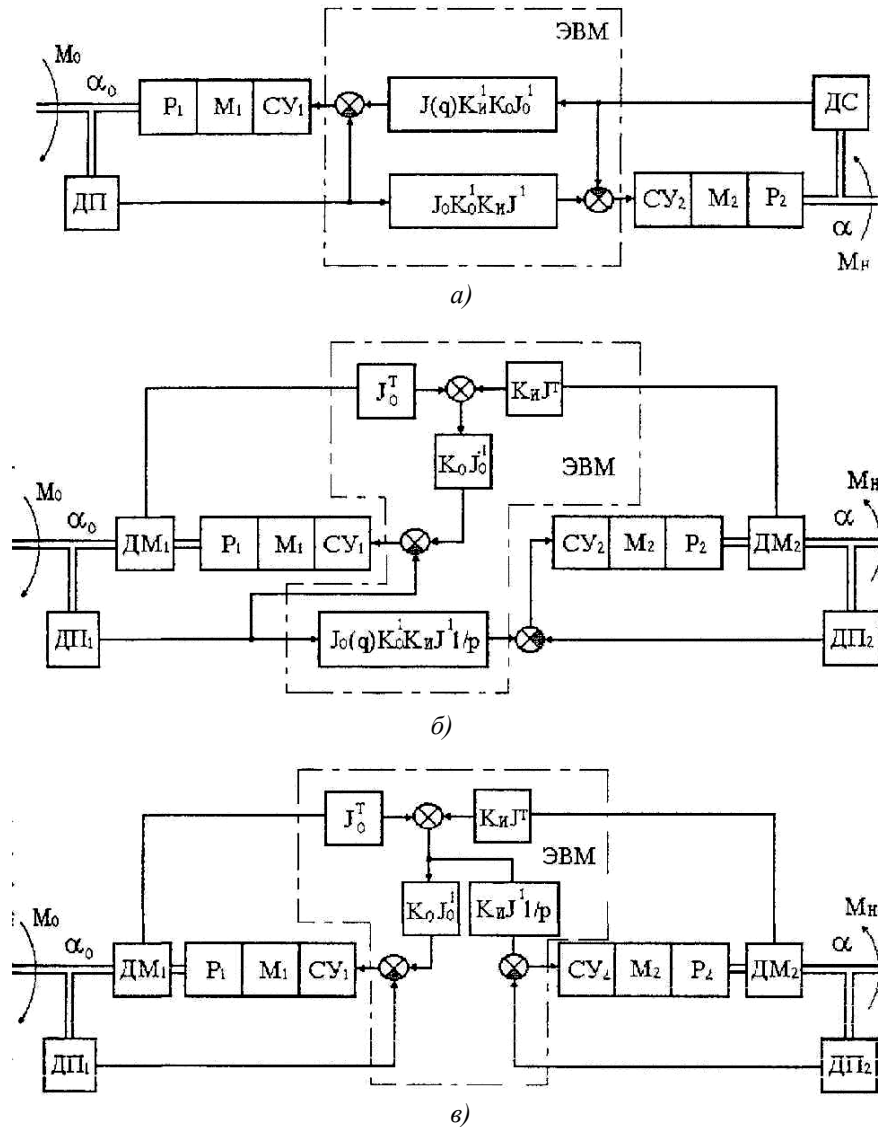


Рис. 4.10. Функциональные схемы систем ДСД при полуавтоматическом управлении МСПС: а – МСС ДСД симметричного типа; б – МСС ДСД симметричного типа с интегратором и замкнутым по положению приводом; в – МСС ДСД несимметричного типа ; J, J_0 матрицы Якоби; K_0, K_1 – диагональные матрицы коэффициентов пропорциональности

Третья разновидность МСС ДСД – система (рис. 4.10, в), в которой моментный загрузчик строится по аналогии с моментным загрузчиком МСС несимметричного типа. Входным сигналом для исполнительной системы в данном случае является сигнал, пропорциональный интегралу от разности моментов, приложенных к задающему и исполнительному валам.

Применение дистанционного полуавтоматического управления пространственной МСПС реализовано как управление математической моделью платформы Стюарта от 3D-пространственного задающего устройства с шестистепенным оптическим датчиком. Математическая модель реализована в программной среде Solidworks, SimMechanics и Simulink (рис. 4.11).

Для того чтобы формировать модель SimMechanics, необходимо определить инерционные свойства и связи в каждой степени свободы. Эта сложная процедура, особенно для тел с комбинированными геометрическими формами, может быть упрощена при помощи инструмента SolidWorks.

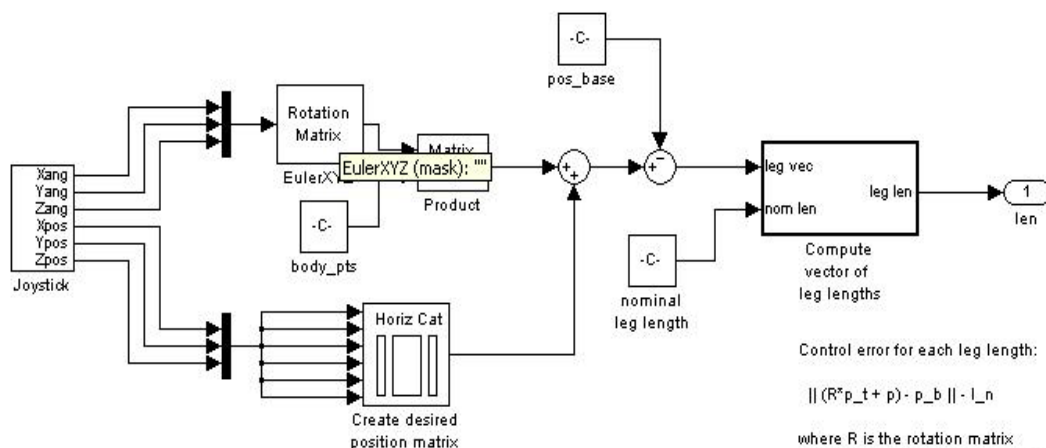


Рис. 4.11. Simulink-модель платформы Стюарта

Эта процедура может быть очень трудна для тел с комплексными геометрическими формами, однако, процесс может быть упрощен при помощи инструмента SolidWorks.

Модель механической конструкции МСПС была представлена на рис. 3.14. Инерционные параметры и координаты соединений для каждой штанги и платформы были определены автоматически, когда модель CAD была импортирована в MATLAB/SIMULINK среду. В качестве входов модели применяются обобщенная сила, позиция, скорость, или ускорение.

Платформа Стюарта имеет две модели: SimMechanics-модель (см. рис. 3.14) и Simulink-модель (см. рис. 4.11).

Ручное управление непосредственно доступно через интерфейс ручки управления, в то время как автоматическое управление требует, чтобы пользователь обеспечил соответствующий М-файл. Программное обеспечение использует синусоидальные функции, чтобы определить вращательные и поступательные степени свободы. Возможно осуществление другой опорной траектории при замене этих рекомендаций другими функциями или блоками. Траекторный блок системы берет шесть степеней свободы, вычисляет эквивалентное вращение, матрицы позиции и векторы длин для шести штанг. Другими словами, возможно создание траектории подвижной платформы в реальном масштабе времени. Блок-схема управления представлена на рис. 4.11 и 4.12.

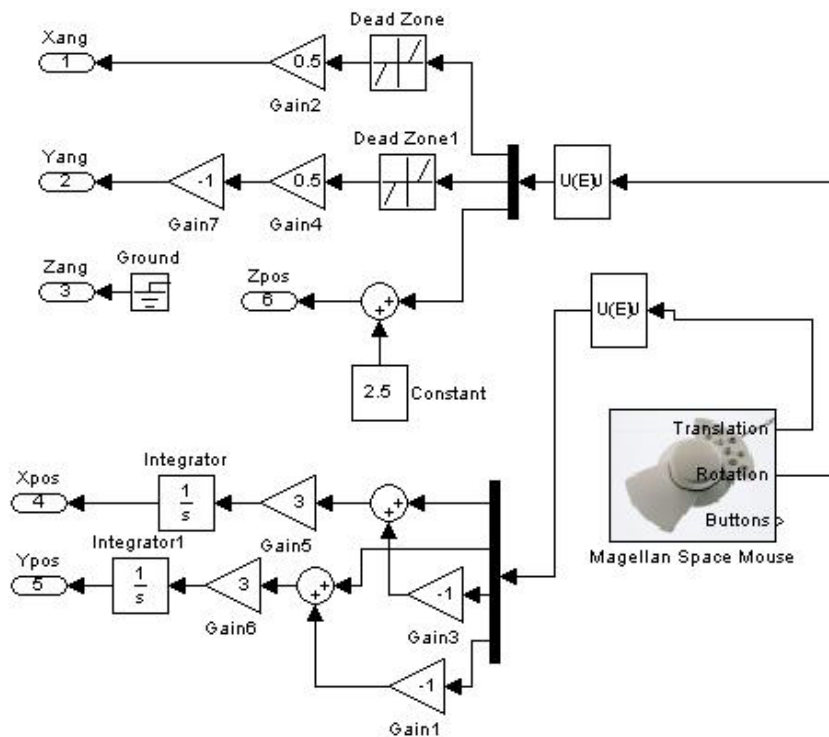


Рис. 4.12. Структура системы управления с пространственной мышью

Возможность исследования траектории платформы в реальном масштабе времени представлена на рис. 4.13.

Платформа перемещается согласно действиям оператора с 3D-мышью. Силы, ошибки и позиция верхней платформы изменяются одновременно. Усилие этой симуляции в реальном масштабе времени приводит к тому, что мы можем находить пределы перемещения платформы и

корректировать управление, оценивая входы в зависимости от реакции подвижной платформы. Это позволяет экономить время вычислений и моделирования.

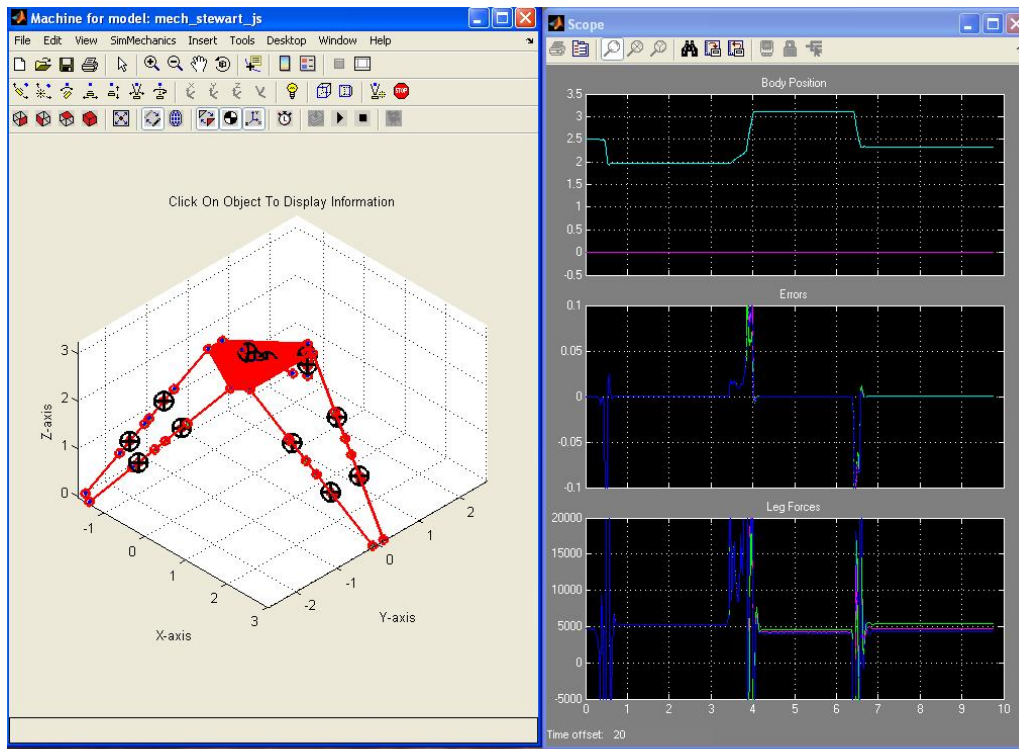


Рис. 4.13. Визуализация полуавтоматического управления моделью платформы Стюарта

Визуализация платформы Стюарта

При создании физического объекта и регулятора параметры определены в стандартных блоках. Кроме того, геометрия, массовые свойства и инерция используются как переменные в этих блоках, которые определены в алгоритм. Управление этим файлом вызывает геометрические и массовые свойства исходного состояния. Другими словами, модель использует этот алгоритм как функцию предварительной нагрузки, чтобы инициализировать с правильными значениями.

Алгоритм, во-первых, определяет систему внешней координаты и основные части платформы. После приведения внешней системы координат к центру платформы определяются точки соединения на базе и подвижной платформе. Во-вторых, определяются радиусы базы и подвижной платформы, их исходного положения и векторов штанг. Другими словами, ал-

горитм определяет центр тяжести тринадцати движущихся объектов, их радиус-векторы и массы движущихся частей платформы.

Особенности визуализации SimMechanics делают возможным видеть движение платформы в различных координатных плоскостях. Окно использует массовые и геометрические свойства, определенные в соответствующем алгоритме (рис. 4.14).

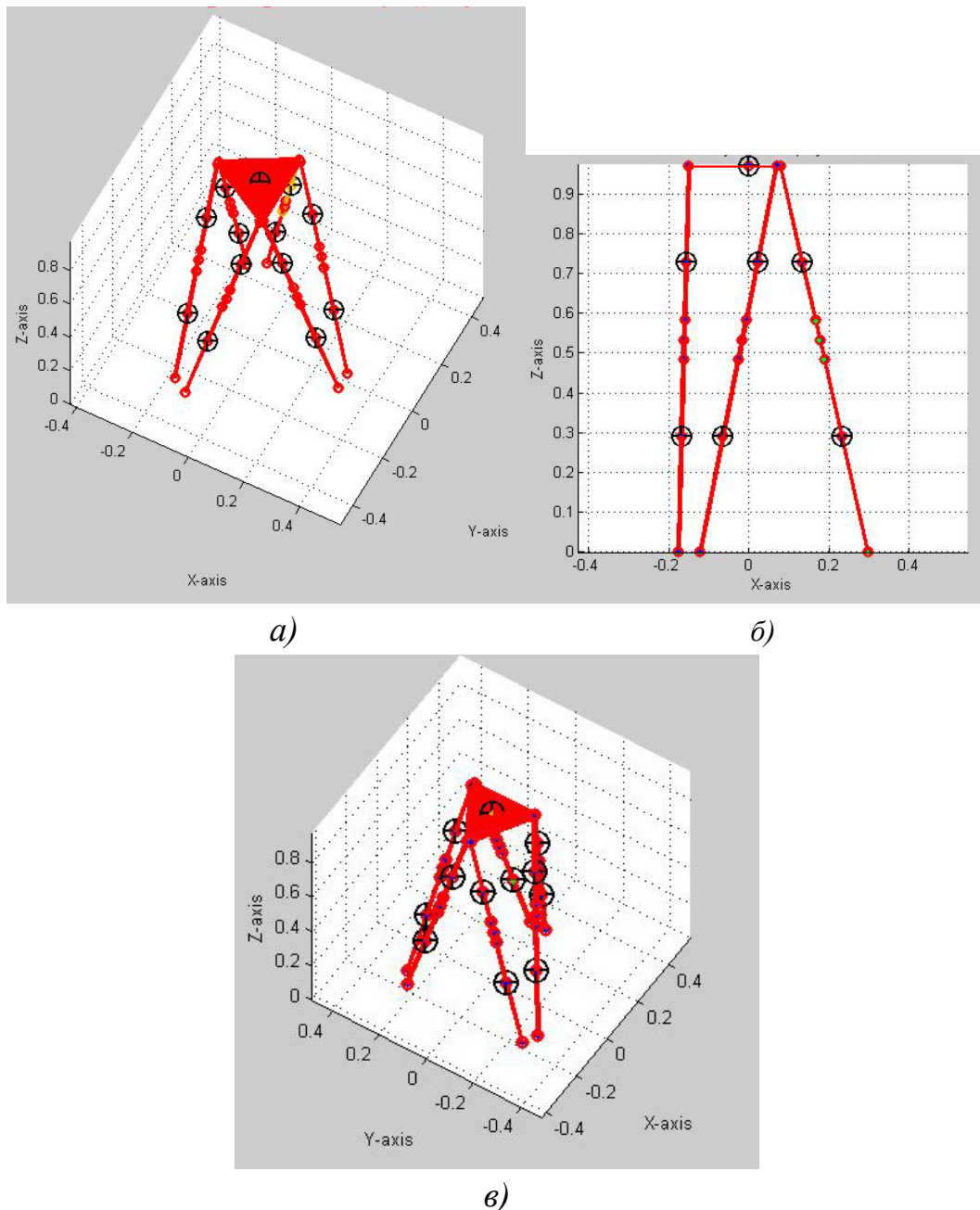


Рис. 4.14. Моделирование углов вращения платформы Стюарта: а, в – движение в трех мерном пространстве; б – движение в плоскости

Выделением центров тяжести черными кругами с плюсом внутри (см. рис. 4.14) визуализируются нижние и верхние части штанг, верхняя подвижная платформа. Однако, если моделируются пространственные движения механической системы, наибольшей наглядностью в представлении результатов будет обладать трехмерная анимация. Указанный способ визуализации пространственных перемещений механической системы, обладающей большим количеством степеней свободы, позволяет качественно оценить все ее перемещения в комплексе, интуитивно сделать вывод о степени адекватности модели объекту моделирования.

Реализация моделирования движения платформы Стюарта

Для управления движения платформы с шестью степенями подвижности в реальном времени используют два компьютера. На бортовом компьютере выполняется измерение входных и выходных сигналов, контролируется безопасность системы и формируется алгоритм, управляющий шестью ЭП штанг. Второй, главный, компьютер связан с бортовым компьютером посредством кабеля. На нем решается обратная задача кинематики, производится формирование траектории движения платформы, интерфейса оператора, моделирование шести ЭП, регистрации экспериментальных данных, записи экспериментальных данных на диск. В качестве операционной системы управления в реальном времени целесообразно использовать средства Windows NT server как. Архитектура клиент-сервер (Windows NT server) поддержка многоплатформенности и многопроцессорности до 4 процессоров максимум -32 процессора. Программа Simulink, являющаяся приложением к пакету программы MATLAB, установлена на главном компьютере. С помощью этой программы можно моделировать процесс управления шестью ЭП МСПС.

Для управления движением пусковой установки с шестью степенями подвижности в реальном времени предлагается структура программного обеспечения, представленная на рис. 4.15.

Алгоритмы, с помощью которых реализуется управление платформой, сложные. Например, вычисление коэффициентов регуляторов шести электроприводов подразумевает решение системы нелинейных алгебраических уравнений со многими переменными. Для того чтобы обеспечить высокую точность временных параметров процессов управления в реальном времени, необходимо разделить задачи, решаемые в процессе управления, на несколько групп. Для этого можно выбрать промышленный компьютер системы с шестью слотами как бортовой компьютер.

В каждом слоте можно поставить процессор и регулятор для каждого ЭП. Оформление каждой задачи в виде отдельного процесса позволяет уменьшить степень неконтролируемого влияния решаемых задач управления друг на друга и дает возможность одновременно осуществлять процессы управления шестью приводами. При этом на бортовом компьютере производится опрос датчиков, управление системой шести приводов платформы, сбор и обработка информации от датчиков.

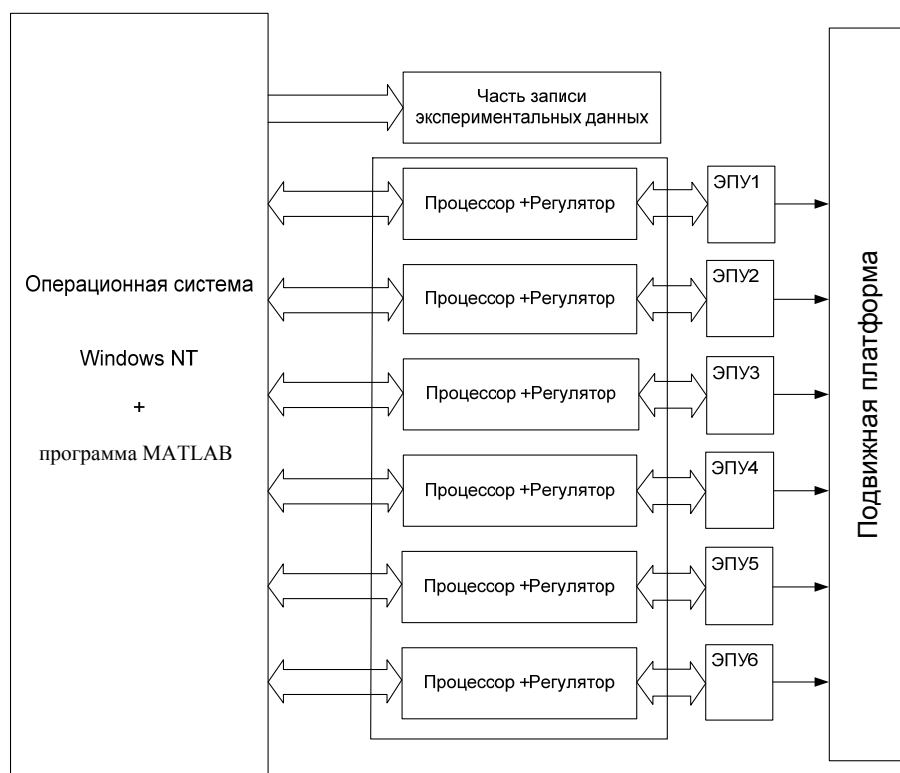


Рис. 4.15. Структура программного обеспечения системы управления движением платформы в реальном времени

Эффективность дистанционного копирующего или полуавтоматического управления пространственными МСПС при управлении в особых положениях или выполнении сложных операций в условиях нестационарности и неопределенности взаимодействия с внешней средой может быть существенно повышена применением принципа дистанционно-автоматического управления.

В этом случае, параллельно с процессом распознавания человеком-оператором ситуации, например особого положения, и принятия им решения осуществляется программная поддержка в виде автоматического преобразования координат и формирования соответствующих управляющих сигналов на исполнительном уровне.

Реализация концепции пространственной МСПС, работающей в копирующем или полуавтоматическом режимах с использованием принципа дистанционно-автоматического управления (рис. 4.16) подразумевает силовомомментное очувствление мехатронной системы посредством наблюдателя силы и силовомомментного датчика СМД.

При посадке БЛА оператор с помощью ЗУ ориентирует посадочное устройство для контакта с аппаратом. Подвижная платформа после контакта, когда точка С совпадает с эквидистантной ($S = 0$) (рис. 4.17) совершает в автоматическом режиме перемещение вдоль оси X на величину $\Delta x = \delta_r / 2$ до тех пор, пока не произойдет сопряжение аппарата с посадочным конусом (см. рис. 1.14, а).

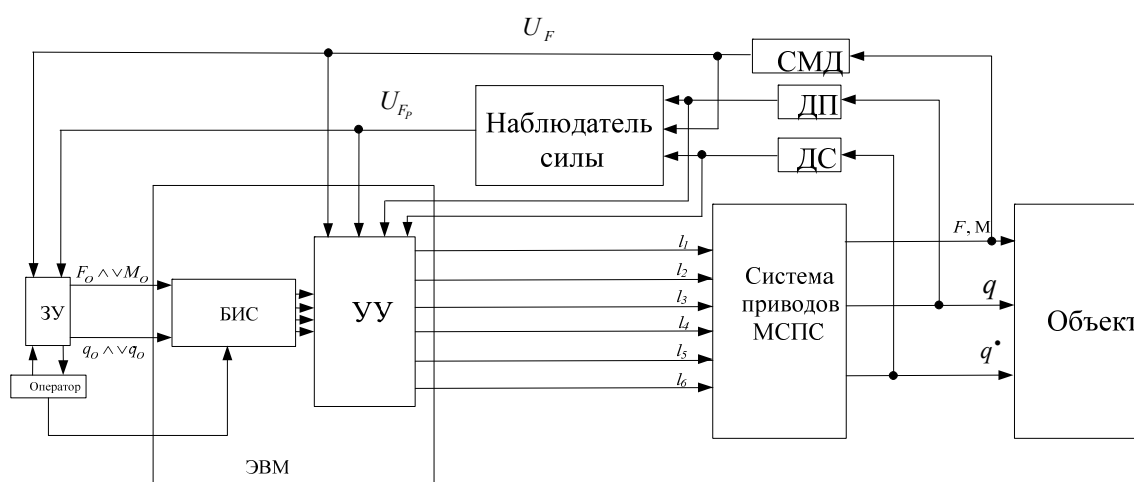


Рис. 4.16. Структурная схема системы дистанционно-автоматического управления пространственной МСПС

При организации программного движения с линейной интерполяцией по методу оценочной функции вдоль некоторой предварительно определенной эквидистанты (смещенной фаски) АВ (см. рис. 4.17) первоначально осуществляется установочное перемещение БЛА до контакта вдоль оси Z . Так как во время поисковых движений подвижной платформы контролируются перемещение объектов и возникающие силы, то управляющие сигналы для ЭП по оси X и Z равны:

$$U_x = \begin{cases} U_0 \quad \forall S < 0; \\ 0 \quad \forall S > 0; \end{cases}$$

$$U_y = \begin{cases} 0 \quad \forall S < 0 \wedge U_x \neq 0; \\ U_g \quad \forall S < 0 \wedge U_x = 0, F_z \geq F_g; \\ U_0 \quad \forall S > 0 \wedge F_g, \end{cases}$$

где U_g – управляющий сигнал, определяющий допустимое значение силы контакта F_g .

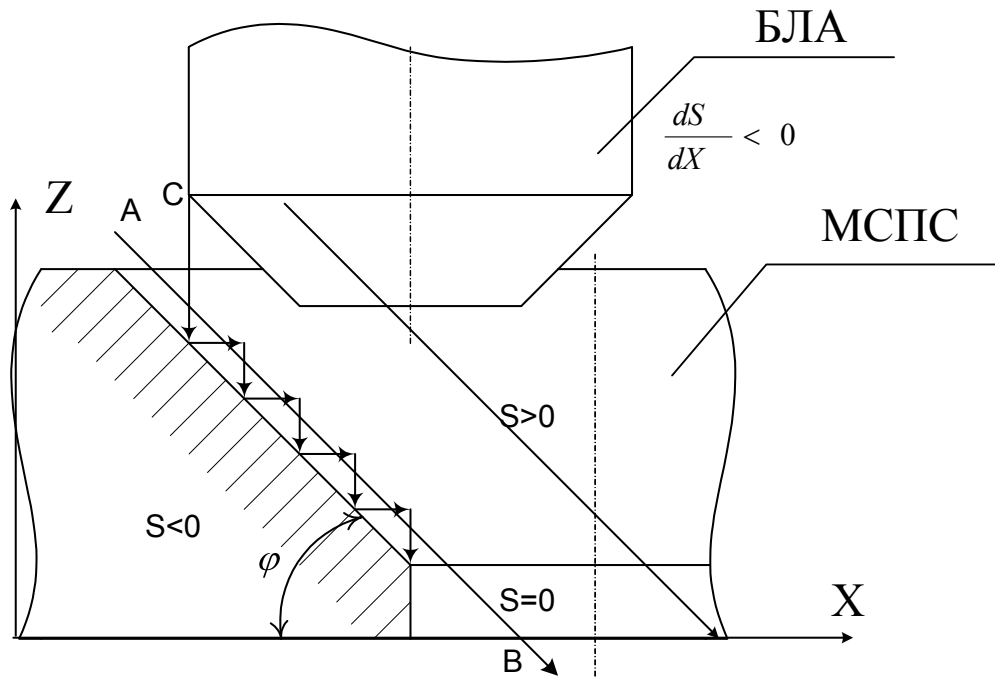


Рис. 4.17. Схема перемещения объекта (БЛА) относительно поверхности посадочного конуса

Переход с управления по перемещению на управление по силе происходит в момент касания объектов в соответствии с блок-схемой алгоритма, изображенной на рис. 4.18.

Предположим, что центры сопрягаемых объектов совпадают в плоскости XOZ . Тогда платформа осуществляет движение вдоль оси X с постоянной скоростью V_x , а БЛА – вдоль Z , прижимаясь с постоянной силой, преобразует неудерживающую связь в удерживающую.

Реализовать движение вдоль этой прямой с линейной интерполяцией по методу оценочной функции непосредственно не удастся ввиду того, что переход в область $S < 0$ невозможен из-за действия голономной связи, поэтому управляющие сигналы на ЭП по осям X и Z формируются в соответствии с блок-схемой алгоритма (рис. 4.19) следующим образом:

$$U_x = \left\{ \begin{array}{l} U_0 \quad \forall S \geq 0 \wedge F_x = 0, U_z = 0; \\ -U_0 \quad \forall S \geq 0 \wedge F_x \neq 0, U_z = 0; \\ 0 \quad \forall U_z \neq 0; \end{array} \right\} : \Delta x \leq \frac{\delta_r}{2}$$

$$U_z = \left\{ \begin{array}{l} U_0 = \Delta x \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \forall S > 0 \wedge F_z = 0; U_x = 0; \\ U_g \quad \forall S = 0 \wedge F_z \neq 0, U_x = 0; \\ 0 \quad \forall S \geq 0 \wedge F_z = 0, U_x \neq 0, \end{array} \right.$$

где δ_r – гарантированный зазор, φ – угол наклона фаски.

Дополнительное движение вдоль оси Z совершается подвижной платформой пусковой МСПС.

Если центры БЛА и посадочного конуса с направляющей фаской не совпадают по осям X и Y , то в автоматическом режиме платформа осуществляет поисковые движения в горизонтальной плоскости согласно алгоритму, аналогичному представленному на рис. 4.19, при условии двухрежимного управления приводами горизонтального перемещения дополнительной технологической платформы 4 (см. рис. 1.14, б):

$$U_x = \left\{ \begin{array}{l} U_0 \quad \forall S < 0 \wedge F_x = 0; \\ -U_0 \quad \forall S < 0 \wedge F_x \neq 0; \\ \left. \begin{array}{l} F_g \quad \forall S > 0 \wedge F_x = 0; \\ -F_g \quad \forall S > 0 \wedge F_x \neq 0; \end{array} \right\} \vee 0 \quad \forall S < 0; \end{array} \right.$$

$$U_y = \left\{ \begin{array}{l} U_0 \quad \forall S > 0 \wedge F_y = 0; \\ -U_0 \quad \forall S > 0 \wedge F_y \neq 0; \\ \left. \begin{array}{l} F_g \quad \forall S < 0 \wedge F_y = 0; \\ -F_g \quad \forall S < 0 \wedge F_y \neq 0; \end{array} \right\} \vee 0 \quad \forall S > 0. \end{array} \right.$$

Если для реализации алгоритма применяют позиционные ЭП, то они должны обладать регулируемой податливостью (импедансное управление) или возможностью адаптации позиционного управляющего сигнала в функции реакций связей на основе применения устройства идентификации связей или эталонных моделей. Возможно применение ЭП с одновременной адаптацией податливости и позиционного управляющего сигнала.

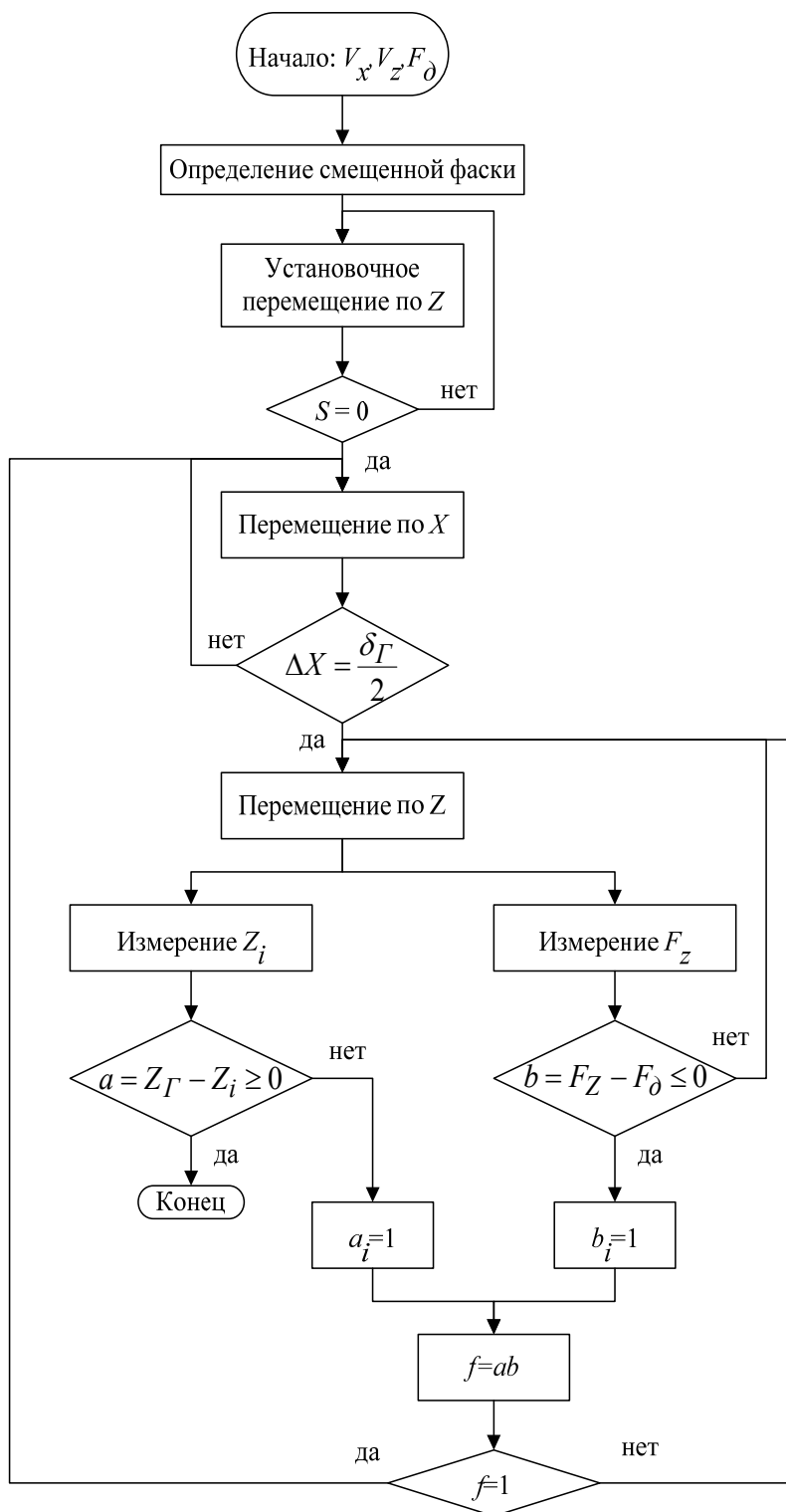


Рис. 4.18. Блок-схема алгоритма сопряжения БЛА с посадочным конусом при линейной интерполяции смещенной фаски по методу оценочной функции

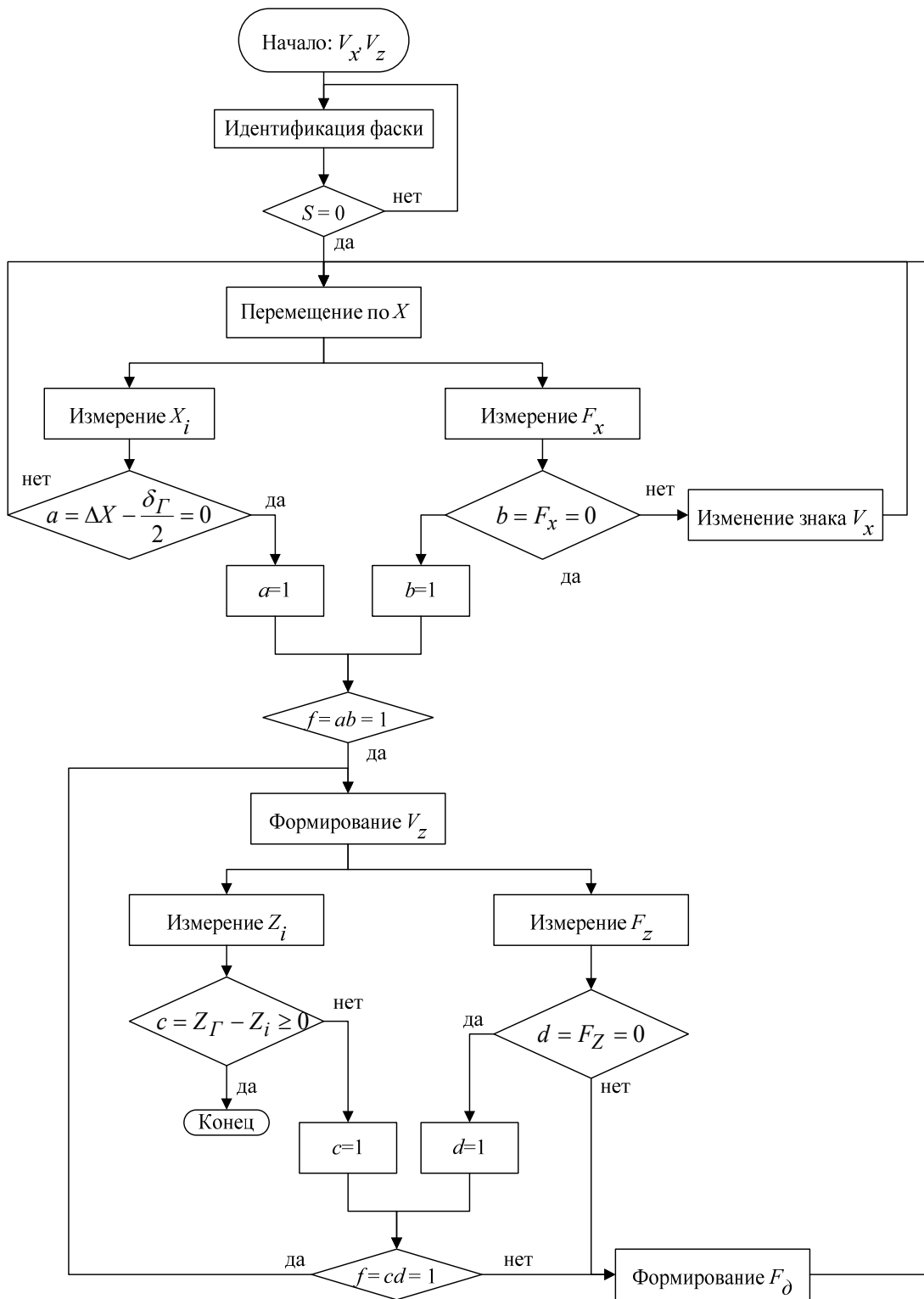


Рис. 4.19. Блок-схема алгоритма сопряжения БЛА с посадочным конусом пускового стола с дополнительной технологической платформой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены новые области применения робототехнических и мехатронных устройств с силомоментным очувствлением: лазерная обработка; монтажно-сборочные операции с субтильными объектами; обеспечение вертикального старта и посадки беспилотных летательных аппаратов с несущим винтом; мобильные колесные роботы для трубопроводов с переменным поперечным сечением.

Предложены алгоритмы ПСУ как с разрывным (переключение каналов позиционный или силовой), так и с непрерывным управлением (формирование обоих составляющих в одном сигнале), отмечены особенности применения их для технологических процессов с начальной геометрической неопределенностью и ограничениями со стороны физических свойств объекта работы и внешней среды.

Показано, что исходя из необходимости обеспечения высокой точности функционального управления перемещением и ориентацией выходного звена базовой компоненты манипуляционных систем в трехмерном рабочем пространстве, жесткости и компактности устройств при действии динамических нагрузок целесообразно применение механизмов с параллельной структурой (МСПС). Система управления таких мехатронных устройств должна обеспечивать траектории движения выходного звена с учетом необходимости обхода особых положений и позиционно-силового взаимодействия с объектом работы.

Рассмотрено структурно-алгоритмическое обеспечение дистанционно-автоматического (копирующего и полуавтоматического) управления функциональным движением пространственной МСПС в зоне особых конфигураций и действия внешних связей. Предложена методика кинематического и силового анализа пространственной МСПС с учетом его особых конфигураций в Solidworks, SimMechanics и Matlab-программной среде.

Показано применение ПСУ для декомпозиции системы управления и пространства состояний лазер-роботов, компенсации динамического взаимовлияния посредством глобальной силовой обратной связи, моментной

разгрузки ИУ, юстировки зеркал системы транспортировки излучения и непосредственного управления технологическим процессом лазерной обработки.

Рассмотрена возможность повышения эффективности управления технологическими роботами при выполнении операций сборки перемещающихся цилиндрических объектов с гарантированным зазором за счет применения визуальных алгоритмов идентификации базовой детали, положения и скорости ее перемещения и слежения за её перемещением робота, осуществляющего позиционно-силовое управление процессом сопряжения деталей.

В работе предложены алгоритм и структура адаптивной системы позиционно-силового управления движением мобильного колесного робота в условиях действия внешних связей, переменности геометрии и диаметра внутренней поверхности трубопровода с обеспечением отсутствия проскальзывания колесной системы робота.

Приведены математические модели исполнительных электроприводов, включающие нелинейные и особые звенья сингулярных конфигураций и неидеальных связей. Проведенный анализ исполнительных электроприводов с ПИД-регулированием, робастным и нечетким управлением показал эффективность применения систем приводов с силомоментным участием и переменной структурой.

**Авторские свидетельства по системам управления и приводам
роботов**

1. А.с. 368020 СССР, МКИ В 25J 1/00. Система управления дистанционным копирующим манипулятором / И.Н. Егоров, Е.И. Кубарев, В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, А.А. Пакин (СССР).

2. А.с. 875331 СССР, G 05 В 11/00 В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / А.А. Кобзев, И.Н. Егоров, В.Н. Кравченко [и др.] (СССР).

3. А.с. 881777 СССР, МКИ G06G 7/48. Устройство для моделирования механической передачи / И.Н. Егоров, В. Е. Шавловский, А.А. Назаров (СССР).

4. А.с. 907745 СССР, Н 02 Р 5/00. Электропривод / И.Н. Егоров, Н.Г. Рассказчиков, В.П. Умнов (СССР).

5. А.с. 917289 СССР, Н 02 Р 5/06. Электропривод / А.А. Кобзев, И.Н. Егоров (СССР).

6. А.с. 930228 СССР, G 05 В 11/00 В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным манипулятором / И.Н. Егоров, В.Н. Кравченко (СССР).

7. А.с. 989534 СССР, G 05 В 11/00 В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / Н.А. Лакота, В.Н. Кравченко, И.Н. Егоров (СССР).

8. А.с. 993198 СССР, G 05 В 11/00 В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным манипулятором / И.Н. Егоров, В.Н. Кравченко, Н.А. Лакота (СССР).

9. А.с. 1075233 СССР, G 05 В 19/00. Устройство для управления сборочным роботом / А.А. Кобзев, И.Н. Егоров, В.Н. Кравченко [и др.] (СССР).

10. А.с. 1091115 СССР, G 05 в 11/00. Устройство для управления сборочным роботом / В.Н. Кравченко, И.Н. Егоров, Н.А. Лакота (СССР).

11. А.с. 1101786 СССР, В 11/00. Устройство для управления манипулятором / И.Н. Егоров, Н.А. Новикова, А.Г. Рябов (СССР).

12. А.с. 1151924 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления сбо-

- рочным роботом / И.Н. Егоров, А.А. Кобзев, А.А. Горчаков (СССР).
13. А.с. 1174952 СССР, МКИ G06G 7/48. Устройство для моделирования механической передачи / И.Н. Егоров А.А. Назаров (СССР).
14. А.с. 1200242 СССР, G 05 В 19/00. Устройство для управления сборочным роботом / В.П. Дорохов, И.Н. Егоров, В.А. Немонтов (СССР).
15. А.с. 1229719 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления манипулятором / И.Н. Егоров, Н.Г. Рассказчиков (СССР).
16. А.с. 1234807 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления копирующим манипулятором / И.Н. Егоров, Р.С. Вишняков (СССР).
17. А.с. 1240559 СССР, МКИ В 24 В 51/00. Устройство поддержания мощности при обработке абразивным кругом / В.Л. Афонин, А.Ф. Жаббаров, В.А. Годзиковский, И.И. Лифанов, Н.Г. Рассказчиков (СССР).
18. А.с. 1247839 СССР, G 05 В 19/00. Устройство для управления сборочным роботом / И.Н. Егоров, В.Н.Кравченко (СССР).
19. А.с. 1262447 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления копирующим манипулятором / И.Н. Егоров, Н.А. Новикова, А.Г. Рябов (СССР).
20. А.с. 1264137 СССР, МКИ G 05 В 11/00. Устройство для управления промышленным роботом / И.Н. Егоров, А.А. Кобзев, Ю.Е. Мишулин, Н.Г. Рассказчиков (СССР).
21. А.с. 1277065 СССР, G 05 В 13/00. Самонастраивающаяся система управления / И.Н. Егоров, А.А. Назаров, А.А. Кобзев [и др.] (СССР).
22. А.с. 1290247 СССР, G 05 В 11/00. Устройство для управления манипулятором / И.Н. Егоров, Р.С. Вишняков (СССР).
23. А.с. 1315297 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / В.Н. Кравченко, И.Н. Егоров (СССР).
24. А.с. 1321582 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления манипулятором / И.Н. Егоров, Р.С. Вишняков (СССР).
25. А.с. 1352262 СССР, G 01 L5/16, 1/12. Динамометрический датчик / И.Н. Егоров, В.А. Шахнин, В.Г. Запускалов (СССР).
26. А.с. 1369889 СССР, В25 J 11/00. Робототехнический комплекс для зачистки литья / В.Л. Афонин, Л.Я. Глейзер, В.А. Гадзиковский, И.Н. Егоров, Н.Г. Рассказчиков, П.И. Чинаев (СССР).
27. А.с. 1414623 СССР, В 25 J 7/00. Микроманипулятор / В.Б. Боков, И.Н. Егоров, Ю.П. Поляков (СССР).
28. А.с. 1414624 СССР, В 25 J 9/00. Устройство для управления сборочным роботом / В. Н. Кравченко, И.Н. Егоров (СССР).
29. А.с. 1421529 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / Р.С. Вишняков, И.Н. Егоров, А.А. Кобзев (СССР).
30. А.с. 1462242 СССР, G 05 В 13/00. Самонастраивающаяся система

управления / В.Л. Афонин, Л.Я. Глейзер, И.Н. Егоров [и др.] (СССР).

31. А.с. 1495117 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным манипулятором / Р.С. Вишняков, И.Н. Егоров (СССР).

32. А.с. 1650429 СССР, В 25 J 13/00. Устройство для управления сборочным роботом / О.В. Веселов, А.А. Горчаков, В.П. Дорохов, И.Н. Егоров [и др.] (СССР).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альван, Х.М.* Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности / Х.М. Альван, А.В. Слоущ // Теория механизмов и машин : сборник. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – № 1. – С. 63 – 69.
2. *Аракелян, В.* Исследование особых положений манипулятора с параллельной структурой (Паминса) / В. Аракелян, С. Брио, В.А. Глазунов. – М.: Изд-во ПМ и НМ. – 2006. – № 1. – С. 80 – 86.
3. *Афонин, В.Л.* Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры: учеб. пособие / В.Л. Афонин, П.В. Подзоров, В.В. Слепцов; под общ. ред. В.Л. Афолина. – М.: Изд-во МГТУ СТАНКИН: Янус.К, 2006. – 452 с.
4. *Афонин, В.Л.* Позиционно-силовое управление в механизмах параллельной структуры / В.Л. Афонин, А.Н. Смоленцев // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 5. – С. 14 – 19.
5. *Баранов, Д.Н.* Интеллектуальное управление робототехническими системами на основе следящей системы технического зрения и нечеткой логики / Д.Н. Баранов, Ю.В. Подураев // Экстремальная робототехника: тр. 18-й Всерос. науч.-техн. конф. – СПб.:СПбГТУ, 2008. – С. 132 – 135.
6. *Бойчук, Л.М.* Синтез координирующих систем автоматического управления / Л.М. Бойчук. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
7. *Бурдаков, С.Ф.* Системы управления движением колесных роботов / С.Ф. Бурдаков, И.В. Мирошник, Р.Э. Стельмаков. – СПб.: Наука, 2001. – 229 с.
8. *Бурдаков, С.Ф.* Координатно-силовое управление роботом в условиях неопределённости / С.Ф. Бурдаков, Л.В. Парамонов // Экстремальная робототехника: тр. VII Всерос. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1996. – С. 177 – 185.

9. *Воротников, С.А.* Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие / С.А. Воротников; под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.

10. *Вукобратович, С.* Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / С. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански. – М.: Мир, – 1989. – 376 с.

11. *Галиуллин, А.С.* Методы решения обратных задач динамики / А.С. Галиуллин. – М.: Наука, 1986. – 310 с.

12. *Гендель, В.С.* Силовой анализ платформы Стюарта с учетом неидеальности связей / В.С. Гендель, А.В. Слоущ // Теория механизмов и машин. – 2005. – № 2. – Т. 3. – С. 59 – 66.

13. *Глазунов, В.А.* Пространственные механизмы параллельной структуры / В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев. М.: Наука, – 1991. – 95 с.

14. *Глазунов, В.А.* Управление механизмом параллельной структуры при переходе через особые положения / В.А. Глазунов, М.Г. Есина, Р.Э. Быков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 2. – С. 79 – 81.

15. *Гориневский, Д.М.* Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях / Д.М. Гориневский, А.И. Формальский, А.Ю. Шнейдер; под ред. В.С. Гурфинкеля и Е.А. Девянина. – М. : Физматлит, 1994. – 368 с.

16. *Градецкий, В.Г.* Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В.Г. Градецкий, В.Б. Вешников, С.В. Калиниченко. – М. : Наука, 2001. – 302 с.

17. *Диментберг, Ф.М.* Теория пространственных шарнирных механизмов / Ф.М. Диментберг. – М. : Наука, 1982. – 335 с.

18. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, В.А. Андрюхин, И.Н. Егоров и [др.] ; под ред. В.С. Кулешова, Н.А. Лакоты. – М. : Машиностроение, 1986. – 328 с.

19. *Егоров, И.Н.* Синтез системы H_∞ -робастного управления платформой Стюарта / И.Н. Егоров, Казым Хуссейн Т. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XV Бенардосовские чтения). – Иваново : ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2009. – С. 247.

20. *Они же.* Структуры систем управления платформы Стюарта пус-

ковых установок беспилотных летательных аппаратов / И.Н. Егоров, Казым Хуссейн Т. // Материалы 5-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ-2008). – СПб.: СПбГТУ «ЛЭТИ», 2008. – С. 196 – 198.

21. *Егоров, И.Н.* Алгоритмы формирования задающих воздействий, обратных и перекрестных связей в двухканальных электроприводах технологических роботов с позиционно-силовым управлением / И.Н. Егоров // Экстремальная робототехника: тр. IX Всеросс. науч.-техн. конф. – СПб. : СПбГТУ, 1998. – С. 44 – 54.

22. *Он же.* Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными системами / И.Н. Егоров // Труды по материалам юбилейной научно-технической конференции. – Вып. 5. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – С. 50 – 55.

23. *Он же.* Позиционно-силовое управление системой взаимосвязанных манипуляторов лазер-роботов / И.Н. Егоров // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. VII Всерос. научно-технической конференции. – Т. 4. Экстремальная робототехника. – СПб. 2004. – С. 88 – 92.

24. *Он же.* Системы позиционно-силового управления технологическими роботами / И.Н. Егоров // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2003. – № 10. – С. 15 – 20.

25. *Егоров, И.Н.* Математическая модель и управление движением мобильного робота / И.Н. Егоров, Д.А. Кадхим // Международная конференция по математической теории управления и механике: тез. докл. – М. : МИАН, 2009. – С. 69 – 70.

26. *Они же.* Структурно-алгоритмическое обеспечение системы управления электроприводами мобильного робота / И.Н. Егоров, Д.А. Кадхим // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий (XV Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ им. В. И.Ленина, 2009. – С. 246.

27. *Они же.* Управление технологическим оборудованием в условиях нестационарности параметров изображения и положения и подвижного объекта / И.Н. Егоров, Д.А. Кадхим // Проектирование и технология электронных средств. – 2009. – Вып. 3. – С. 65 – 70.

28. *Они же.* Нечеткое позиционно-силовое управление перемещением мобильного робота в трубопроводах с нестационарными геометрическими

параметрами / И.Н. Егоров, Д.А. Кадхим // Труды Девятого международного симпозиума «Интеллектуальные Системы» (INTELS' 2010) / под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2010. – С. 554.

29. *Егоров, И.Н.* Моделирование динамической вариации рабочих зон выходного звена механизмов параллельной структуры / И.Н. Егоров, Казым Хуссейн Т. // Экстремальная робототехника: тр. 19-й Всерос. науч.-техн. конф. – СПб. : СПбГТУ, 2009. – С. 121 – 126.

30. *Они же.* Позиционно-силовое управление положением и ориентацией платформы гексапода с ПИД-регуляторами на исполнительном уровне / И.Н. Егоров, Казым Хуссейн Т // Экстремальная робототехника: тр. 19-й Всерос. науч.-техн. конф. – СПб. : СПбГТУ, 2009. – С. 292 – 298.

31. *Егоров, И.Н.* Гибридная система управления сборочным роботом в условиях нестационарности параметров размытости изображения объекта / И.Н. Егоров, М.М. Матлуб // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XV Бенардосовские чтения). – Иваново. ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2009. – С. 261 – 262.

32. *Они же.* Управление манипуляционными роботами на основе алгоритмов позиционно-силового управления и визуального восстановления помех движения / И.Н. Егоров, М.М. Матлуб // Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления «Мехатроника, автоматизация, управление». – СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 199 – 202.

33. *Они же.* Управление на основе алгоритмов распознавания помех движения и позиционно-силового управления / И.Н. Егоров, М.М. Матлуб // Экстремальная робототехника : Труды 19-й Всерос. научно-технической конференции – СПб : СПбГТУ, 2009. – С. 121 – 126.

34. *Они же.* Управление роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов / И.Н. Егоров, М.М. Матлуб // Изв. ТГУ. Техн. науки. – Вып.1. – 2010. – С.158 – 165.

35. *Егоров, И.Н.* Управление робототехнической системой подачи тепловыделяющих сборок / И.Н. Егоров, В.А. Немонтов // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2004. – № 4. – С. 28 – 33.

36. *Егоров, И.Н.* Позиционно-силовое управление связанными манипуляционными системами в условиях неопределенности связей / И.Н. Егоров, В.П. Умнов // Труды Девятого международного симпозиума «Интеллекту-

альные Системы» (INTELS' 2010) / под ред. К.А. Пупкова. – М.: РУСАКИ, 2010. – С. 554.

37. *Они же*. Принципы построения и управления манипуляционных систем лазер-роботов / И.Н. Егоров, В.П. Умнов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 11. – С. 28 – 33.

38. *Земляков, С.Д.* Координатно-параметрическое управление. Определение возможности проблем / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. – 1976. – № 2. – С. 107 – 115.

39. *Зенкевич, С.Л.* Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. пособие для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 440 с.

40. *Зуев, А.В.*, Особенности создания комбинированных позиционно-силовых систем управления манипулятором / А.В. Зуев, В.Ф. Филаретов // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 1. – С. 154 – 162.

41. *Иванов, В.С.* Структурный анализ технологических мехатронных систем с параллельной кинематикой / В.С. Иванов, Г.Н. Васильев // Мехатроника. – 2004. – № 5. – С. 37 – 42.

42. Интеллектуальные роботы / И.А. Каляев [и др.]; под общ. ред. Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

43. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.

44. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров [и др.]. – М.: Наука, 2006. – 336 с.

45. К вопросу диагностирования дефектов геометрии сечения трубопроводов / А.Г. Гумеров [и др.] // Нефтепромысловое дело и транспорт нефти. – М.: ВНИИОЭНГ. – 1985. – № 9. – С. 28 – 31.

46. *Кобзев, А.А.* Коррекция программного движения в системах управления сборочными роботами / А.А. Кобзев // Изв. ВУЗ. Приборостроение. – 1992. – № 3 – 4. – С. 15 – 20.

47. *Корендясев, А.И.* Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Кн.1 / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М. : Наука, 2006. – 383 с.

48. *Крайнев, А.Ф.* Разновидности механизмов параллельной структуры и возможности их применения в ГПС / А.Ф. Крайнев // Гибкие производственные системы, ГПС-6. – М.: Междунар. ин-т информации, 1990. – С. 60 – 73.

49. *Крайнев, А.Ф.* Новые механизмы относительного манипулирования / А.Ф. Крайнев, В.А. Глазунов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 5. – С. 32 – 48.

50. *Крутько, П.Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели / П.Д. Крутько. – М. : Наука, 1988. – 328 с.

51. *Кулаков, Ф.М.* Методы управления роботами с использованием информации об усилиях реакций / Ф.М. Кулаков, Е.Н. Смирнов // Робототехнические системы / под ред. Ф.М. Кулакова. – Л. : ИВТиА. – 1984. – С. 36 – 60.

52. *Кулиш, И.А.* Интеллектуальное управление мобильными роботами на основе комбинации нейросетевого и нечеткого методов / И.А. Кулиш, Ю.В. Подураев, Я. Шомло // Мехатроника. – 2001. – № 5. – С. 8 – 11.

53. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник. В 5 т. Т.5. Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 742 с.

54. *Мирошник, И.В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 550 с.

55. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов: современное состояние и перспективы развития / И.Л. Ермолов [и др.] // Мехатроника. – 2000. – № 1. – С. 48 – 55.

56. Моделирование зон особых положений механизмов параллельной структуры / В.А. Глазунов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2000. – № 2. – С. 15 – 26.

57. *Морговский, Ю.Я.* Механизмы с параллельной кинематикой (гексаподы) – новый этап в станкостроении / Ю.Я. Морговский // Мехатроника автоматизация и управление. – 2004. – № 5. – С. 32 – 36.

58. *Нетушил, А.В.* Нелинейное звено типа "упор" / А.В. Нетушил // Автоматика и телемеханика. – 1968. – № 7. – С. 175 – 178.

59. Новые классы механизмов: параллельно-перекрестная и параллельно-переменная структура / В. Аракелян [и др.] // Вест. науч.-техн. развития. – 2009. – № 3. – С. 28 – 33.

60. Новые методы управления сложными системами / под ред. В.М. Лохина. – М. : Наука, 2004. – 333 с.

61. *Петров, Б.Н.* Адаптивное координатно-параметрическое управление / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков. – М. : Наука, 1980. – 224 с.

62. *Письменный, Г.В.* Системы силомоментного оучувствления роботов / Г.В. Письменный, В.И. Солнцев, С.А. Воротников. – М. : Машиностроение, 1990. – 96 с.

63. *Подураев, Ю.В.* Мехатроника: основы, применение: учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : Машиностроение. – 2007. – 256 с.

64. *Он же.* Технологические роботы с контурным силовым управлением для операций механообработки / Ю.В. Подураев // Вестн. машиностроения. – 1993. – № 8. – С. 14 – 24.

65. *Попов, А.В.* О способах оценки сил и моментов при взаимодействии манипулятора с окружающей средой / А.В. Попов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. – № 5. – Т. 1. Естественные и технические науки. – С. 169 – 172.

66. Проектирование и изготовление высокопроходимых мобильных роботов специального назначения с использованием современных САПР / О. Маслов [и др.] // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 2. – С. 61 – 64, № 3. – С. 53 – 55.

67. Проектирование следящих систем двустороннего действия / И.Н. Егоров [и др.]; под ред. В.С. Кулешова. – М.: Машиностроение, 1980. – 300 с.

68. *Прямыцын, И.Б.* Анализ замкнутого двухподвижного механизма (робота) / И.Б. Прямыцын // Теория механизмов и машин. – 2006. – № 1. – Т. 4. – С. 55 – 61.

69. *Пупков, К.А.* Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.

70. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрестной структуры / В.А. Глазунов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 2. – С. 90 – 100.

71. Сборочный РТК, осуществляющий слежение за целевым объектом. – Режим доступа: <http://cobweb.ecn.purdue.edu/RVL/Projects/LineTracking/index.htm>.

72. Система нечеткого управления конфигурацией шасси мобильного робота / Д.В. Киселев [и др.] // Экстремальная робототехника: тр. XI Все-

рос. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во. СПбГТУ, 2002. – С. 119 – 130.

73. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.

74. Техническое зрение роботов / под ред. А. Пью; пер. с англ. Д.Ф. Миронова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

75. Турлапов, В.Е. Анализ положений платформ Стюарта, основанный на варианте структуры, разрешимом в радикалах / В.Е. Турлапов // Вестн. СГТУ. – 2005. – № 1. – С. 54 – 59.

76. Управление робототехническими системами и их оучувствление: сб.науч. ст. – М.: Мир, 1985. – 348 с.

77. Управление робототехническими системами с силомоментным оучувствлением: учеб. пособие / И.Н. Егоров [и др.]; под ред. проф. И.Н. Егорова. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 276 с.

78. Фархатдинов, И.Г. Экспериментальное исследование позиционно-го, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами / И.Г. Фархатдинов, Ю.В. Подураев, Дж.-Х. Ю. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 1. – С. 70 – 78.

79. Филаретов, В.Ф. Система автоматического управления манипулятором типа SCARA для выполнения силовых рабочих операций на боковых поверхностях заготовок произвольной формы / В.Ф. Филаретов, G. Legnani, S. Ruggery. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 8. – С. 21 – 29.

80. Филаретов, В.Ф. Позиционно-силовое управление электроприводом манипулятора / В.Ф. Филаретов, А.В. Зуев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 9. – С. 20 – 24.

81. Чашухин, В.Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота / В.Г. Чашухин // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 5. – С. 142 – 147.

82. Шведов, В.В. Контроль качества и диагностика систем водоснабжения. Проблемы, перспективы, решения / В.В. Шведов // Контроль и диагностика. – 1998. – № 2. – С. 49 – 52.

83. Ющенко, А.С. Управление роботами с использованием нечеткой логики: состояние и проблемы / А.С. Ющенко // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 1. – С. 119 – 130.

84. Ющенко, А.С. Интерактивное управление мобильными роботами с использованием нечеткой логики / А.С. Ющенко, Д.В. Киселев // Мехатроника. – 2000. – № 5. – С. 10 – 15.

85. Ющенко, А.С. Ситуационное управление роботами в неопределенной ситуации на основе нечеткой логики / А.С. Ющенко // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: материалы Всерос. конф. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2000. – С. 164 – 165.

86. Allied Aerospace (iSTAR) VTOL UAVs <http://www.alliedaerospace.com/UAVs.htm>, Allied Aerospace.

87. An Overview of the History of Vertical and Short Take-Off and Landing (V/STOL) Aircraft. Michael J. Hirschberg CENTRA Technology Inc..www.vstol.org.

88. Autonomous UAV Mission System (AUMS) // SPAWAR Systems Center San Diego, Code 2371.

89. Ahmad S., Guo H. Dynamic coordination of dual-arm robotic systems with joint flexibility // “IEEE Int. Cont. Rob. And Autom., Philadelphia, Pa Apr. 24-29, 1988. Vol.1” Washington (D.C.), 1988. – P. 332 – 337.

90. Bejczy A.K., Tarn T.Y. Dynamic control of robot arms in task space using nonlinear feedback // Automatisierungstechnik, 1988, 36. – № 10. – P. 374 – 388.

91. Bruzzone L.E., Molfino R.M., Zoppi M., Zurlo G. Experimental tests on the prototype of an impedance controlled three degree of freedom parallel robot // 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. – 2003. – 6 p.

92. Chang Tommy, Tsai Hong, Michael Shneier, German Holguin, Johnny Park, Roger D. Eastman Dynamic 6DOF Metrology for Evaluating a Visual Servoing System, PerMIS’08:- Gaithersburg, MD, USA, August 19-21, 2008.

93. Collins R., Lipton A., Kanade T. A system for video surveillance and monitoring // Proc. American Nuclear Society (ANS) Eighth Int. Topical Meeting on Robotic and Remote Systems. – April 1999. – P. 25 – 29.

94. Egorov I.N., Kadhim H.T. Dynamic analysis of Stewart platform using both the Newton–Euler method and Lagrange formulation // Тезисы докладов Международной научной конференции по дифференциальным уравнениям и динамике систем. – Суздаль, 2008. – С. 286 – 287.

95. Egorov I.N., Kadhim H.T. Dynamic variation of the work space of a Hexapod machine tool during machining // Тезисы докладов Международной

научной конференции по математике управления и механике. – Суздаль, 2009. – С. 161 – 162.

96. Fanaei A., Mohammad F. Adaptive neuro-fuzzy controller for hybrid position / force control of robotic manipulators // 16th IF AC World Congr. Czech Rep. Prague, 2005. CD-ROM 01973. P. 1 – 6.

97. Fichter E.F. A Stewart Platform Based Manipulator: General Theory and Practical Construction // Int J. Robotics Research. – 1986. – Vol. 5. – № 2. – 157 – 182.

98. Filaretov V.F., Vukobratovic M. Synthesis of Adaptive Robot Control Systems for Simplified Forms of Driving Torques // Mecha-tronics, Pergamon Press. 1995. – Vol. 5. – 1. – P. 41 – 59.

99. Gosselin CM., Angeles J. Singularity analysis of Closed-loop Kinematic Chains // IEEE Trans. Robot. Automat. – 1990. – Vol. 6. – P. 281 – 290.

100. Hsu FY., FuL C. Intelligent robot deburring using adaptive fuzzy hybrid position / force control // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2000. – V. 16 (4). – P. 325 – 335.

101. Hogan Nevill. Impedance control: an approach to manipulation. Part 2 – Implementation // Trans. of the ASME. – 1985, 107. – P. 8 – 16.

102. Horodincea M., Dorftel I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots. Proc. International Colloquium on Mobile and Autonomous Systems, 2002. – P. 61 – 4.

103. Hosohara Y., Fujica A., Mori K., Kutiea S., Sakamoto K.t Naito S., Development of inspection robots for small pipe lines. "Hitachi Review1", 1987, 104. – N. 2. – P. 79 – 84.

104. Jatta F., Legnani G., Visioli A. Friction compensation in hybrid force/velocity control of industrial manipulators // IEEE Trans, on Industrial Electronics. 2006. – Vol. 53. – № 2. – P. 604 – 613.

105. Jatta F., Legnani G., Visioli A., Ziliani G. On the use of velocity feedback in hybrid force/velocity control of industrial manipulators // Control Engineering Practice. 2006. N 14. – P. 1045 – 1055.

106. Jinno M., Yoshimi T., Abe A. Force controlled grinding robot system for unstructured task // Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Raleigh, (NC). – 1992. – P. 1117 – 1124.

107. Kazerooni H. Automated robotic deburring using impedance control // IEEE Control Systems Magazine. 1988. – Vol. 8. – № 1. – P. 21 – 25.

108. Kiguchi K-, Fukuda T. Position/force control of robot manipulators for geometrically unknown objects using fuzzy neural networks. IEEE Trans, on Industrial Electronics. 2000. – Vol. 47. – № 3. – P. 641 – 649.
109. Kim D., Chung W. . Analytic Singularity Equation and Analysis of Six-DOF Parallel Manipulators Using Local Structurization Method // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1999. – Vol.15. – № 4. – P. 244 – 248.
110. Komori M., Suyama K. Inspection robots for gas pipelines of Tokyo Gas // Proceedings of the conference Advanced Robotics. – 2001. – Vol. 15. – № 3. – P. 365 – 370.
111. Ma O., Angeles J. Architecture singularities of platform manipulators // IEEE Int. Conf. Robot Automat. – 1991. – P. 1542 – 1547.
112. Majid M. Moghadam, Mohamadreza Arbabtafi, Ali R Hadi. In pipe inspection crawler adaptable to the pipe interior diameter. Tarbiat Modares University. – 15 p.
113. Mayer B. St-Onge, Gosselin CM. Singularity Analysis and Representation of Spatial six-DOF Parallel Manipulators. // Recent Advances in Robot Kinematics, Kluwer Academic Publishers. – 1996. – P. 389 – 398.
114. Merlet J.P. Singular Configurations of Parallel Manipulators and Grassmann Geometry // The International Journal of Robotics Research. – 1989. – Vol. 8. – № 5. – P. 45 – 56.
115. Omran A., El-Bayiumi G., Bayoumi M. Kassem A. Genetic Algorithm Based Optimal Control for a 6-DOF Non Redundant Stewart Manipulator // International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering. – 2008. – P. 73 – 79.
116. Ong J.K., Bouazza-Marouf K., Kerr D. Fuzzy logic control for use in pipe mobile robotic system navigation. Proc. Inst.Mech.Engrs. Vol. Part I:J.Systems and Control Engineering. – P. 401 – 418.
117. Park F.C., Kim J.W. Singularity Analysis of Closed Kinematic Chains // Trans. ASME J. Mech. Des. – 1999. – P. 32 – 38.
118. Parr a-Vega V. and Arimoto S. A passivity-based adaptive sliding mode position-force control for robot manipulators // Int. J. of Adaptive Control and Signal Proc. 1996. – V. 10. – P. 365 – 377.
119. Raibert M.H., Craig J.J. Hybrid Position / Force Control of Manipulators // ASME Journal of Dyn. Syst., Meas., and Control. 1981. – Vol. 102. – P. 126 – 133.

120. Remotely Controlled Robots and Manipulators / Bilateral Control Systems of Master – Slave Manipulators. Practical Aspects in the Use of Remote // V.S. Kuleshov, Lakota N.A., Dorohov V.P., Egorov I.N., Poduraev Y.V., Yshenko A.S.M.: MIR, 1988. – 330 p.
121. Roh S.G., Choi H.R., Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines, IEEE Transactions on Robotics, 21 (1), (2005), P. 1–17.
122. Sakamoto S., Hara F., Hosokai H., Kinoshita H., Abe Y. Parallel-Link Robot for Pipe Inspection. Authonzed Licenzed use limited to: Kth the royal institute technology. P. 345 – 350.
123. Sefrioui J., Gosselin CM. Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators // Robot. Autom. Syst. – 1993. – Vol. – № 10. – P. 209 – 224.
124. Serrano F.A., Caballero K. Yen, Brezina T. Control of a Stewart platform with fuzzy logic and artificial neural network compensation // Florida International University. – P. 156 – 160.
125. Surdolovic D., Cojbasic Z. Robust Compliant Motion Control Using Intelligent Adaptive Impedance Approach. International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, 1998. – P. 245 – 250.
126. Suzumori K., Wakimoto S., Takata M. A Miniature inspection robot negotiating pipes of widely varying diameter // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, 2003. P. 2735 – 2740.
127. Tarn T.Y., Bejczy A.K., Yun X. New nonlinear control algorithms for multiple robot arms // "IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems", 1988. – № 5. P. 571 – 583.
128. UAV Forum, Vendors, UAV Systems, Micro Autonomous Systems. – <http://www.uavforum.com/vendors/systems/micro.htm>.
129. Xiao D., Ghosh B.K., Xi N. et al. Sensor-based hybrid position / force control of a robot manipulator in an un-calibrated environment // IEEE Trans. Control Systems Technology. 2000. – Vol. 8 (4). – P. 635 – 645.

Научное издание

ЕГОРОВ Игорь Николаевич

ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ И МЕХАТРОННЫМИ
УСТРОЙСТВАМИ

Монография

Подписано в печать 09.03.11.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 11,16 . Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
600000, Владимир, ул. Горького, 87.