

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет

И.Н. ЕГОРОВ    А.А. КОБЗЕВ  
Ю.Е. МИШУЛИН    В.А. НЕМОНТОВ

# УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ

Учебное пособие

Под редакцией профессора И.Н. Егорова

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов высших  
учебных заведений, обучающихся по направлению  
652000 «Мехатроника и робототехника»  
специальностям 071800 «Мехатроника»,  
210300 «Роботы и робототехнические системы»*

«В печать»:

Автор –

И.Н. Егоров, А.А. Кобзев,  
Ю.Е. Мишулин, В.А. Немонтов

Зав. кафедрой –

Редактор –

Начальник РИО –

Директор РИК –

Е.П. Викулова

Ю.К. Жулев

Владимир 2005

УДК 621.865.8

ББК 32.816

У66

Рецензенты:

Ученый секретарь УМК по специальности 071800 «Мехатроника», профессор  
Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

*Е.Д. Горбачевич*

Доктор технических наук, профессор  
зам. заведующего кафедрой «Проблемы управления»  
Московского института радиоэлектроники и автоматики  
(технический университет)

*В.М. Лохин*

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Робототехника и мехатроника»  
Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

*Ю.В. Подураев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Егоров, И. Н.** Управление робототехническими системами с  
У66 силомоментным оцувствлением : учеб. пособие / И. Н. Егоров,  
А. А. Кобзев, Ю. Е. Мишулин, В. А. Немонтов ; под ред. проф.  
И. Н. Егорова; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос.  
ун-та, 2005. – 276 с.

ISBN 5-89368-619-5

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом  
Министерства образования и науки Российской Федерации по специальностям 071800 –  
мехатроника, 210300 – роботы и робототехнические системы. Изложены вопросы ис-  
следования и разработки мехатронных и робототехнических систем с силомоментным  
оцувствлением.

Подготовлено для студентов специальностей 220401 (071800), 220402 (210300),  
220301 (210200) и 200201 (072300) дневной формы обучения, а также ориентировано на  
студентов заочной формы обучения и студентов Центра профессионального образова-  
ния инвалидов.

Ил. 155. Библиогр. : 71 назв.

УДК 621.865.8

ББК 32.816

ISBN 5-89368-619-5

© Владимирский государственный  
Университет, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ .....	15
1.1. Общие вопросы управления технологическими роботами и комплексами .....	15
1.2. Системы позиционно-силового управления технологиче- скими роботами и комплексами.....	30
1.3. Управление приводами технологических роботов при выполнении операции абразивной зачистки и шлифования .....	48
1.4. Управление движением манипуляционных систем лазер- роботов.....	61
2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ КООРДИНАТ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ В СБОРОЧНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ .....	80
2.1. Компоновка робототехнических сборочных систем .....	80
2.2. Методы определения координат сопрягаемых деталей .....	94
2.3. Алгоритмы определения координат сопрягаемых деталей .....	99
2.4. Математическая модель сборочного процесса как объекта управления.....	112
2.5. Алгоритмы распознавания сборочных ситуаций.....	118
3. АЛГОРИТМЫ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СБОРОЧНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ .....	130
3.1. Структуры при определении координат сопрягаемых деталей.....	130
3.2. Алгоритмы и системы управления сборкой детерминиро- ванных нестационарных объектов.....	145
3.3. Алгоритмы и системы управления сборкой в условиях позиционно-силовой неопределенности .....	160
3.4. Алгоритмы и структуры системы управления роботизиро- ванного технологического комплекса при установке тепловыделяющих сборок в ячейки контейнера .....	169

4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ .....	181
4.1. Принципы построения электроприводов.....	181
4.2. Анализ динамики электроприводов в режиме позициони- рования .....	192
4.3. Анализ динамики и синтез электроприводов с независимым позиционно-силовым управлением .....	204
4.4. Анализ и синтез электроприводов с регулированием демп- фирования и податливости .....	222
4.5. Структурный синтез электроприводов .....	232
5. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	248
5.1. Микропроцессорная реализация систем управления .....	248
5.2. Микропроцессорная реализация исполнительных электро- приводов .....	260
5.3. Программное обеспечение системы управления .....	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	270
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	271

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Мехатроника и робототехника как новое направление науки зародились на стыке электромеханики, электроники, кибернетики и компьютерной информатики. Поэтому в теории и практике проектирования мехатронных устройств и роботов, а также сложных мехатронных и робототехнических систем важную роль играют законы механики и электротехники, теория механизмов и электромеханических преобразователей энергии, силовая современная электроника, теория автоматического управления, информатика, методы искусственного интеллекта и современные средства телекоммуникаций.

За последние 20 лет в США, Японии и ряде других стран Европы была осознана острая необходимость в организации специальной системы образования в области мехатроники и робототехники по направлению «Мехатроника и робототехника». В университетах этих стран созданы научные центры, лаборатории и кафедры робототехнических и мехатронных систем, на базе которых ведется подготовка инженеров-робототехников и инженеров-мехатронщиков. Так, например, в университетах Японии изучение мехатроники осуществляется в рамках практически всех инженерных специальностей. Такие инженеры могут быстро адаптироваться к потребностям рыночной экономики и специализироваться как на отдельных компонентах мехатронных устройств и роботов, так и на мехатронных и робототехнических системах в целом.

Подготовка инженеров в области создания и эксплуатации роботов, робототехнических комплексов и мехатронных систем ведётся во Владимирском государственном университете с 1976 года по настоящее время.

В настоящем учебном пособии обобщён многолетний опыт работы коллективов кафедр «Робототехника и автоматизированные производст-

ва», «Автоматические и мехатронные системы» Владимирского государственного университета в области разработки основ теории управления технологическими роботами и робототехническими системами различного общепромышленного и специального назначения.

Выполнение технологическими роботами и робототехническими системами операций типа механической обработки, сборки, манипулирования объектами с ограниченной подвижностью, манипулирование одним объектом двумя исполнительными устройствами, обхода контура объектов с незаданной поверхностью при измерениях, контроле и бесконтактной обработке изделий требует применения тактильно-силомоментного осязания и гибридного позиционно-силового управления на основе информации о силах.

Вопросы тактильно-силомоментного осязания и позиционно-силового управления рассмотрены как в научной, так и учебной литературе отечественных и зарубежных учёных. Наиболее полно эти вопросы освещены в работах: «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 осязания роботов» (Г.В. Письменный, В.И. Солнцев, С.А. Воротников), «Электроприводы манипуляционных роботов с силомоментным осязанием» (И.Н. Егоров), «Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы» (В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, В.А. Андрюнин 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).

Учебная литература, посвященная решению задач структурно-алгоритмического построения и микропроцессорной реализации систем идентификации, управления и регулирования при выполнении операций с наложенными связями в настоящее время отсутствует. Предлагаемая настоящая книга, написанная как учебное пособие по курсам: «Электромеха-

6

нические и мехатронные системы», «Системы приводов», «Управление системами и процессами», «Компьютерные системы управления», читаемыми авторами лекции во Владимирском государственном университете.

Учебное пособие состоит из пяти глав.

Во введении и главе 1 рассмотрены общие вопросы управления технологическими роботами и робототехническими комплексами. Показана область применения систем силомоментного очувствления и управления робототехническими системами с силомоментным очувствлением. Рассматриваются понятия, виды, структурно-алгоритмическая организация управления, регулирования и обучения. Одной из особенностей рассматриваемого управления является принципиальный характер разрывности этого управления, заключающейся в переходе от одного альтернативного управления к другому в зависимости от событий в пространстве состояний динамической системы «рабочий орган – объект работ».

В качестве примера рассмотрено управление манипуляционными системами технологических роботов при выполнении операций абразивной зачистки и лазерной резки.

Глава 2 посвящена компоновке и алгоритмам управления сборочных робототехнических систем при решении задачи идентификации координат сопрягаемых деталей и технологических ситуаций при сопряжении цилиндрических изделий на основе тактильной и силомоментной информации.

В главе 3 рассмотрены алгоритмы и структуры систем позиционно-силового управления робототехническими системами при сборке и демонтаже путем извлечения детерминированных жестких и субтильных тепловыделяющих элементов цилиндрических изделий в условиях нестационарности или в условиях позиционно-силовой неопределенности.

Глава 4 посвящена принципам построения, анализу динамики, параметрическому и структурному синтезу исполнительных электроприводов робототехнических систем с силомоментным очувствлением.

В главе 5 рассматриваются вопросы микропроцессорной реализации систем позиционно-силового управления. При этом даны и рассматриваются два подхода: 1) микропроцессорная реализация непосредственно алгоритмов управления, формирующих управляющие для приводов воздейст-

вия; 2) микропроцессорная реализация алгоритмов управляющей части непосредственно в замкнутом контуре привода. Отмечаются особенности программно-алгоритмической реализации. Показаны особенности выбора элементной базы с позиций сложности и быстродействия выполнения алгоритмов.

Работа над учебным пособием между авторами была распределена следующим образом:

И.Н. Егоров – введение, параграфы 1.1 – 1.3, 3.1, 3.2, 4.1, 4.3, 4.5;

А.А. Кобзев – параграфы 2.2, 2.3, 3.1, 4.2, 4.3;

Ю.Е. Мишулин – параграфы 2.1, 2.3 – 2.5, 3.1, 3.3–3.5, 4.2 – 4.4, 5.1 – 5.3;

В.А. Немонтов – параграфы 2.1, 2.3, 2.5, 3.1, 3.4, 3.5, 4.3 – 4.5, 5.1 – 5.3.

В работе над параграфами 2.1, 3.1 – 3.5 принимал участие Н.А. Мурашко; 1.3, 4.3 – Н.Г. Рассказчиков; 1.4 – В.П. Умнов; 3.4. – Омпракаш Кандакатла.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная экономическая ситуация требует правильного выбора приоритетов развития отечественной науки и техники. Одним из таких приоритетных научно-технических направлений является гибкая автоматизация, включающая роботизацию производственных процессов. Гибкость производства основана на применении новых высокоэффективных технологий автоматизированного производства с элементами искусственного интеллекта технологического оборудования, в том числе технологических роботов и открытой архитектуры компьютерных систем проектирования, управления и контроля. Это одна из главных особенностей технического и технологического перевооружения существующих производств, создания новых производств, приспособленных к функционированию в условиях рыночной экономики. Уровень роботизации является одним из показателей научно-технического, промышленного и военно-стратегического потенциала каждой страны.

Манипуляционные роботы (МР) согласно классификации, предложенной академиком РАН Е.П. Поповым, подразделяются на автоматические МР (промышленные роботы (ПР) ) с программным, адаптивным и интеллектуальным управлением; биотехнические МР с командным, копирующим и полуавтоматическим управлением; интерактивные МР с автоматизированным, супервизорным и диалоговым управлением. Впоследствии МР с копирующим и полуавтоматическим управлением стали называть манипуляторами, или МР с дистанционным управлением, а МР с автоматизированным управлением – МР с дистанционно-автоматическим управлением.

Отличительным признаком манипуляторов с ручным и дистанционным управлением является участие человека в процессе управления. Естественный интеллект человека и его 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 примене-

ние манипуляторов с ручным и дистанционным управлением для выполнения сложных и нетиповых операций с недетерминированными вариативными объектами как при обычных, так и экстремальных условиях работы.

К манипуляторам с ручным управлением относятся сбалансированные и механические копирующие манипуляторы. При эксплуатации сбалансированных манипуляторов оператор воздействует непосредственно на подвешенный груз. Управлять движением сбалансированного манипулятора можно и не непосредственно, а с помощью специального выносного пульта дистанционного командного управления.

Необходимость большего удаления оператора от опасных зон, возникающих при аварийных ситуациях и экстремальных условиях эксплуатации, увеличения грузоподъемности манипулятора и снижения утомляемости оператора привела к созданию в полном смысле дистанционно управляемых манипуляторов. С точки зрения методов управления данные манипуляторы подразделяются на манипуляторы с командным, копирующим и полуавтоматическим управлением. В первом случае оператор управляет приводом каждой степени подвижности (СП) по отдельности нажатием на соответствующие кнопки дистанционного пульта управления. Во втором случае оператор управляет перемещением и ориентацией рабочего органа (РО) манипулятора с помощью дистанционно удаленного задающего устройства (ЗУ), кинематически подобного исполнительному устройству (ИУ). При полуавтоматическом управлении оператор взаимодействует с ЗУ в виде многостепенной рукоятки, сигналы с которой через ЭВМ поступают на приводы ИУ манипулятора.

Автоматическое программное управление реализуется в виде: циклового, позиционного, контурного и контурно-позиционного управления. МР с программным управлением работают только в условиях детерминированной внешней среды, что требует применения различного рода ориентирующих устройств, позиционеров, наполнителей и других приспособлений. При недетерминированной внешней среде применяются адаптивное и интеллектуальное управление.

Процесс развития робототехники по аналогии с развитием вычислительной техники состоит из нескольких этапов. Первый этап развития промышленной робототехники характеризовался созданием манипуляторов с ручным и дистанционным управлением для обычных цеховых и экстремальных условий работы и МР с автоматическим управлением (промышленных роботов) для выполнения вспомогательных и подъемно-

транспортных операций, связанных с обслуживанием основного технологического оборудования и складских помещений. Подобные ПР относятся к группе вспомогательных (подъемно-транспортных) роботов.

Развитие робототехнических систем (РТС) как средств гибких автоматизированных производств определяет второй этап развития робототехники. Этот этап связан с созданием технологических (производственных) роботов, непосредственно выполняющих технологические операции механической обработки, характеризующихся сложной пространственной обрабатываемой поверхностью при невысоких требованиях к размерной точности, в том числе лазерной и гидроабразивной обработки; монтажно-сборочных и сварочных операций; обработки поверхностей путем их окраски или напыления антикоррозионных жидкостей, испытания, контроля.

В последние годы в РТС благодаря созданию новых типов электродвигателей и бурного развития микроэлектроники наметилась устойчивая тенденция к созданию МР различного назначения на базе электромеханических приводов. Так, в роботах грузоподъемностью 15 кг электромеханические роботы составляют от 50 до 60 %. По количеству степеней подвижности в типаже зарубежных роботов более 40 % составляют электромеханические роботы с пятью степенями подвижности. С точки зрения погрешности позиционирования абсолютное большинство (более 90 %) зарубежных электромеханических роботов имеет погрешность позиционирования от 0,01 до 1 мм. Наиболее широкие возможности с позиций управления имеют роботы с контурным управлением, где удельный вес электромеханических роботов составляет от 50 до 70 %.

Одной из главных особенностей второго этапа развития робототехники является тенденция создания унифицированных комплектующих узлов, устройств и универсальных технологических роботов с расширенными функциональными возможностями и технологической гибкостью. Практически тенденция к универсальности определяет сущность третьего этапа развития робототехники.

Примером универсальных роботов могут служить роботы серии RH (REIS, Германия), предназначенные для палетирования и стапелирования, обслуживания шприце- и прессолигтевых машин, сборки; роботы серии U (Kawasaki, Япония), (Smart Comau, Италия) предназначены для точечной сварки, сборки и манипулирования; робот Amart-35 предназначен для дуговой сварки, водяной резки и манипулирования; робот 36.25 R (Comau, Италия) предназначен для манипулирования и проведения легких работ по

зачистке, сверлению и завинчиванию; робот NRS-10 (АИТЕС, Финляндия) предназначен для манипулирования, сварки, резки и сверления. Примером отечественных универсальных технологических роботов являются роботы серии ТУР, РПМ-25 и другие.

По аналогии с развитием ЭВМ роботы типа SCARA, SKILAM, PUMA, ASEA, будучи достаточно универсальными и экономичными, могут сыграть роль, аналогичную роли ПЭВМ.

В рабочем пространстве технологических МР условно могут быть выделены транспортные и операционные зоны.

В транспортной зоне выполняются вспомогательные операции или переходы, представляющие собой законченную часть технологического процесса, или технологической операции, не сопровождающейся изменением состояния продуктов производства. Перемещения ИУ робота в этом случае являются свободными и с точки зрения величины и скорости перемещения, необходимости ориентации схвата разделяются на транспортные (глобальные), ориентирующие (локальные) и установочные движения.

В операционной зоне выполняются технологические переходы, характеризующиеся постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке. На рабочий орган МР в этом случае наложены внешние связи, действуют активные и реактивные силы, и движение рабочего органа становится несвободным движением, вынужденным движением или движением с ограничениями.

Подобные технологические операции будем называть операциями со связанным объектом или изделием. Среди них можно выделить наиболее часто встречающиеся операции: манипулирование одним объектом работ (ОР) с помощью двух ИУ роботов; выполнение различных механических работ с использованием инструмента (сверление, абразивная зачистка, нарезание резьбы, затяжка и разборка болтовых соединений, сварка и т.д.); манипулирование объектами с ограниченной подвижностью (открытие и закрытие крышек люков, имеющих ось поворота, установка вала в отверстие при сборке и т.п.); обход контура объекта с незаданной или неточно заданной поверхностью при измерениях, контроле и бесконтактной обработке и т.п.

Определяющим фактором управления технологическим роботом при действии внешних связей является работа со связями: обеспечение инвариантности, стабилизации, слежения и адаптации к действию связей.

Особенностью управления технологическими роботами, кроме действия внешних связей, является, с одной стороны, существенная нестациона-

нарность (вариативность) характеристик как самого робота, так и ОР и, с другой стороны, позиционная и тактильно-силовая неопределенность взаимодействия РО с ОР. Позиционная неопределенность порождается в первую очередь низкой точностью позиционирования РО и фиксатора ОР. Тактильно-силовая неопределенность связана с неполнотой задания обрабатываемой поверхности, износом инструмента, непредсказуемым изменением геометрических характеристик и положения ОР, а также непредсказуемым появлением препятствий в рабочей зоне.

Особую остроту отмеченные особенности приобретают при решении актуальной проблемы создания специальной робототехники для экстремальных условий, в том числе для обслуживания атомных и перспективных термоядерных энергетических установок, ликвидации последствий аварий, пожаротушения, утилизации крупногабаритных объектов и оборонной техники и т.д.

Расширение функциональных возможностей и обеспечение технологической гибкости МР, кроме применения адаптивной кинематики, специального технологического оборудования, например, в виде сборочных механизмов, сменного инструмента, позиционеров с соответствующими системами синхронизации требует решения проблемы адаптации или инвариантности к погрешностям позиционирования и ориентации РО, изнашивания инструмента, структуры материала и геометрической формы ОР и т.п.

Наиболее просто проблема адаптации к начальной несоосности, перекосу и относительным погрешностям положения РО и ОР решается применением известных методов пассивной коррекции, основанной на включении упругих элементов в запястье робота.

Активная коррекция основана на измерении параметров позиционно-силового взаимодействия РО с ОР и соответствующем управлении ИУ робота или (и) технологической оснастки с ОР или инструментом. В ряде случаев между РО робота или РО технологической оснастки и последним звеном робота или оснастки устанавливается автономное устройство с независимыми приводами и датчиками, которое посредством перемещения РО обеспечивает инвариантность к действию связей.

Наиболее перспективным путем создания систем управления (СУ) универсальных технологических МР при выполнении операций со связанным объектом является комбинация пассивной и активной адаптации, основанной на использовании как естественной силовой обратной связи при пассивной адаптации, так и искусственной обратной связи по силе при активной адаптации. Активная адаптация, в свою очередь, основана на так-

тельном и силомоментном оцувствлении (СМО) робота или (и) технологической оснастки и организации соответствующего управления: ИУ робота в целом; специального исполнительного механизма (ИМ), располагаемого между последней СП и РО; технологической оснасткой.

Четвертый этап развития робототехники заключается в создании МР как открытых технических систем с аппаратно-независимым программным обеспечением. В этом случае особую актуальность, учитывая универсальный характер рассматриваемых робототехнических систем, приобретает разработка обобщенной модели объекта управления и регулирования.

Объектом управления на тактическом уровне и регулирования на исполнительном уровне является динамическая система «рабочий орган – объект работ», относящаяся к классу стационарных голономных систем при следующих допущениях: все соединения ИУ являются идеальными кинематическими парами, т.е. такими, в которых сумма элементарных работ при любом возможном перемещении может быть приравнена к нулю; звенья ИУ считаются невесомыми и безинерционными в связи с компенсацией системой управления статических и динамических нагрузок, обусловленных инерционными свойствами; рабочий орган и объект работ считаются абсолютно твердыми телами.

Объектом регулирования на исполнительном уровне является процесс тактильно-силового взаимодействия, характеризующийся позиционными (геометрическими) и силовыми связями между РО и ОР, которые можно назвать, в силу их комбинированного характера, позиционно-силовыми связями. По отношению к РО эти связи могут быть активными и пассивными. Активными можно считать связи, если источником силового взаимодействия РО и ОР является движение ОР, а пассивными, если источник – движение РО.

Анализ различных технологических операций, выполняемых роботами, показывает, что в общем случае вид силовых взаимодействий сводится к следующим силам и моментам: силы и моменты сил трения между РО и ОР при их контактном взаимодействии; гармонические и импульсные активные силы  $F(t) \neq 0 \forall 0 \leq t \leq \tau$  и  $F(t) = 0 \equiv t > \tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса; силы и моменты сил, имеющих постоянную величину или дозированное значение; силы и моменты сил, пропорциональных перемещениям РО  $\vee \wedge$  ОР, имеющие характер сил и моментов сил упругости.

# **1. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ**

## **1.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РОБОТАМИ И КОМПЛЕКСАМИ**

В зависимости от типа робота и сложности выполняемого технологического процесса иерархическая структура системы управления может иметь различное количество уровней. Чаще всего выделяют четыре уровня управления [62]. 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 поставленное задание расчленяет на элементарные операции (подвести схват к детали, сориентировать схват относительно детали, захватить ее и т.п.). Tактический (второй) – уровень, где элементарные операции распределяются на движения отдельных СП. Исполнительный (первый) – уровень, на котором осуществляются заданные движения отдельных СП. Если на первом и втором уровне осуществляется управление состоянием в виде управления движением РО, то на третьем – управление сменой состояний.

Кроме иерархичности структуры системы управления одним из основополагающих принципов управления МР является комбинированный характер управления, в основе которого лежит сочетание, комбинация нескольких способов управления.

Так, например, с точки зрения участия человека в управлении возможны как ручное, дистанционное или автоматическое управление, так и их сочетание – интерактивное (автоматизированное, дистанционно-автоматическое (ДАУ)) управление [27]. Наилучшее качество управления на тактическом и исполнительном уровне достигается применением ком-

бинированных систем, сочетающих в себе принципы программного управления и управления в функции текущего состояния внешней среды. Изменение реальных условий работы учитывается в виде стабилизации (коррекции) программного (номинального) управления путем введения дополнительных обратных связей, штрафных функций, сигнальной или параметрической самонастройки и т.п.

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, отработка 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 ЗУ выполняющих функции программатора. В качестве алгоритмов формирования  $g(t)$  применяются геометрические и кинематические алгоритмы управления [59]. Основу построения геометрических алгоритмов – позиционных алгоритмов управления по вектору перемещения, и кинематических алгоритмов – алгоритмов управления по вектору скорости, составляют результаты решения обратных задач кинематики [39] 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, 59], определяемые, например, исходя из концепции обратных задач динамики.

Необходимо заметить, что в современных системах управления роботами применяется централизованное управление, когда вся иерархическая структура реализуется на одной ЭВМ, и децентрализованное управление, реализуемое локальной сетью из основной ЭВМ и системы подчиненных ей микропроцессоров и микроЭВМ. В работах М. Вукобратовича, Э. Накано, К. Фу, Р. Гонсалеса, К. Ли показано, что в случае изменяющихся параметров и динамической взаимосвязи СП централизованное номинальное управление непригодно.

Децентрализованное управление предполагает на первом этапе декомпозицию системы путем ее разделения на независимые подсистемы исполнительных приводов (ИП) [22] отдельных СП с помощью линейного и нелинейного управления, а также введения перекрестных компенсирующих связей. Входными сигналами ИП отдельных СП являются траектории в обобщенных координатах, которые пересчитываются известным способом по траектории, заданной в координатах РО. На втором этапе осуществляется синтез локального управления на уровне отдельных СП.

В случае нестационарности массоинерционных параметров ИУ и необходимости компенсации различного вида нелинейных динамических сил применяются как неадаптивные, так и адаптивные алгоритмы управления.

К числу неадаптивных алгоритмов управления относятся алгоритмы оптимального управления для заданной номинальной траектории  $X_0(t)$  и линеаризованной 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.

Если требуется осуществить относительно медленное перемещение РО с невысокими требованиями по точности отслеживания траектории и позиционирования, то наиболее целесообразным является децентрализованное управление. В этом случае каждая СП управляется локальным контроллером, который учитывает только динамику собственно перемещаемого звена. Динамическое взаимовлияние СП не учитывается.

Локальное управление синтезируется для каждой подсистемы из условия устойчивости. В работах S. Arimoto, F. Migazaki, В.С. Медведева, А.Г. Лескова, А.С. Ющенко доказано, что для позиционного управления положением РО можно эффективно применять локальный ПИД-регулятор.

Аналогичный результат получен Ю.А. Борцовым, которым доказано, что при передаточном отношении редукторов ИУ больше 100 – 130 существенно ослабляется влияние нелинейных составляющих модели и уменьшается взаимовлияние СП. В связи с этим для управления двигателями

каждой СП используется ПД или ПИД-регуляторы, синтезированные на основе линейных моделей невзаимосвязанных ИП. Такая децентрализованная система управления эффективна при слабой взаимосвязи между СП. Однако по мере повышения скорости движения ИУ и при переходе к безредукторным ИП динамическое взаимовлияние становится существенным, что приводит к снижению качества движения робота с данными регуляторами.

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.

М. Вукобратовичем предложено для компенсации динамического взаимовлияния СП, исключить которое локальные регуляторы не могут, применять дополнительное глобальное управление [22], основанное на применении дополнительной силовой обратной связи (рис. 1.1).

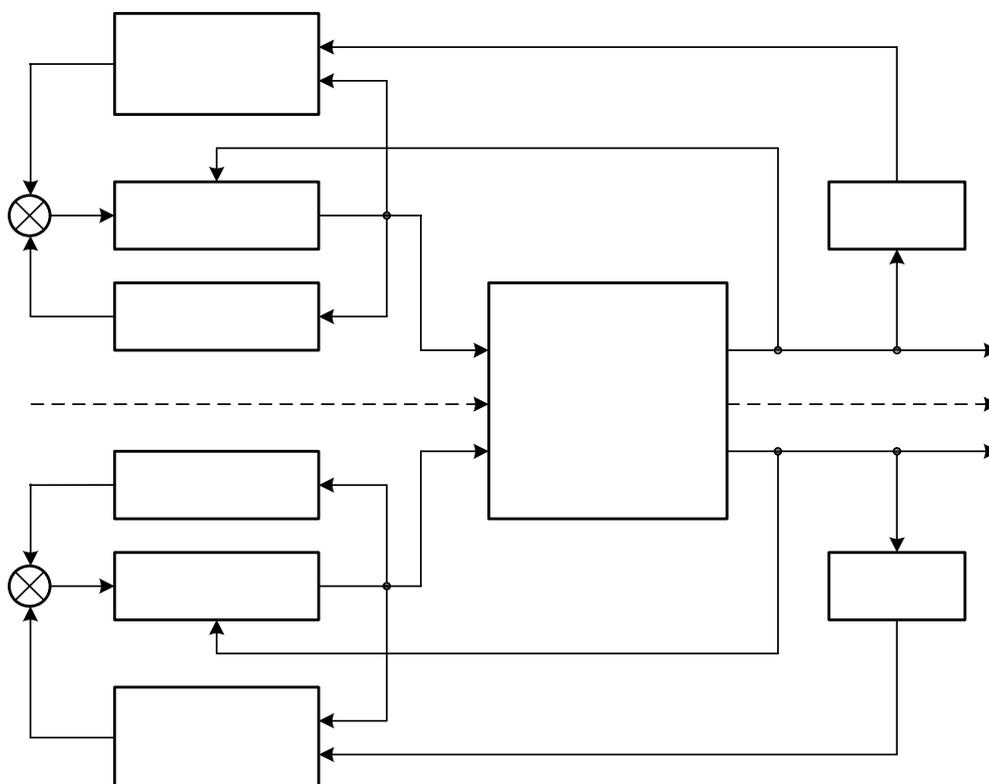


Рис. 1.1. Функциональная схема системы глобального управления с силовой обратной связью

Вследствие измерения сил 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. 1.2) [22]. 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  $S_0(t)$ .

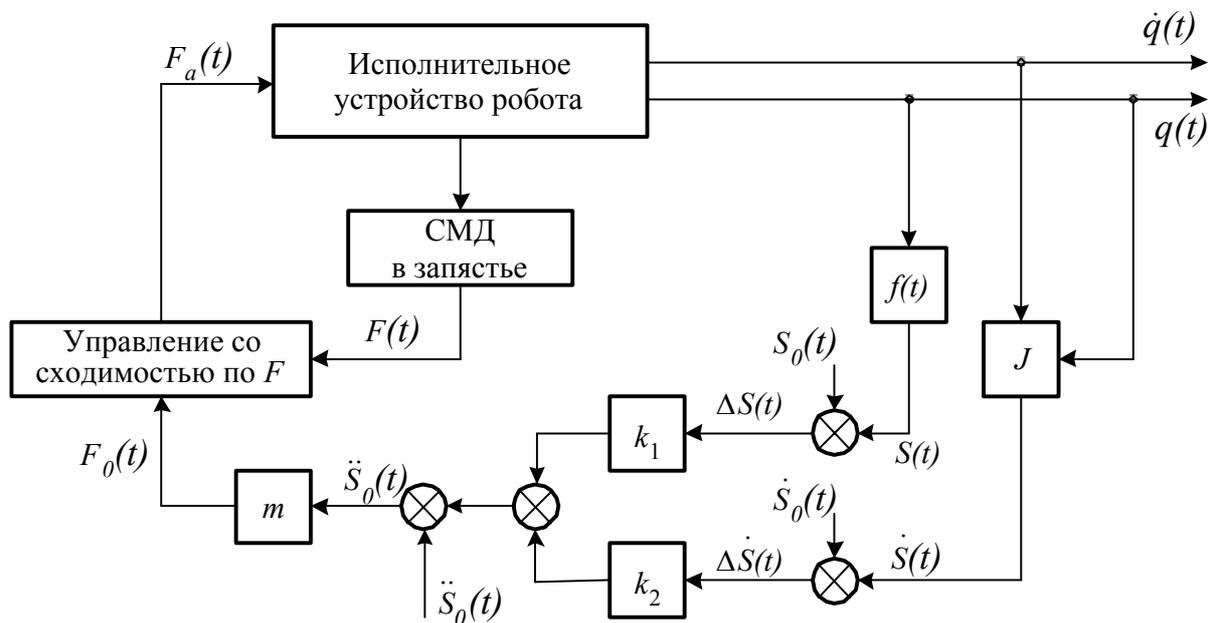


Рис. 1.2. Система согласованного ПСУ со сходимостью по вектору силы

Внутренний контур управления со сходимостью по силе обеспечивает определение управляющих моментов в каждой СП, которые обеспечивают реализацию сил  $F_0(t)$ .

В работах [34, 35, 36] реализована возможность построения систем с адаптацией управляющего воздействия посредством применения четвертой формы инвариантности на примере замкнутого привода с передаточными функциями по управляющему  $g(p)$  и возмущающему  $f(p)$  воздействию соответственно  $W(p)$  и  $V(p)$ .

Ошибка  $\varepsilon$  подобного привода

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{1+W(p)} g(p) + \frac{V(p)}{1+W(p)} f(p).$$

С учетом соответствующих полиномов и обозначения  $C(p)/D(p) = Cd(p)$

$$\varepsilon(p) = \frac{B(p)}{A(p) + B(p)} g(p) + \frac{B(p)Cd(p)}{A(p) + B(p)} f(p),$$

$$\text{или в строчной форме записи } H(p)\varepsilon(p) = B(p)g(p) + L(p)f(p), \quad (1.1)$$

где:  $H(p) = A(p) + B(p)$ ;  $L(p) = B(p) + Cd(p)$ .

Постановка задачи обеспечения четырех форм инвариантности по отношению к управляющему  $g(p)$  и возмущающему  $f(p)$  воздействиям для выражения (1.1) записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} 1. & B(p) \neq 0, g(p) = 0; \quad L(p) \neq 0, f(p) = 0. \\ 2. & B(p) = 0, g(p) \neq 0; \quad L(p) = 0, f(p) \neq 0. \\ 3. & B(p) \neq 0, g(p) \neq 0; \quad B(p)g(p) = 0; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$L(p) \neq 0, f(p) \neq 0, L(p)f(p) = 0.$$

$$\begin{aligned} 4. & B(p) \neq 0, g(p) \neq 0, \quad B(p)g(p) - B_1(p)g_1(p) = 0; \\ & L(p) \neq 0, f(p) \neq 0, L(p)f(p) - L_1(p)f_1(p) = 0. \end{aligned}$$

Рассмотрим вопрос обеспечения четвертой формы инвариантности в следующей постановке. Имеется система с номинальным управлением  $g_0(p)$  и возмущением на выходе  $f_0(p)$ . Последнее обусловлено создаваемым на выходе силовым воздействием при выполнении технологического процесса. По различным технологическим факторам имеется отклонение фактического усилия от расчетного на величину  $\Delta f(p) = F(p)[x_0(p) - x(p)]$ . Необходимо ошибку, обусловленную составляющей  $\Delta f(p)$ , скомпенсировать дополнительным управлением  $\Delta g(p)$ . Иначе имеем функции управления и возмущения в виде

$$g(p) = g_0(p) + \Delta g(p); f(p) = f_0(p) + \Delta f(p).$$

Для компенсации дополнительного возмущения условие четвертой формы инвариантности:

$$L(p)\Delta f(p) - B_2(p)g(p) = 0. \quad (1.3)$$

Отметим принципиальное отличие соотношений (1.3) от (1.2). Классическая трактовка четвертой формы инвариантности предусматривает введение дополнительной составляющей в управление для каждого канала по своему воздействию: для управляющего воздействия – в функции воздействия  $g(p)$ , для возмущающего воздействия – в функции возмущающего воздействия  $f(p)$ . Здесь же для парирования возмущения  $f(p)$  вводится

дополнительная составляющая в управляющее воздействие  $g(p)$  в виде  $\Delta g(p)$ . Такой вариант организации управления в работе [36] рассматривается как модификация четвертой формы инвариантности.

Выполнение условий модифицированной четвертой формы инвариантности для компенсации  $\Delta f(p)$  возможно в следующих вариантах:

1) формированием дополнительного полинома  $B_2(p)$  при выбранном  $\Delta g(p)$ ;

2) формированием дополнительного управления  $\Delta g(p)$  при выбранном  $B_2(p)$ ;

3) выбором произведения  $B_2(p) \Delta g(p)$ .

С позиции технической реализации целесообразно вводить дополнительное управление, которое при выбранной функции  $B_2(p)$  определяется из условия

$$\Delta g(p) = \frac{L(p)\Delta f(p)}{B_2(p)}.$$

Реализация этого условия требует определения производных от возмущения. Однако можно выделить типовые режимы и ситуации, когда дополнительное управление можно сформировать, используя методы самонастройки.

Изображение ошибок в двухкоординатной системе приводов, работающей в декартовой системе в плоскости  $XOZ$  и выполняющей технологический процесс перемещения детали, расположенной в исполнительном устройстве, например вала по технологической траектории, например, фаске отверстия, определяется из выражений

$$\begin{cases} H_x(p)\delta_x(p) = B_x(p)g_{xz}(p) + L_x(p)f_{xz}(p), \\ H_z(p)\delta_z(p) = B_z(p)g_{zx}(p) + L_z(p)f_{zx}(p), \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $g_{xz}(p)$ ,  $g_{zx}(p)$ ;  $f_{xz}(p)$ ,  $f_{zx}(p)$  – проекции вектора задания  $G(x,z)$  и возмущения  $F(x,z)$  в операторной форме.

С учетом отклонения вектора возмущения и введения дополнительного управления система (1.4) дополняется соответствующими членами и принимает вид

$$\begin{cases} H_x(p)\delta_x(p) = B_x(p)g_{xz}(p) + L_x(p)f_{xz}(p) + L_x(p)\Delta f_{xz}(p) + B_{2x}(p)\Delta g_{xz}(p); \\ H_z(p)\delta_z(p) = B_z(p)g_{zx}(p) + L_z(p)f_{zx}(p) + L_z(p)\Delta f_{zx}(p) + B_{2z}(p)\Delta g_{zx}(p). \end{cases} \quad (1.5)$$

Для системы (1.5) условие выполнения четвертой модифицированной формы инвариантности относительно дополнительных возмущений  $\Delta f_{xz}(p)$ ,  $\Delta f_{zx}(p)$

$$\begin{aligned}L_x(p)\Delta f_{xz}(p) + B_{2x}(p)\Delta g_x(p) &= 0; \\L_z(p)\Delta f_{zx}(p) + B_{2z}(p)\Delta g_z(p) &= 0.\end{aligned}$$

Вне зависимости от способа разложения заданной геометрической траектории на управляющие функции (независимые или параметрические) одна из координат может рассматриваться как аргумент, а другая как его функция. Это дает возможность выполнения условия (1.5) в различных вариантах формирования составляющих  $\Delta g_x(p)$ ,  $\Delta g_z(p)$  :

- введение дополнительных составляющих в каждом канале;
- введение дополнительной составляющей в канале координаты-функции (координата-аргумент без изменения);
- перекрестной коррекцией (выделение дополнительного возмущения в одном канале и введении дополнительного управления в другом).

Условия (1.3), (1.5) не накладывают ограничений на закон изменения управляющего воздействия. Они в равной мере относятся как к системам программного управления, так и к системам слежения за подвижными объектами.

Силовой моментное очувствление МР 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 (ТВС) и лазер-робота. Управление осуществляется в виде позиционного управления с коррекцией в функции распределения сил в тросах или в виде управления ускорением движения с учетом действия внешних сил.

Управление перемещением ОР осуществляется двумя МР, 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.

При действии связей движение РО становится несвободным, вынужденным, и задача управления МР заключается в управлении по вектору силы (силовое управление), которое является альтернативой чисто позиционного управления.

Связи между РО и ОР носят комбинированный характер и являются позиционно-силовыми связями. Значимость позиционных или силовых связей для конкретных технологических операций определяется весовым множителем  $\beta$  некоторого формального параметра  $\alpha = bFTc-1$ . При  $\beta = 1$  ( $\alpha \rightarrow 0$ ) имеем позиционное управление, при  $\alpha \rightarrow 0$  – силовое управление, а при  $0 < \alpha < F$  – комбинация позиционного и силового управлений. То есть позиционное или силовое управление являются граничным в определенном смысле вырожденным способом управления МР при выполнении узкого класса технологических переходов.

Классификация алгоритмов управления ПР и МР с ДАУ при работе со связанным объектом может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.3 и 1.4.

Двусторонность манипуляционных действий РО с ОР в случае их механического контакта приводит к целесообразности применения принципа двухканального управления в более широком смысле, чем двухканальность приводов, рассматриваемая в работах А.А. Казамарова, М.В. Меерова, Ю.Я. Морговского, Б.В. Новоселова, И.В. Рубашкина, О.О. Соболева, Б.К. Чемоданова. Под двухканальным управлением понимается управление, содержащее один или несколько принципов построения.

1. Применение собственно двухканальных исполнительных приводов: однодвигательных и двухдвигательных, у которых в качестве регулируемых координат рассматриваются как  $F \vee \wedge (S \vee \wedge \dot{S})$ , так и их соотношение, в том числе и в функции заданной работы и мощности  $(A_0, N_0)$  позиционно-силового взаимодействия РО с ОР. Регулирование осуществляется как в режиме автоматического управления, так и в режиме дистанционного управления или их комбинации – дистанционно-автоматическом управлении.

С точки зрения направления передачи перемещения, двухканальные системы дистанционного управления манипуляторами являются необратимыми или в случае необходимости – двухрежимными [27].



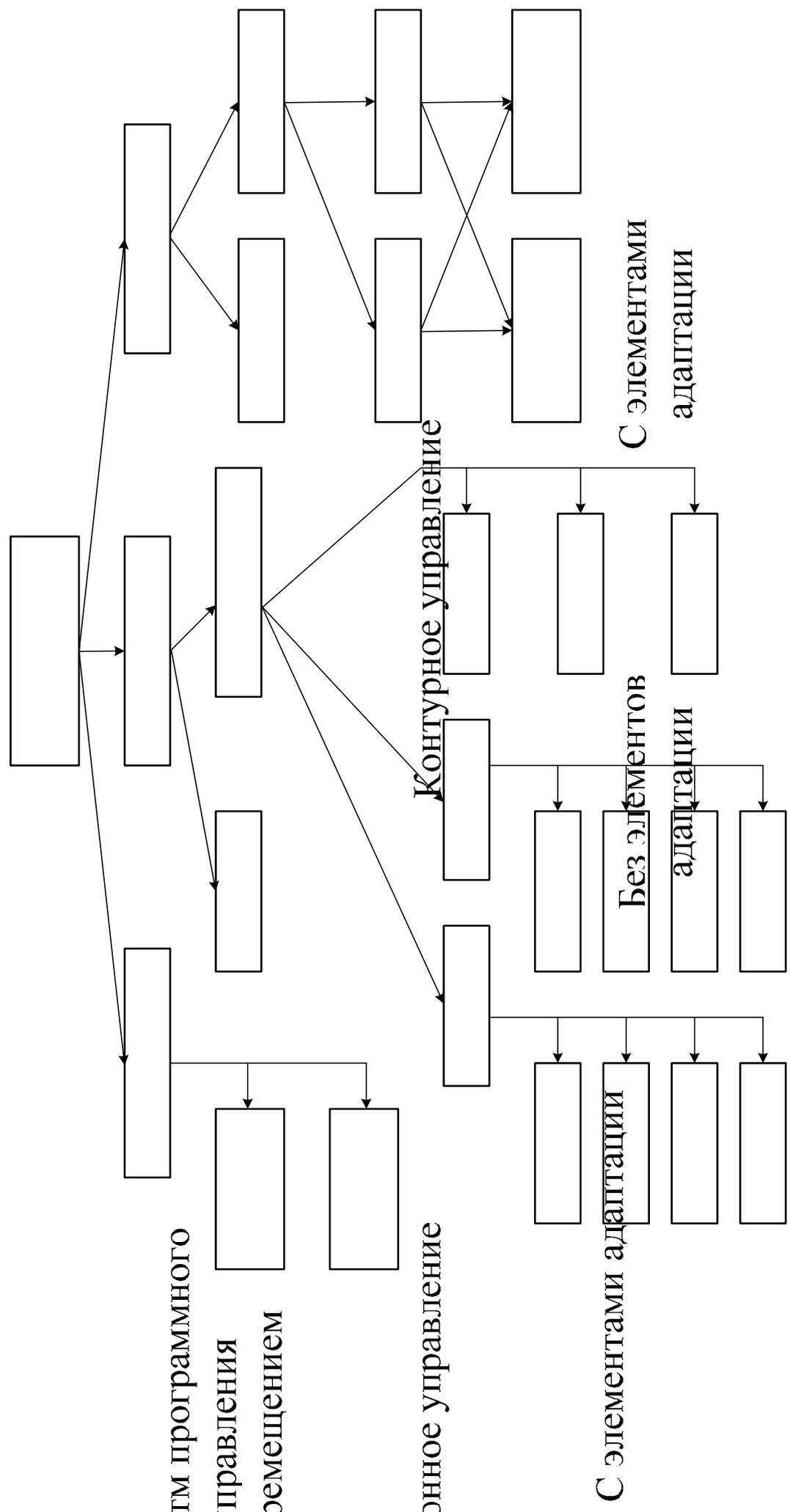


Рис. 1.4. Классификация алгоритмов программного управления перемещением МР при работе со связанным объектом

С направляющей поверхностью      без направляющей поверхности

С элементами адаптации      без элементов адаптации

2. Применение в системах управления и приводах 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 механизмов.

3. Управление двумя группами СП одного ИУ, двумя ИУ, ИУ робота и технологической оснасткой, например, сборочным столом.

4. Представление двухканального управления по принципу «ведущий – ведомый».

При создании лазер-роботов [1] последний принцип позволил решить новые для робототехники задачи: устройство управления обеспечивает перемещение оптической головки (ОГ) по номинальной траектории, а система транспортировки излучения отслеживает это перемещение; объект работ совершает произвольные перемещения, а ИУ лазер-робота, являясь ведомым, отслеживает это перемещение; при решении задачи идентификации обрабатываемой поверхности сигналы с информационной системы самоустанавливающейся ОГ поступают на ЭВМ, которая решает обратную задачу.

Преобразованные координаты передаются с ЭВМ на приводы СП, и ИУ лазер-робота отслеживает перемещение головки.

Необходимость выполнения технологических операций в неполнозаданной или недетерминированной среде при внешних возмущающих воздействиях случайного характера приводит к рассмотрению концепции интеллектуального управления роботами.

Общая концепция организации интеллектуального управления роботами, в том числе на базе комплексного применения технологии экспертных систем (ЭС), разработана в научной лаборатории мехатроники и робототехники кафедры проблем управления МИРЭА под руководством акад. И.М. Макарова и проф. В.М. Лохина. Центральным положением развиваемого подхода является допущение о целесообразности и возможности построения иерархии управления с применением технологии ЭС на каждом из её уровней. Проблема интеллектуализации уровня исполнительных

приводов связана с обеспечением активной адаптации системы управления приводами к изменениям внешней среды и к вариациям собственных параметров. Интеллектуальный блок привода, обеспечивающий решение этой задачи, функционально организуется на основе соединения ЭС и контроллера в экспертном регуляторе (ЭР) и замыкает систему в пространстве её параметров. Интеллектуальный блок, выполняющий функции ЭР, представляет программный продукт, состоящий из пяти основных модулей: супервизора, базы знаний, базы алгоритмов, базы данных и механизма логического вывода, в котором порождается экспертное заключение по управлению системой.

Однако несмотря на отмечаемый авторами ряд явных достоинств развиваемого подхода, необходимо отметить, что полученные результаты носят пока исследовательский характер, и перспектива развития интеллектуальных систем управления многофункциональными роботами на базе ЭР лежит в направлении сочетания ЭС с нейронными сетями и транспьютерными технологиями.

Другое перспективное направление создания интеллектуальных систем управления роботами основано на применении нечетких логических регуляторов (НЛР), использующих концепции моделей нечеткой логики, модели нечеткой импликации и композиционного правила логического вывода.

Основной проблемой при синтезе НЛР является конструирование его базы знаний (БЗ). Опыт и знания человека-оператора (эксперта) при построении базы знаний НЛР робототехнической системы, как и другой технической системы, вносятся следующими способами: оператор-эксперт управляет МР, за которым «наблюдает» регулятор, который запоминает все действия эксперта и заполняет свою БЗ; оператор-эксперт формирует свое действие при каждой наблюдаемой ситуации в виде продукции «если..., то...», множество которых составляет содержимое БЗ регулятора.

Проблема конструирования БЗ полностью идентична проблеме программирования роботов, эксплуатируемых в условиях неопределенности внешней среды способом обучения. Обучение робота заключается в проведении его РО по требуемой траектории с запоминанием соответствующих элементов движения и последующем повторении их в автоматическом режиме.

При прямом обучении используется специальное устройство, подсоединенное к РО робота, или оператор прикладывает силу непосредственно к последнему звену ИУ. В случае экстремальных условий эксплуатации или других условий, исключающих нахождение оператора в рабочей зоне робота, а также при использовании в СП исполнительного устройства робота самотормозящих элементов применение данного способа обучения невозможно. Поэтому применяется не прямое обучение, когда используется 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, фиксируются только конечные отрезки каждого интервала пути, а промежуточные точки рассчитываются в результате применения интерполяционных процедур.

Данные способы обучения технологических роботов при действии внешних связей и неопределенности взаимодействия с внешней средой практически неприменимы, 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.

Поэтому единственно эффективным путем программирования технологических роботов с силомоментным оцувствлением, особенно при экстремальных условиях эксплуатации, является прямое или не прямое обучение с одновременным заданием  $\bar{F}_0, \bar{S}_0, \dot{S}_0$ , реализуемое в классе полуавтоматического или копирующего управления.

В результате анализа существующего уровня систем программирования и управления технологическими роботами при действии внешних связей и экстремальных условий эксплуатации за основу целесообразно

принять концепцию управления, представляющую собой сочетание адаптивного управления с естественным интеллектом, реализуемым применением методов дистанционного управления роботами и манипуляторами.

Особенностью управления технологическими роботами и манипуляторами при действии внешних связей является разрывность законов управления. Практически непрерывных законов управления в целом не существует. Действительно, принципиальный характер разрывности управления роботами 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 управление и т.д. Вышесказанное позволяет отнести рассматриваемые системы к гибридным системам [11], в которых разрывный 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».

## 1.2. СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РОБОТАМИ И КОМПЛЕКСАМИ

Наиболее целесообразным способом управления состоянием и сменной состоянием нелинейной динамической системы «РО – ОР» в условиях неопределенности и нестационарности позиционно-силового взаимодействия робота с неструктурированной внешней средой при существенном изменении совершаемой при этом работы  $A_0$  и мощности  $N_0$  как меры взаимодействия является позиционно-силовое управление (ПСУ) [28]. В отличие от идентичных определений Н. Asada, Н. Kazerooni, М. Liu, М. Vukobratovic, А. West, Ф.М. Кулакова, В.С. Кулешова, Ю.В. Подураева, А.С. Ющенко и др. понимается, что ПСУ на исполнительном уровне решает задачи взаимосвязанного (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 МР. На тактическом уровне ПСУ решает задачи формирования или коррекции алгоритмов управления сменной состоянием динамической системы «РО – ОР».

С точки зрения взаимодействия алгоритмов управления по  $S$  и/или  $\dot{S}$  и по  $F$  ПСУ представляется в виде независимого (раздельного), согласованного (совместного) и комбинированного (связанного) управлений. При независимом ПСУ многомерным исполнительным устройством (ИУ) одни степени подвижности (СП) управляются по  $S$  и/или  $\dot{S}$ , а другие СП 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.

В работах упомянутых выше специалистов аналогичные виды управлений соответственно названы импедансным (impedance control), позиционно-силовым (position / force control), силовым (force control), гибридным

ПСУ (hybrid position / force control), параллельным ПСУ (parallel position / force control) и гибридно-импедансным управлением (hybrid-impedance control).

В зависимости от задачи, решаемой роботами и РТС с автоматическим, дистанционным и дистанционно-автоматическим управлениями, применяется робастное, нейро-нечеткое и адаптивное ПСУ, в том числе на основе теории управления  $H_\infty$  [47]. С точки зрения реализации системы ПСУ подразделяются (рис. 1.5) на системы одно- (ОСД) и двустороннего (ДСД) действия с автоматическим, дистанционным и дистанционно-автоматическим управлениями. К системам ОСД относятся системы командного, копирующего и полуавтоматического управлений без отражения сил. В качестве задающего устройства (ЗУ) используются соответственно специальные выносные пульта, 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 ( $F_{OC}$ ).

К системам ДСД (СДСД) относятся двухканальные системы с различными видами отражения сил оператору, который осуществляет копирующее, полуавтоматическое или дистанционно-автоматическое управления МР [27]. Все разновидности СДСД подразделяются на симметричные и несимметричные системы [29]. 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 подразделяются 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, используются обратные связи с датчиками моментов (ДМ) и упругими элементами с соответствующим включением датчиков положения.

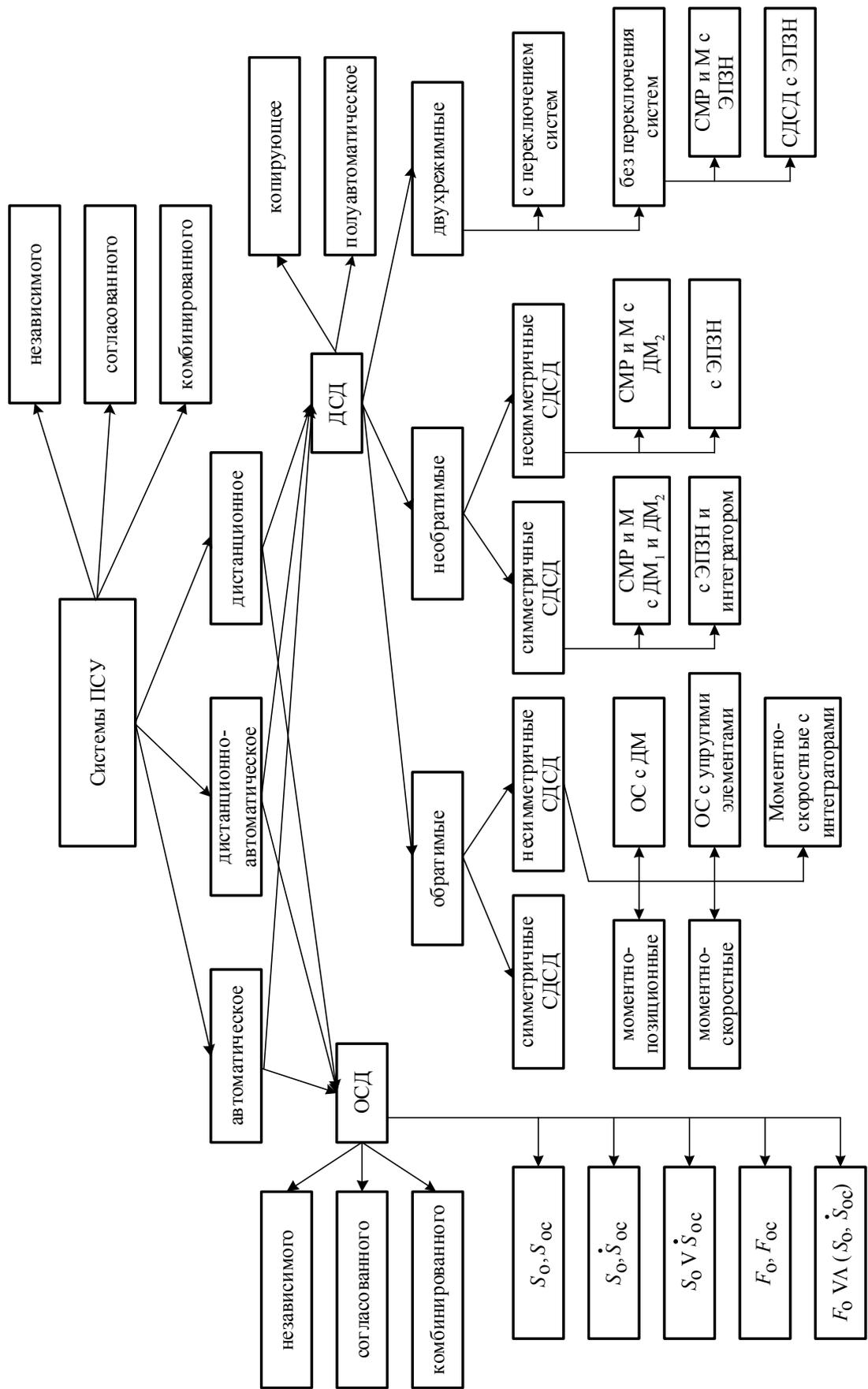


Рис. 1.5. Классификация систем ПСУ манипуляционными роботами

Необратимые СДСД симметричного и несимметричного типа обеспечивают передачу перемещения только в одном направлении – от ЗУ к ИУ. Симметричные необратимые СДСД подразделяются на системы с элементами с переменной зоной нечувствительности (ЭПЗН) и интеграторами, а также системы моментной разгрузки и масштабирования (СМР и М) с датчиками моментов  $DM_1$  и  $DM_2$ . Несимметричные необратимые СДСД применяются в виде систем с ЭПЗН и СМР и М с датчиками моментов  $DM_2$  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.

Необходимым, но в ряде случаев недостаточным условием реализации ПСУ, является 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 [54].

### **Системы независимого ПСУ**

Независимое ПСУ реализуется в классе разрывного логического управления одностепенными или многостепенными ИУ роботов и манипуляторов. Подобные системы относятся 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 [16].

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  $\text{СП}_i$  – управляемые по  $F$  и  $\text{СП}_j$  – управляемые по  $S$  и/или  $\dot{S}$  в общем случае осуществляется согласно алгоритму

$$U = (\varepsilon_{F_0} J^T(q) W_{PF} \forall U_{\text{ДК}} \neq 0 \wedge \text{СП}_i) \vee (\varepsilon_{S_0} J^{-1}(q) W_{PS} \wedge \vee \varepsilon_{\dot{S}_0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \varepsilon_{F_0} \vee \varepsilon_{S_0} \vee \varepsilon_{\dot{S}_0}) \vee (\varepsilon_{F_0} \vee \varepsilon_{S_0} \vee \varepsilon_{\dot{S}_0}) \forall U_{\text{ДК}} = 0 \wedge \text{СП}_j, \quad (1.6)$$

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

$$U = \begin{cases} [\varepsilon_{F_0} J^T W_{PF} D + \varepsilon_{S_0} J^{-1} W_{PS} (1 - D) - (\dot{S} J^{-1} W_{P\dot{S}} + J^T F)] \forall g \in (F_0, S_0) \\ [\varepsilon_{F_0} J^T W_{PF} D + \varepsilon_{\dot{S}_0} J^{-1} W_{P\dot{S}} (1 - D) - J^T F] \forall g \in (F_0, \dot{S}_0) \end{cases}, \quad (1.7)$$

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 (1.6) и (1.7).

При решении задачи контроля сил, перемещений или скоростей перемещения вместо элементов сравнения задающих воздействий и сигналов обратных связей применяются элементы с переменной зоной нечувствительности [27]

$$\varepsilon_F = \begin{cases} \varepsilon_{FO} \forall F > F_0; \\ 0 \forall F \leq F_0; \end{cases} \quad \varepsilon \vee \dot{\varepsilon}_S = \begin{cases} \varepsilon_{SO} \vee \dot{\varepsilon}_{SO} \forall S > S_0 \vee \dot{S} > \dot{S}_0; \\ 0 \forall S \leq S_0 \vee \dot{S} > \dot{S}_0. \end{cases}$$

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  $g_2$ »:

$$g = \begin{cases} g_1 = S_0 \vee \wedge \dot{S}_0, g_2 = F_0 : (A_0 S_0^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{S}_0^{-1}); \\ g_2 = F_0, g_2 = S_0 \vee \wedge \dot{S}_0 : (S_0 = A_0 F_0^{-1}, \dot{S}_0 = N_0 F_0^{-1}). \end{cases} \quad (1.8)$$

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 алгоритмам (1.8) 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

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F_0} J^T(q) W_{PF} V(N_0 - N) J^{-1}(q) W_{PN} \forall \text{ЭП (рис. 1.6, а);} \\ \bar{\varepsilon}_{F_0} D J^T(q) W_{PF} + (N_0 - N)(1 - D) J^{-1}(q) W_{PN} \forall \text{ЭП (рис. 1.6, б)} \equiv D = 0 \vee 1; \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)} \equiv \dot{S}_0 = N_0 \bar{F}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} (1-D) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \\ \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.6, в)} \equiv \dot{S}_0 = N_0 \bar{F}_0^{-1} \wedge (D=0 \vee 1). \end{cases}$$

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

$$\bar{U} = \begin{cases} (N_0 - N) J^T(q) W_{PN} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.6, а)}; \\ (N_0 - N) D J^T(q) W_{PN} + \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} (1-D) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.6, в)} \equiv D=0 \vee 1; \end{cases} \quad (1.10)$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)} \equiv \bar{F}_0 = N_0 \dot{S}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} (1-D) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, в)} \equiv \bar{F}_0 = N_0 \dot{S}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D=0 \vee 1). \end{cases}$$

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

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee (A_0 - A) J^{-1}(q) W_{PA} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} D J^T(q) W_{PF} + (A_0 - A) (1-D) J^{-1}(q) W_{PA} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, б, в)} \equiv D=0 \vee 1; \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{S0} J^{-1}(q) W_{PS} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)} \equiv \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{S0} (1-D) J^{-1}(q) W_{PS} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, в)} \equiv \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D=0 \vee 1). \end{cases}$$

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

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{S0} J^{-1}(q) W_{PS} \vee (A_0 - A) J^T(q) W_{PA} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)}; \\ \bar{\varepsilon}_{S0} D J^{-1}(q) W_{PS} + (A_0 - A) (1-D) J^T(q) W_{PA} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, б, в)} \equiv D=0 \vee 1; \end{cases} \quad (1.12)$$

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} \vee \bar{\varepsilon}_{S0} J^{-1}(q) W_{PS} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, а)} \equiv \bar{F}_0 = A_0 \bar{S}_0^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} D J^T(q) W_{PF} + \bar{\varepsilon}_{S0} (1-D) J^{-1}(q) W_{PS} \forall \exists \Pi \text{ (рис. 1.7, в)} \equiv \bar{F}_0 = A_0 \bar{S}_0^{-1} \wedge \\ \wedge (D=0 \vee 1). \end{cases}$$

В выражениях (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) через  $W_{PN}$  и  $W_{PA}$  обозначены передаточные функции и операторы регуляторов мощности и работы. Реа-  
36

лизация датчиков мощности и работы возможна в виде специальных датчиков и посредством перемножения соответствующих сигналов датчиков  $\bar{F}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\dot{\bar{S}}$ .

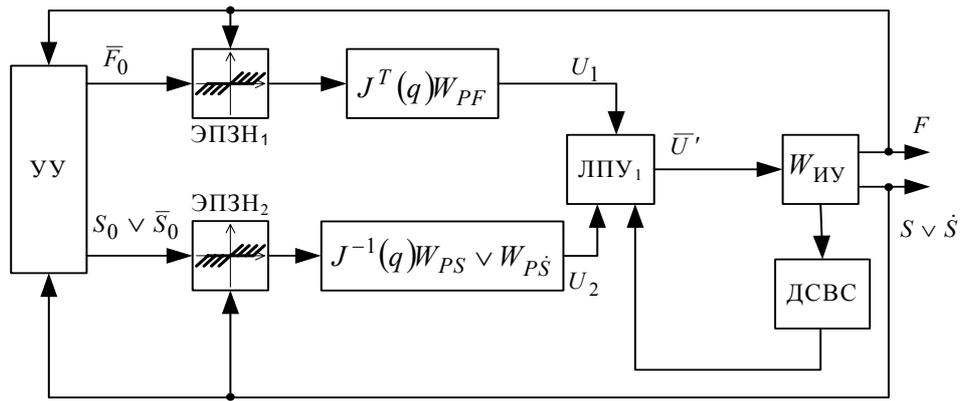
Структурные схемы систем с независимыми двухзонными ПСУ исполнительных приводов роботов представлены на рис. 1.6. Система управления со структурной схемой представленной на рис. 1.6, *a* обеспечивает управление с дозированием сил, перемещения или скорости перемещения за счет применения ЭПЗН<sub>1</sub> и ЭПЗН<sub>2</sub> с соответствующими обратными связями. Обратные связи по силе и перемещению в системе, представленной на рис. 1.6, *б*, формируются в функции требуемых значений работы  $A_0$  и мощности  $N_0$  с помощью блоков деления и соответствующих уставок. ЛПУ<sub>2</sub> обеспечивает силовую обратную связь в функции  $A_0$  или  $N_0$ .

В системе управления, представленной на рис. 1.6, *в* сигнал задания по скорости формируется в функции требуемых значений  $N_0$  и  $F$ . ЛПУ<sub>1</sub> 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.

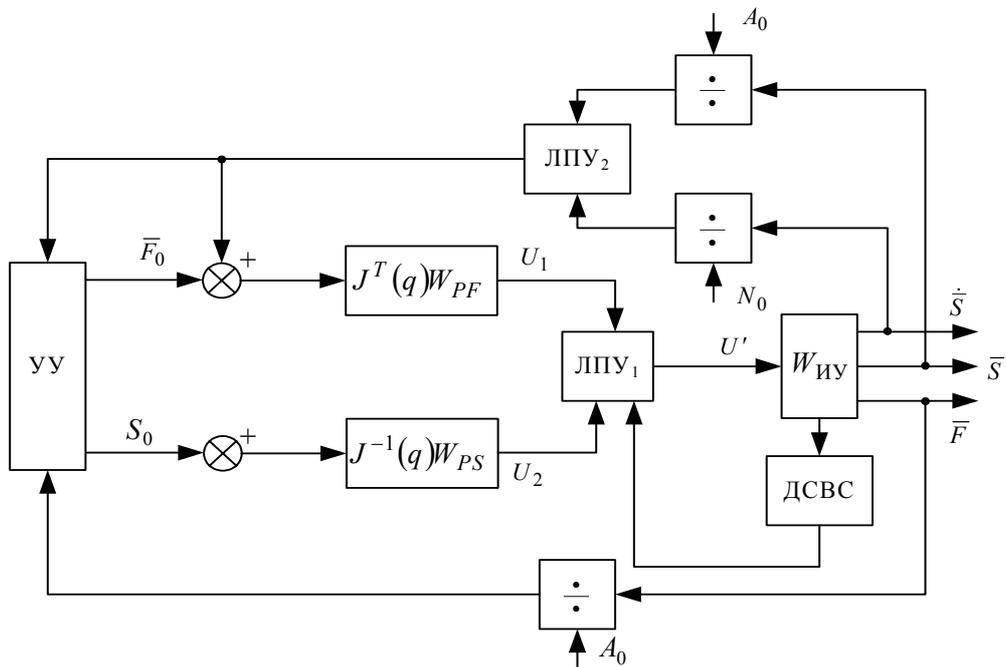
Если сигнал на выходе ЛПУ изменяется по закону

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

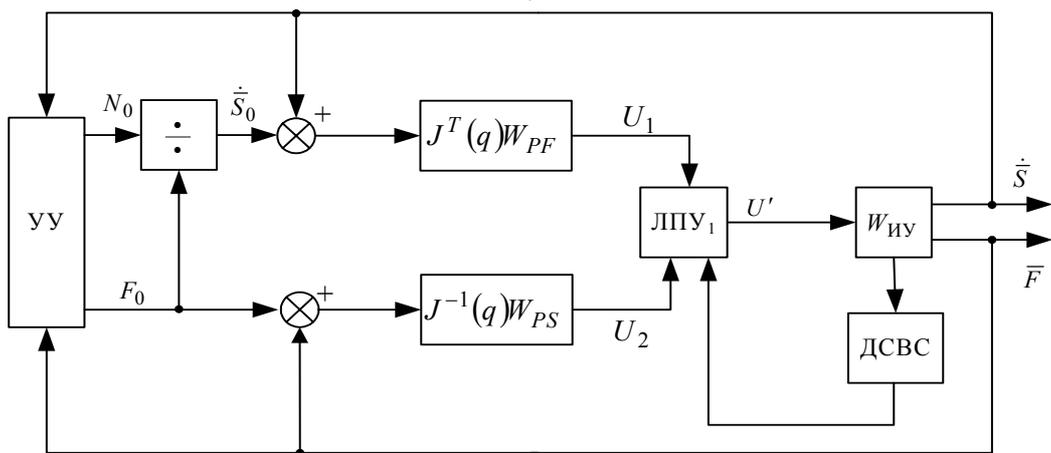
где  $K_1 \dots K_4$  – постоянные коэффициенты;  $S_c$  – координата препятствия (ОР), то двухканальная система независимого ПСУ работает в скользящем режиме. Организация скользящего режима или увеличение частоты переключения каналов управления приводят к вырождению системы с независимым управлением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



а)



б)



в)

Рис. 1.6. Структурные схемы систем независимого ПСУ исполнительными ЭП роботов

Если требуется повысить быстродействие отработки сигнала задания по силе  $F_0$ , согласовать направление действия силы и перемещения ИУ или исключить явление удара 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:

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

$$U_{\text{лпу}2} = \varepsilon_s W_{ps} \forall U_{\text{ПЭ}} = 0 \vee (F_0 \operatorname{sgn} \varepsilon_s - F) W_{PF} \forall U_{\text{ПЭ}} < 0;$$

$$U_{\text{лпу}3} = \begin{cases} \varepsilon_s W_{ps} \forall U_{\text{ПЭ}} = 0 \wedge t < t_1, \\ (F_0 (S_{\text{ПЭ}} - S) - F) W_{PF} \forall U_{\text{ПЭ}} \neq 0 : t_1 < t < t_2, \\ (S_{\text{ПЭ}} + \varepsilon_s^*) W_{ps} \forall U_{\text{ПЭ}} = 0 \wedge t > t_2. \end{cases}$$

Обозначенные:  $\varepsilon_s = (S_0 - S)$ ,  $\varepsilon_s^* = (S_0 (1 + Tp)^{-1} - S)$ ,  $\varepsilon_F = (F_0 - F)$  – векторы позиционных и силовых ошибок систем управления;  $W_{ps}$ ,  $W_{PF}$  – передаточные функции регуляторов по положению и силе;  $U_{\text{ПЭ}}$  – сигнал с порогового элемента в цепи сигнала датчика внешней среды;  $S_{\text{ПЭ}}$  – значение  $S_0$  при срабатывании ПЭ;  $\sigma$  – величина перерегулирования;  $t_2$  – момент повторного контакта;  $K > 1$ .

### Системы согласованного ПСУ

Целью согласованного ПСУ является координирующее управление посредством регулирования параметров, определяющих соотношение между траекторными координатами  $S$ ,  $\dot{S}$ ,  $\ddot{S}$  и силой  $F = [F; M]^T$ . В качестве данных параметров системы рассматривается податливость ( $C^{-1} = S/F$ ), демпфирование ( $\nu = F/\dot{S}$ ) и инерция ( $m = F/\ddot{S}$ ). В зарубежных источниках подобное управление называется управлением значением импеданса или 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 является своего рода управляемыми связями, накладываемыми 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  $\bar{S} \wedge \dot{\bar{S}}$ ), когда

$$\begin{aligned} \bar{U} \in & [(\bar{\varepsilon}_{\text{эКВ1}} J^{-1}(q) W_{PS} - \dot{\bar{S}} J^{-1}(q) K_{\dot{S}} - J^T(q) \bar{F}); (\bar{\varepsilon}_{\text{эКВ2}} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} - J^T(q) \bar{F}); \\ & (\bar{\varepsilon}_1 J^{-1}(q) W_{PS} + \bar{\varepsilon}_2 J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} - \dot{\bar{S}} J^{-1}(q) K_{\dot{S}} - J^T(q) \bar{F}); \\ & ((\bar{\varepsilon}_{S0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}} - \bar{I} - \bar{I}_K) J^T(q) W_{P1}] \forall \\ \forall \bar{\varepsilon}_{\text{эКВ1}} = & \bar{\varepsilon}_1 \vee \bar{\varepsilon}_3 : \bar{\varepsilon}_1 = (\bar{\varepsilon}_{S0} - \bar{\varepsilon}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{S0} \times \bar{S}_K); \bar{\varepsilon}_3 = \bar{\varepsilon}_{S0} : \bar{S}_0 = A_0 \bar{F}^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{\text{эКВ2}} = & \bar{\varepsilon}_2 \vee \bar{\varepsilon}_4 : \bar{\varepsilon}_1 = (\bar{\varepsilon}_{S0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} \times \dot{\bar{S}}_K), \bar{\varepsilon}_4 = \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} : \dot{\bar{S}}_K = N_0 \bar{F}^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{S0} = & (\bar{S}_0 - \bar{S}); \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} = (\dot{\bar{S}}_0 - \dot{\bar{S}}); \bar{\varepsilon}_{I0} = (\bar{I}_0 - \bar{I}); \\ \bar{I}_0 = & (\bar{\varepsilon}_{S0} W_{PS} - \dot{\bar{S}}) J^{-1}(q) W_{P\dot{S}}. \end{aligned}$$

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

В качестве примера на рис. 1.7 показаны структурные схемы ЭП с регулированием только податливости и демпфирования, аналогичные ЭП, рассмотренные 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

$$\begin{aligned} \bar{U} \in & \{(\bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} + \bar{S}_0); [(\bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F0} + \bar{F}_{\text{КЭКВ}}) \vee \wedge (\bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F0} \times \bar{F}_{\text{КЭКВ}})] J^T(q) W_{PF}\} \forall \\ \forall \bar{F}_{\text{КЭКВ}} = & [(\bar{F}_K(\bar{S}) \vee \wedge \bar{F}_K(\dot{\bar{S}})) \vee (\bar{F}_K(\bar{S}_S) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}})) \vee \\ & (\bar{F}_K(\bar{S}, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{S}, N_0)) \vee (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}, N_0))]: \\ & : \bar{F}_K(\bar{S}) = \bar{S} W_1(\bar{F}, \bar{S}) \vee \bar{S} f_1(\bar{S}); \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}) = \dot{\bar{S}} W_1(\bar{F}, \dot{\bar{S}}) \vee \dot{\bar{S}} f_1(\dot{\bar{S}}) \\ & \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) = \bar{\varepsilon}_{S0} W_2(\bar{F}, \bar{S}) \vee \bar{\varepsilon}_{S0} f_2(\bar{S}); \\ & \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}, N_0) = N_0 \dot{\bar{S}}^{-1} W_1(\bar{F}, \dot{\bar{S}}); \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) = \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S); \\ & \bar{S} = A_0 \bar{F}^{-1}; \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}, N_0) = \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}); \bar{S} = N_0 \bar{F}^{-1} \end{aligned}$$

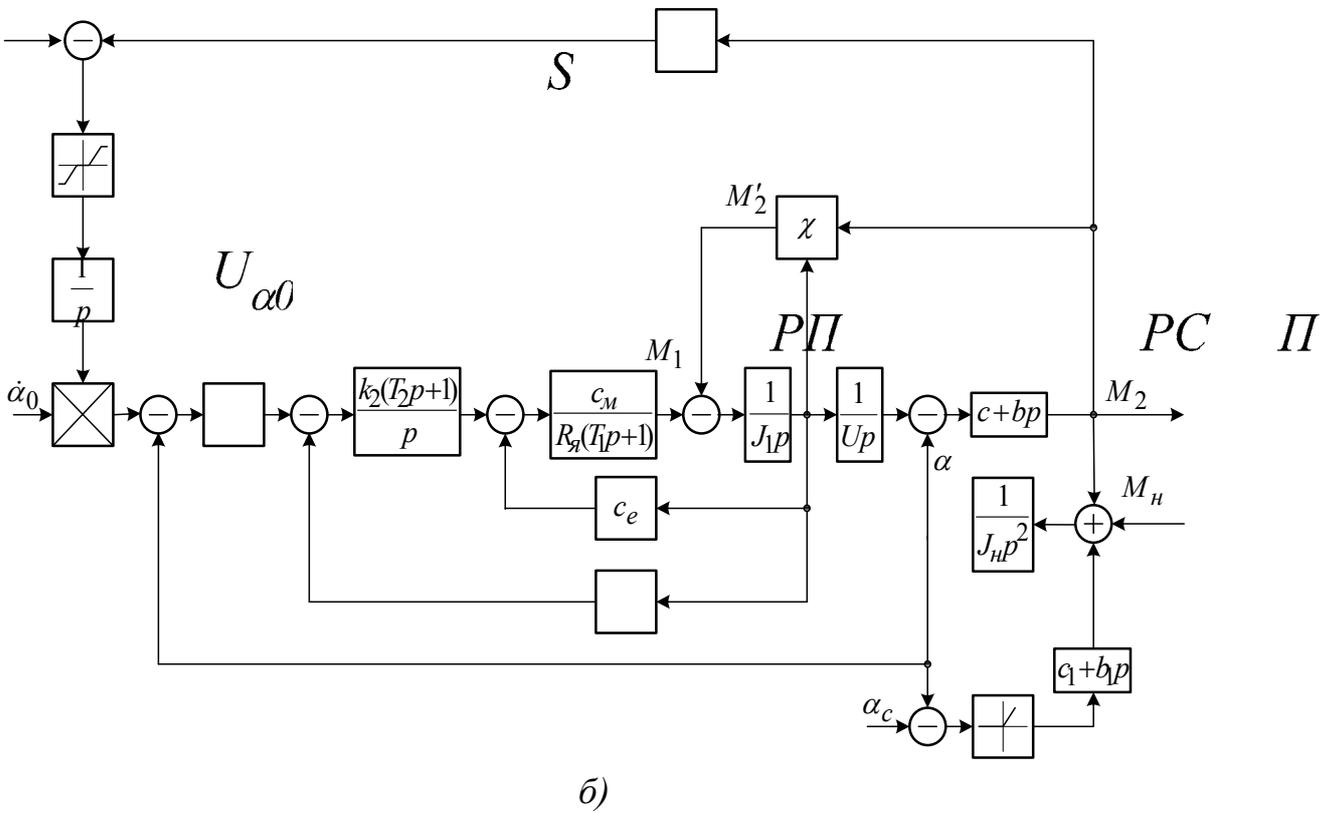
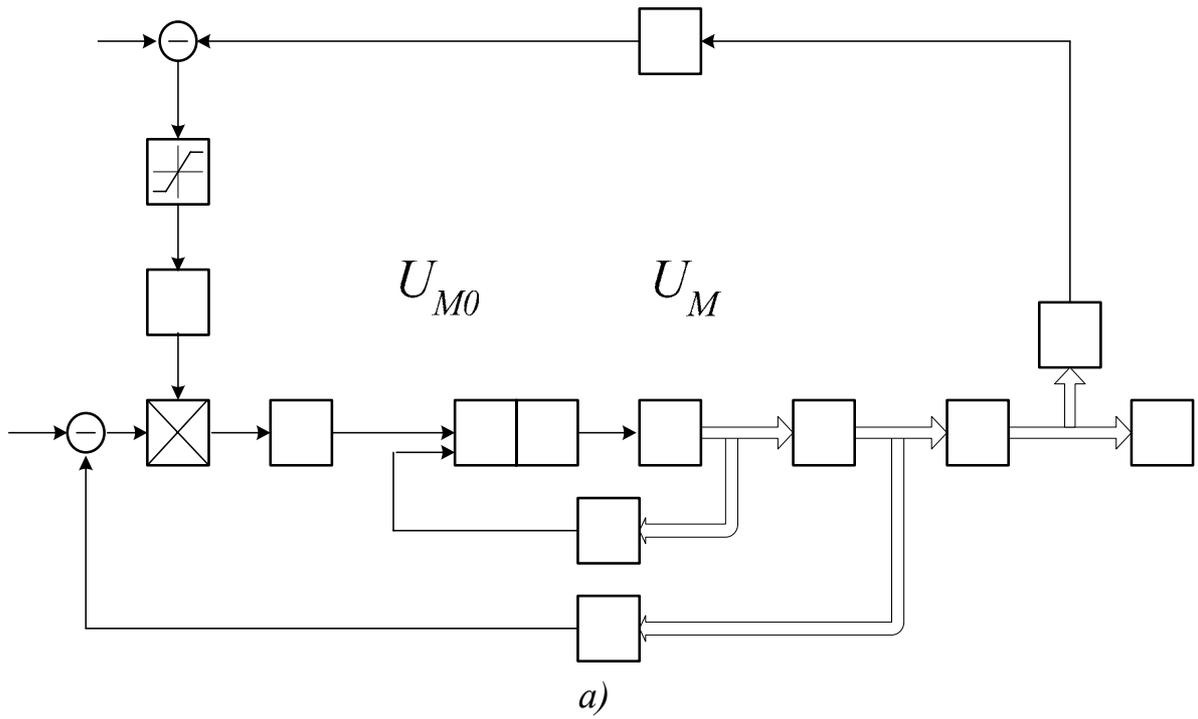


Рис. 1.7. Структурная схема адаптивного двухканального ЭП робота с регулированием податливости (а) и демпфирования (б)

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

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

$$\bar{\varepsilon}_F = \begin{cases} (\bar{\varepsilon}_{F0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F0} \times \bar{F}_K) : \bar{F}_K = \bar{F}_K(\bar{S}) \vee \wedge \bar{F}_K(\dot{\bar{S}}) \vee (A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}); \\ \bar{\varepsilon}_{F0} \forall \bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}; \\ \bar{\varepsilon}_{F0} : \bar{F} = 0, \bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1}. \end{cases}$$

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

$$\bar{\varepsilon}_F = \begin{cases} (\bar{\varepsilon}_{F0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F0} \times \bar{F}_K) : \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0)); \\ \bar{\varepsilon}_{F0} \equiv \bar{\varepsilon}_S = (\bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} - f(q) - \bar{S}_0). \end{cases}$$

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

$$\bar{\varepsilon}_F = [(\bar{\varepsilon}_{F0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F0} \times \bar{F}_K) : \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, N_0)].$$

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

$$\bar{\varepsilon}_F = [(\bar{\varepsilon}_{F0} + \bar{F}_K) \vee \wedge (\bar{\varepsilon}_{F0} \times \bar{F}_K)] : \bar{F}_K = (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0)) + (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}) \vee \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}, N_0)).$$

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 осуществляться 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  $(\bar{S} \wedge \vee \dot{\bar{S}})$  или (и)  $\bar{F}$ , то вектор управления  $\bar{U}$  принадлежит к множеству алгоритмов в виде следующей логической вектор-функции:

$$\bar{U} \in \begin{cases} \bar{U}(1.23) \forall (\bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ1}} = \bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_{\text{ЭКВ2}} = \bar{\varepsilon}_2) : \bar{S}_K, \dot{\bar{S}}_K, \bar{I}_K \in \bar{\varepsilon}_{F0} W_{PFi} \vee \wedge \Phi_i(\bar{\varepsilon}_{F0}), \\ \text{где } i = 1 \forall \bar{S}_K, i = 2 \forall \dot{\bar{S}}_K, \end{cases}$$

$$i = 3 \forall \bar{I}_K \wedge \bar{F} : \bar{F} \neq f(A_0, N_0) \vee \wedge (\bar{F} = A_0 \bar{S}^{-1} \vee \wedge N_0 \dot{\bar{S}}^{-1});$$

$$\bar{U}(1.24) \forall [(\bar{\varepsilon}_{F0} J^T(q) W_{PF} + \bar{S}_0) = 0, \bar{F}_0 \vee \bar{\varepsilon}_{F0} = \bar{\varepsilon}_{F0},$$

$$\bar{F}_{\text{кээв}} = ((\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}})) \vee (\bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_S, A_0) \vee \wedge \bar{F}_K(\bar{\varepsilon}_{\dot{S}}, N_0))) : \left. \begin{array}{l} \bar{S} \neq f(A_0) \vee \bar{S} = A_0 \bar{F}^{-1}, \dot{\bar{S}} \neq f(N_0) \vee \dot{\bar{S}} = N_0 \bar{F}^{-1}; \end{array} \right\}$$

В классе согласованного ПСУ с позиционным и силовым доминированием возможна реализация также двухзонного управления. В первой зоне осуществляется силовое управление 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, который осуществляется, например, на основе информации о состоянии взаимодействия РО с ОР.

Алгоритм формирования управляющих сигналов может быть представлен следующим образом.

1. Если  $\bar{g} = \bar{F}_0$ ,  $g = F$ , то

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

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

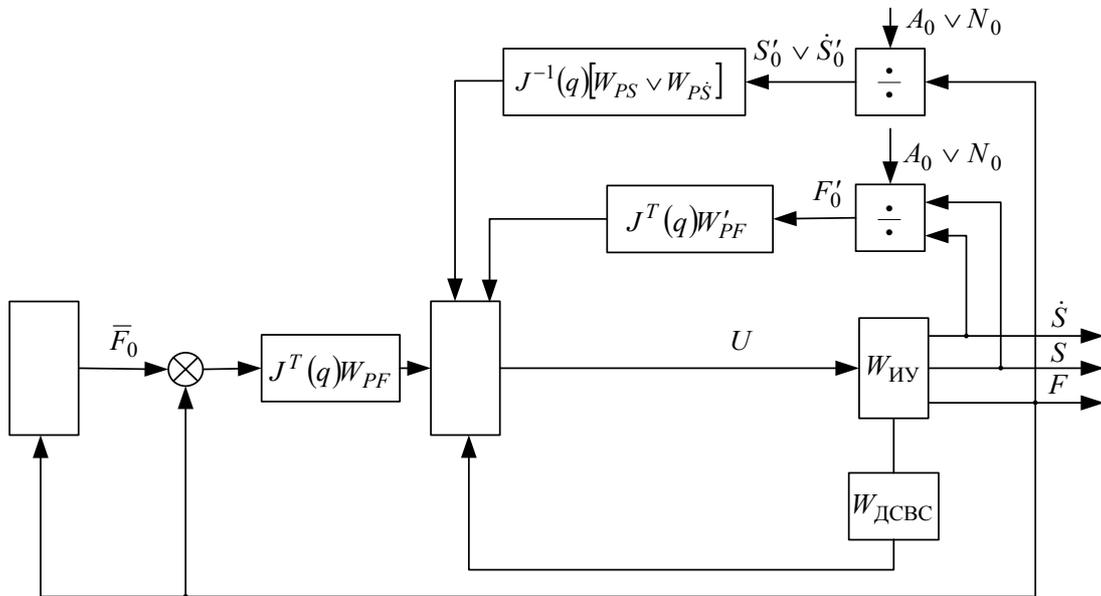
$$\bar{U} = \left\{ \begin{array}{l} [\bar{\varepsilon}_{S0} J^{-1}(q) W_{PS} \vee \bar{\varepsilon}_{\dot{S}0} J^{-1}(q) W_{P\dot{S}}] \forall |\bar{U}_{\text{ДСВС}}| < |\bar{U}_{\text{доз}}|; \\ \{[\bar{S}'_0 J^{-1}(q) W'_{PS} : \bar{S}'_0 = A_0 \bar{F}^{-1}] \vee [\dot{\bar{S}}'_0 J^{-1}(q) W'_{P\dot{S}}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

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».

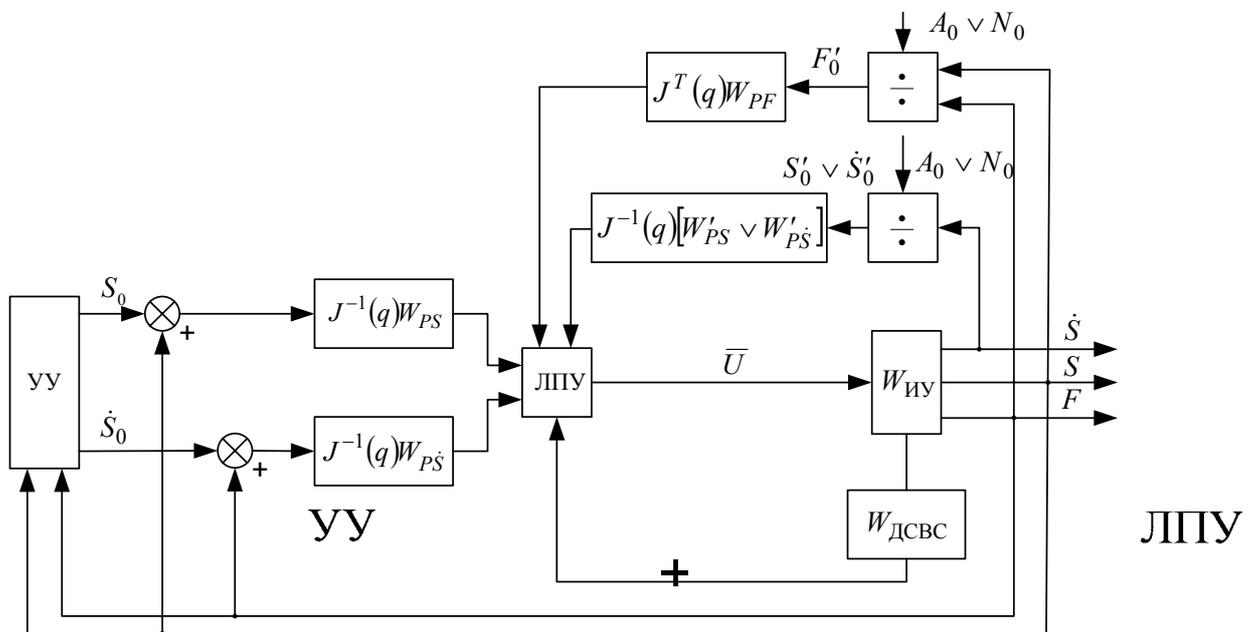
Структурные схемы систем двухзонного согласованного ПСУ исполнительными приводами робота представлены на рис. 1.8. Первая система (рис. 1.8, а) обеспечивает решение задачи стабилизации силы с организацией обратных связей по перемещению, скорости перемещения или силе в функции  $A_0$  или  $N_0$ . Во второй системе (рис. 1.8, 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 применяется при существенном различии позиционного и силового компонен-

тов 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. Одной из основных проблем при этом является определение ведущей координаты как в случае автоматического, так и дистанционного управлений роботом.



а)



б)

Рис. 1.8. Структурные схемы систем двухзонного согласованного ПСУ исполнительными ЭП роботов

ПСУ применяется 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 применяется 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.

При переменных массо-инерционных и силовых параметрах на основе методов планирования эксперимента показана [27] целесообразность параметрической самонастройки в переходных процессах коэффициента усиления регулятора скорости в функции суммарного приведенного момента инерции  $J_{\Sigma} = J_1 + \chi J_n$ , где  $J_1$ ,  $J_n$  – моменты инерции двигателя и нагрузки;  $\chi$  – динамическое передаточное отношение самотормозящейся механической передачи (СМП) и технологического параметра в виде моментов сопротивления типа вязкого трения. Изменение параметров определяется как переменностью собственно параметров, так и приведением их к валу двигателя через существенно нелинейное динамическое передаточное отношение  $\chi$ . В качестве функций цели выбирались время протекания переходных процессов и величина максимального перерегулирования. Граничные значения параметров определялись методом корневых годографов из условия обеспечения устойчивости.

### **Обобщенная структура системы ПСУ**

Обобщенная структурная схема системы ПСУ технологических роботов и манипуляторов представлена на рис. 1.9.

Управляющие сигналы  $F_0$ ,  $S_0$ ,  $\dot{S}_0$  формируются программатором или дистанционно-управляемым ЗУ. Блок самонастройки организует внутри- и межканальные связи. ЛПУ<sub>1</sub>, управляемое сигналом с порогового элемента

(ПЭ) в цепи ДСВС, обеспечивает независимое или согласованное управление. ЛПУ<sub>2</sub> ... ЛПУ<sub>5</sub> позволяют организовать различные комбинации технологических связей. При программной реализации  $W_{ps}$ ,  $W_{PF}$ , 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 вводятся 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 систем, рассматриваемых в работах Л.М. Бойчука и И.В. Мирошника, 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 уровне.

Неопределенность, нечеткость или неполнозаданность характеристик робота и позиционно-силового взаимодействия РО с ОР как объектов управления приводят к необходимости использования современных методов управления, позволяющих, в частности, 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.



### 1.3. УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РОБОТОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИИ АБРАЗИВНОЙ ЗАЧИСТКИ И ШЛИФОВАНИЯ

При выполнении операций механообработки и, в частности, операции абразивной зачистки деталей может быть принята следующая последовательность выполнения переходов: 1) быстрый подвод инструмента и детали; 2) медленный подвод до момента касания с поверхностью обработки; 3) врезание; 4) контурное шлифование по заданной траектории; 5) выхаживание; 6) быстрый отвод [51]. Управление приводами ПР на отдельных этапах строится на основе позиционного, скоростного, силового, комбинированного позиционно-силового алгоритма. Переход от одного алгоритма к другому осуществляется на основе анализа информации от датчика положения и силы.

Быстрый подвод осуществляется в режиме управления по вектору скорости. Переход с управления по скорости на управление по положению осуществляется при достижении определенного расстояния между инструментом и обрабатываемой поверхностью. После контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью по сигналу датчика контакта происходит переход к комбинированному позиционно-силовому управлению. Врезание осуществляется с постоянной заданной силой в направлении нормали к поверхности и заканчивается переходом к контурной обработке после выхода кромки шлифовального круга на запрограммированную поверхность. На этапе контурной обработки используется позиционный алгоритм управления с ориентацией инструмента по нормали к обрабатываемой поверхности и регулировании скорости движения по траектории.

Реальная поверхность обработки на траектории движения инструмента имеет в общем случае неравномерный припуск. Известные технологические формулы связывают скорость подачи и силы резания, что позволяет вычислять величину контурной скорости при изменении величины припуска по значениям нормальной  $F_N$  или тангенциальной силы резания  $F_Z$ . Подобным образом скорость подачи может быть определена из условия поддержания постоянной мощности на подачу  $N_n = F_Z V = \text{const}$ , откуда скорость подачи  $V_n = N_n / F_Z$ .

После контурной обработки возможен этап выхаживания обработанной поверхности. На этом этапе обработка поверхности осуществляется с постоянными величинами нормальной силы и скорости движения по контуру. Быстрый отвод осуществляется в режиме управления по скорости с выходом в исходную точку.

Эта последовательность смены алгоритмов управления положена в основу разработанных обобщенного алгоритма управления технологической операцией и обобщенной структуры исполнительных приводов.

Структура алгоритма управления (рис. 1.10) переключается с управления по положению на управление по силе или управление податливостью только в том случае, если имеется контакт с поверхностью ( $U_{\text{ДК}} \neq 0$ ) и рабочая точка (точка контакта шлифовального круга и обрабатываемой поверхности) является внешней к программной поверхности. В тех случаях, когда рабочая точка является внутренней к программному контуру или отсутствует контакт с поверхностью, что соответствует выходу рабочей точки на границу поверхности или на паз, окно, не подлежащие обработке, алгоритм управления переключается на управление по положению. При достижении силы резания в направлении нормали ( $F_N$ ) заданного значения ( $F_0$ ) или выход рабочей точки на границу программной поверхности алгоритм переключается на контурную обработку. Этот этап может выполняться без управления скоростью подачи  $V_n$ , при этом возможно использование принципов самонастройки контурного коэффициента усиления с целью управления (поддержания постоянным) демпфированием.

Настройка контурного коэффициента осуществляется в функции изменения коэффициента передачи исполнительного механизма и постоянной времени, связанной с изменением момента инерции нагрузки  $J_{\Sigma} (k_c h)^{-1}$ .

Возможно также управление скоростью подачи в функции тангенциальной составляющей силы резания  $F_z$  или с поддержанием постоянной мощности на подачу. Скорость перемещения от одной опорной точки к другой определяется зависимостью  $V_n = N_n / F_z$ , где  $N_n$  – мощность, затрачиваемая на подачу.

В двухдвигательных ЭП стабилизация мощности резания достигается за счет регулирования скорости ЭП главного движения или (и) скорости ЭП подачи. В однодвигательных приводах эта задача решается, в частности, формированием как двухканальных, так и одноканальных управляющих сигналов.

Двухдвигательные ЭП со стабилизацией мощности строятся [37] по схеме двухканального управления (рис. 1.11, а). Сигнал  $U_{S0}$  задает требуемую скорость перемещения РО робота, и  $U_{N0}$  с зоной нечувствительности определяют уровень стабилизируемой мощности.

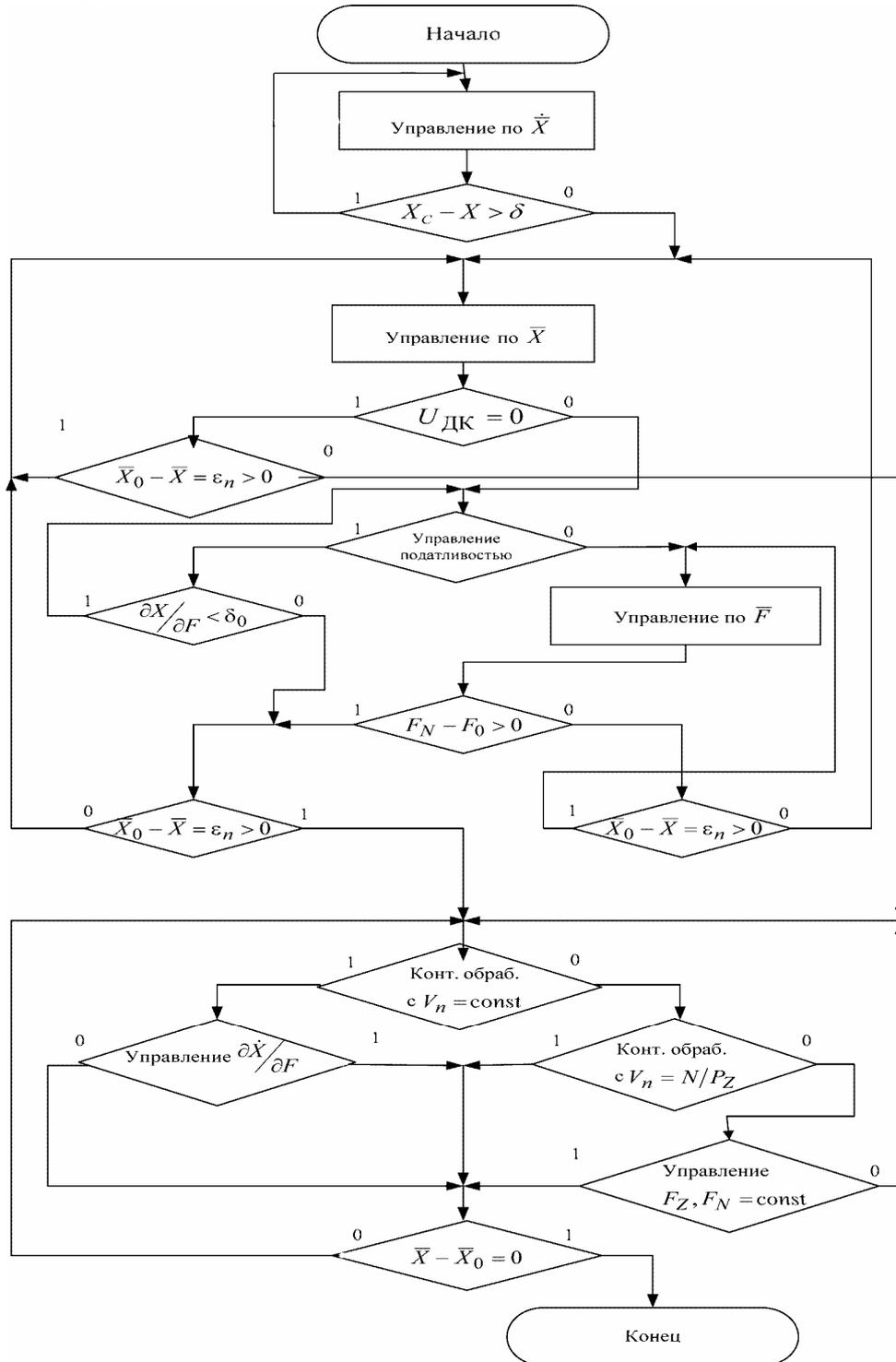
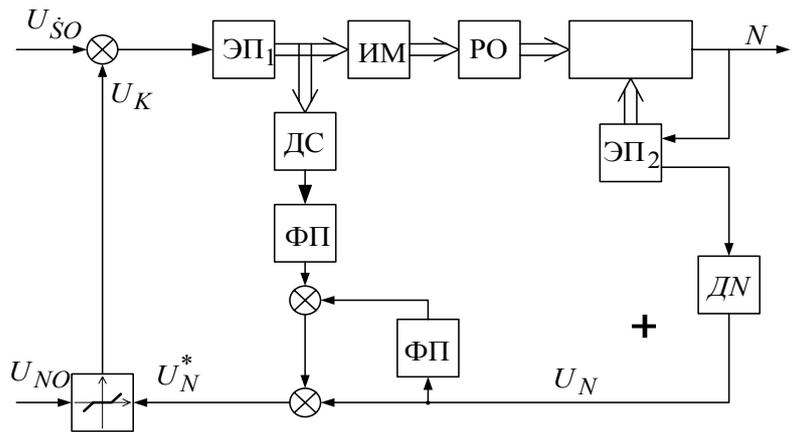
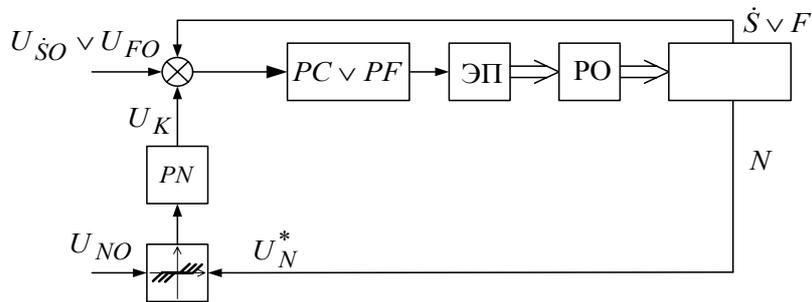


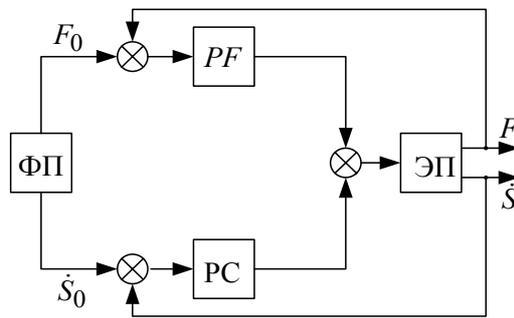
Рис. 1.10. Обобщенный алгоритм управления операцией шлифования



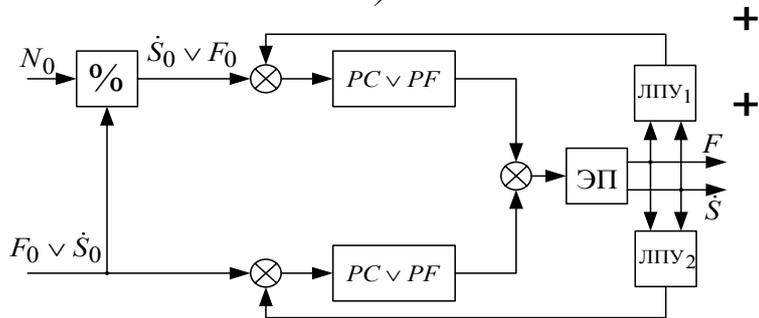
a)



б)



в)



г)

Рис. 1.11. Функциональные схемы ЭП со стабилизацией мощности

Сигнал корректирующей связи  $U_K$  действует посредством уменьшения  $U_{S_0}$  при  $U_N > U_{N_0}$ . Датчик скорости с функциональным преобразователем применяется для организации упреждающей коррекции.

Двухканальные однодвигательные ЭП со стабилизацией  $N_0$  строятся (рис. 1.11, б) по аналогии с приводом, изображенным на рис. 1.11, а в основе которого лежит применение технологических корректирующих связей. Другой путь, как уже отмечалось, заключается в формировании управляющих сигналов в функции  $N_0 = \text{const}$  (рис. 1.11, в, з). Схема ЭП, представленная на рис. 1.11, з, служит основой для построения ЭП двухзонного зависимого или независимого регулирования.

Особое место занимают двухконтурные ЭП со стабилизацией мощностью при отсутствии программных (номинальных) сигналов управления по  $F_0$  или  $S_0$ . В качестве примера на рис. 1.12 приведена структурная схема подобного привода с наблюдателем  $J_H (K_C h)^{-1}$ ;  $W_1 = K_7 (T_3 p + 1)^{-1}$ ;  $W_2 = (J_1 p)^{-1}$ ;  $W_3 = (U p)^{-1}$ ;  $W_4 = (J_H p)^{-1}$ ;  $W_5 = K_D (T_D p + 1)^{-1}$ ;  $W_6 = U (K_4 + K_3 K_5) K_3^{-1}$ ;  $W_7 = U^{-1}$ .

В некоторых случаях, например, когда необходимо исключить врезание шлифовального круга вглубь задаваемого контура при неравномерном припуске или наличии разрывов непрерывного контура поверхности (выемки, пазы), необходимо формировать закон регулирования на основе сигналов как от датчиков контакта, так и датчика состояния системы  $U_1$ :

$$U\varepsilon = \begin{cases} K_1 U \varepsilon_S \forall U_{\text{ДК}} = 0; \\ K_1 U \varepsilon_F \forall U_{\text{ДК}} \neq 0 \wedge |U_1| - |U_{\text{ДОЗ}}| > 0; \\ K_1 U \varepsilon_S \forall U_{\text{ДК}} \neq 0 \wedge |U_1| - |U_{\text{ДОЗ}}| \leq 0. \end{cases}$$

Применение ЭП, функциональная схема которого приведена на рис. 1.13, а, позволяет осуществлять шлифование деталей с неравномерным припуском. Для осуществления силового взаимодействия одну из степеней ПР, схват которого удерживает деталь, связывают с линейным перемещением в направлении к абразивному кругу. Величина этого силового взаимодействия должна соответствовать величине припуска и заданной геометрии.

Положение рабочей точки определяется на основе сравнения требуемого (программного)  $S_0$  и действительного значения  $S$  координат. Предполагается, что движение РО осуществляется в плоскости прямоугольных координат. ЭП второй координаты является обычной следящей системой (осуществляет продольную подачу), инвариантной к внешним возмущающим воздействиям. В этом случае достаточно определить положение РО и детали только по первой координате и сравнить с требуемым. Оценка осуществляется по функции ошибки положения  $\varepsilon = |S_0| - |S|$ .

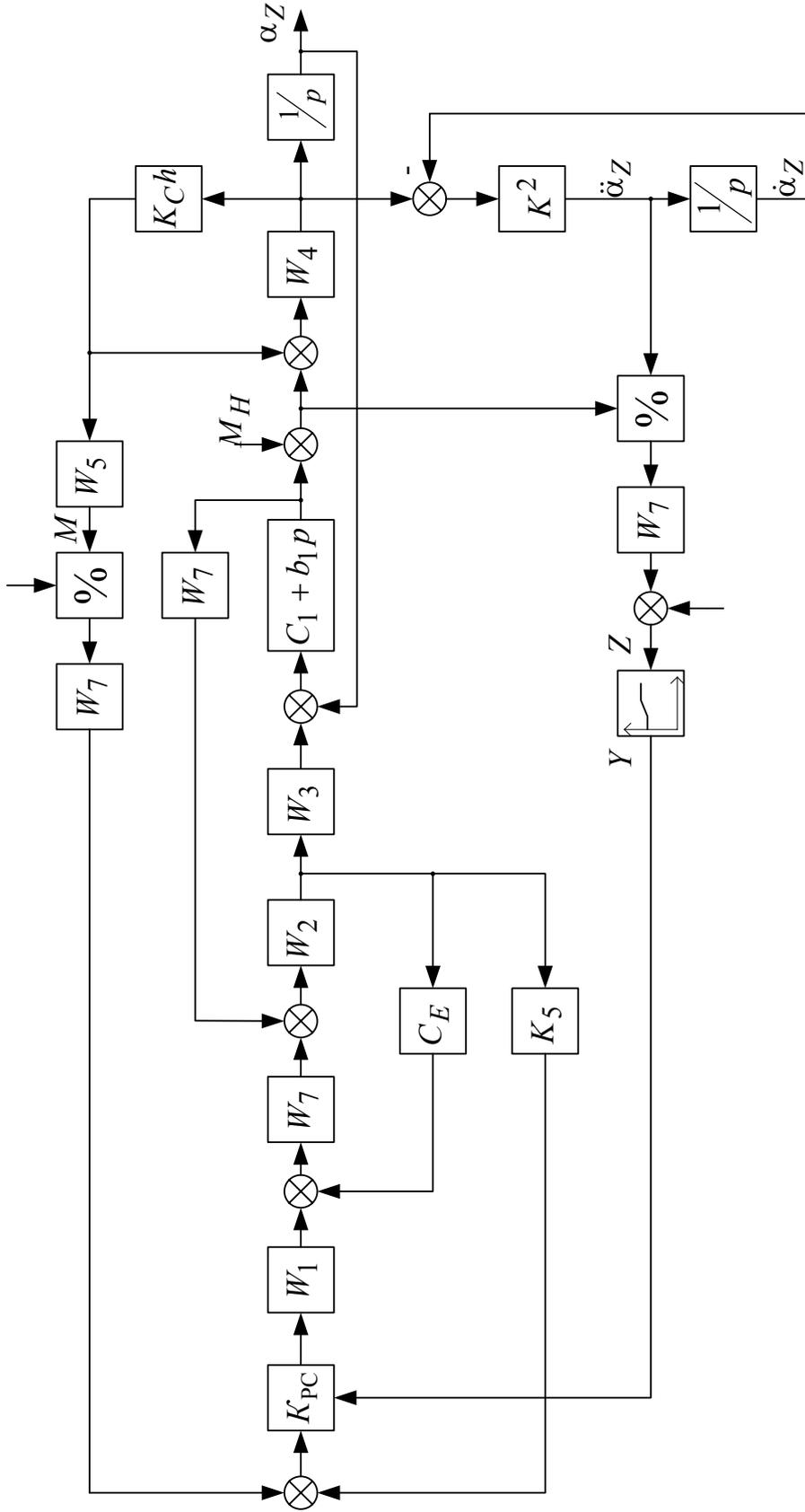


Рис. 1.12. Структурная схема самонастраивающегося ЭП

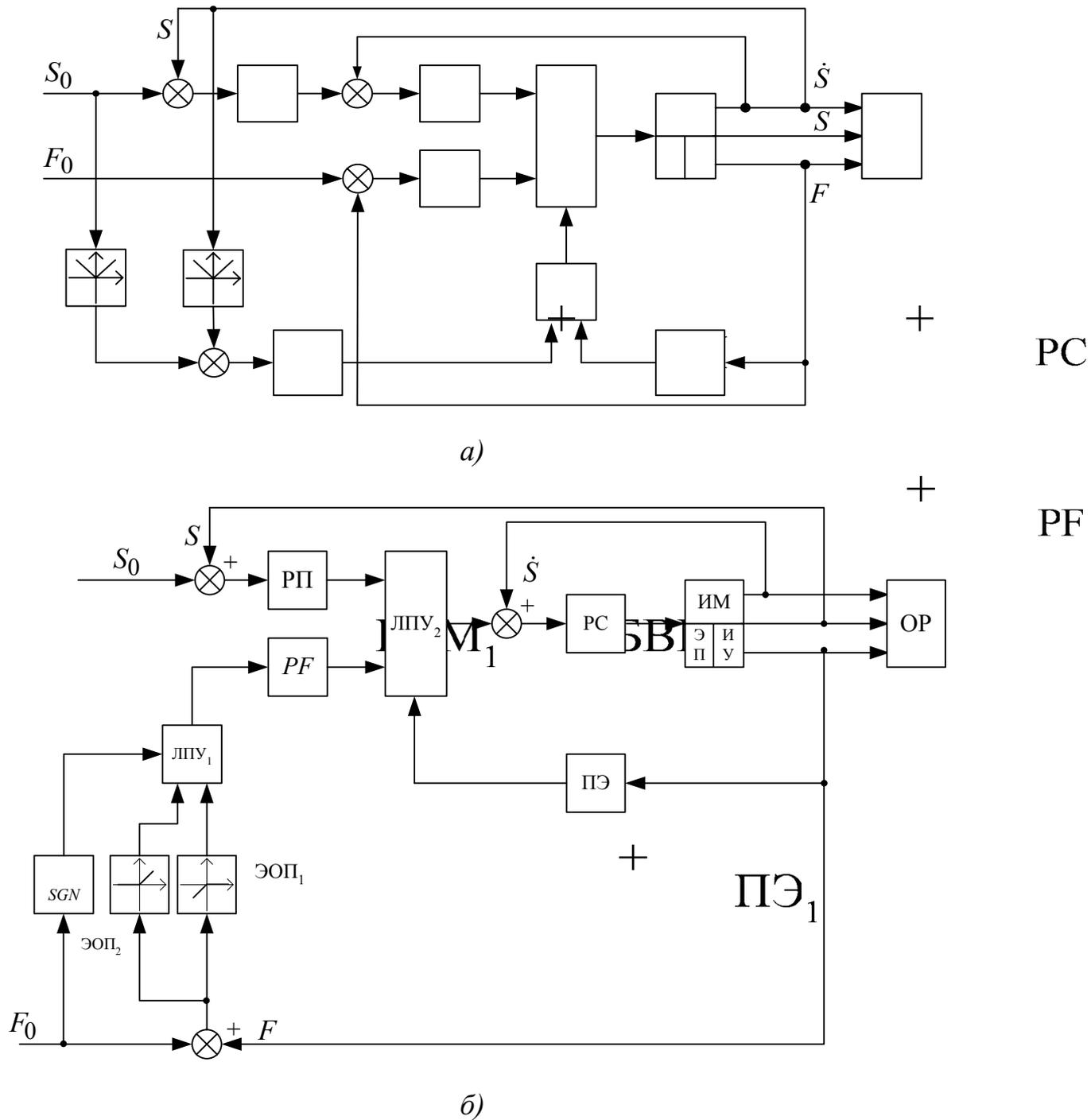


Рис. 1.13. Функциональная схема ЭП для контурной силовой обработки

Если  $\varepsilon > 0$ , то рабочая точка является внешней к требуемому контуру, если  $\varepsilon \leq 0$ , то рабочая точка является внутренней.

Для определения функции  $\varepsilon$  сигнал с датчика положения подается на блок выделения БВМ<sub>1</sub>, который сравнивается с сигналом  $S_0$  с датчика положения, преобра-

зованным в БВМ<sub>2</sub>. Разностный сигнал подается на пороговый элемент ПЭ<sub>1</sub>, выходной сигнал которого определяется выражением

$$U_{\text{ПЭ1}} = \begin{cases} U \forall \varepsilon > 0; \\ 0 \forall \varepsilon \leq 0, \end{cases}$$

где  $U$  – некоторый уровень напряжения, соответствующий уровню входных сигналов логического элемента «И».

Таким образом, позиционное управление переключается сигналом с логического элемента «И» на управление по силе только в том случае, если имеется контакт с поверхностью, и рабочая точка является внешней к программной поверхности, т. е. имеются сигналы на обоих входах логического элемента «И». ЛПУ переключает управление при отсутствии сигнала с логического элемента «И» на управление по положению, если один или оба сигнала на входе логического элемента «И» нулевые, т.е. в тех случаях, когда рабочая точка является внутренней к требуемому контуру или отсутствует контакт с поверхностью, что соответствует выходу рабочей точки на границу поверхности.

Указанные условия исключают обработку вглубь программного контура в случае неравномерного припуска на обработку, а также при наличии пазов, окон, выемок и т.д. на поверхности заготовок.

С целью исключения реверса ЭП при действии нагрузок больше заданных и соответствующего переключения привода на режим управления положением необходимо обеспечивать совпадение сигналов ошибки с сигналом задания по силе. Это достигается применением в канале ошибки по силе встречно-параллельно включенных элементов с односторонней проводимостью ЭОП<sub>1</sub> и ЭОП<sub>2</sub>. (рис 1.13, б)

Компаратор, реагирующий на изменение знака  $F_0$ , переключает ЛПУ<sub>1</sub> на тот из входов, к которому подключен ЭОП, соответствующей знаку  $F_0$ . Например, если  $F_0 > 0$ , то подключается ЭОП<sub>1</sub> и наоборот.

При подходе к детали, например, в случае шлифования на проход в момент касания кругом детали и переключения на управление по силе, может оказаться, что припуск больше заданной, что привело бы при отсутствии элементов с односторонней проводимостью к реверсированию силовой ЭП, отскоку круга от детали и переключению на контур управления по положению, т. е. возникает режим, сопровождающийся частыми переключе-

чениями ЛПУ. Устойчивого процесса резания не происходит, что снижает надежность и производительность работы устройства. Возвратно-поступательные движения могут возникать в процессе обработки и в случае переменного припуска на обработку.

В шлифовальных станках широкое распространение получили системы автоматической стабилизации мощности, затрачиваемой на шлифование. Данные системы предусматривают разные уровни мощности  $N_{\text{шл1}}$  и  $N_{\text{шл2}}$  на участках черного и чистого шлифования. Измерение мощности производится косвенным путем по активной мощности, потребляемой из сети приводным электродвигателем шлифовального круга с помощью датчика мощности (ДМ).

На выходе системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» СПИД производится также контроль текущего значения припуска, который сравнивается с заданными значениями припусков на окончание черного и чистового шлифования в измерительном узле. Сигнал индуктивного датчика припуска подается через релейный элемент на вход задающего устройства. После снятия черного припуска выдается команда на снижение сигнала  $U_{\text{зад}}$ , соответствующего мощности шлифования при чистом шлифовании. Процесс резания характеризуется также мощностью, затрачиваемой на подачу  $N_n$ .

Для алгоритмизации процесса взаимодействия режущего инструмента с деталью и формирования законов управления перемещения роботов может быть использован метод подвижных трехгранников, рассмотренный в работах В.Л. Афонина [9, 10]. Ю.В. Подураевым для решения аналогичной задачи используется концепция «эквивалентного упругого звена».

Другим вариантом управления со стабилизацией мощности является регулирование демпфирования посредством самонастройки регулятора скорости (рис. 1.14).

В случае большой величины припусков применяется многопроходная обработка с переключением на работу от задатчика эквидистанты  $U_{\text{з3}}(t)$  (рис. 1.15).

Это происходит при  $\varepsilon_h < 0$ . Посредством порогового элемента ПЭ<sub>1</sub> и коммутирующего элемента КЭ<sub>1</sub> исполнительный ЭП переводится в режим управления от  $U_{\text{з3}}(t)$ . В момент времени, когда  $\varepsilon_h > \delta$  управление ЭП переходит к заданному перемещению  $U_s(t)$  однопроходной обработки.

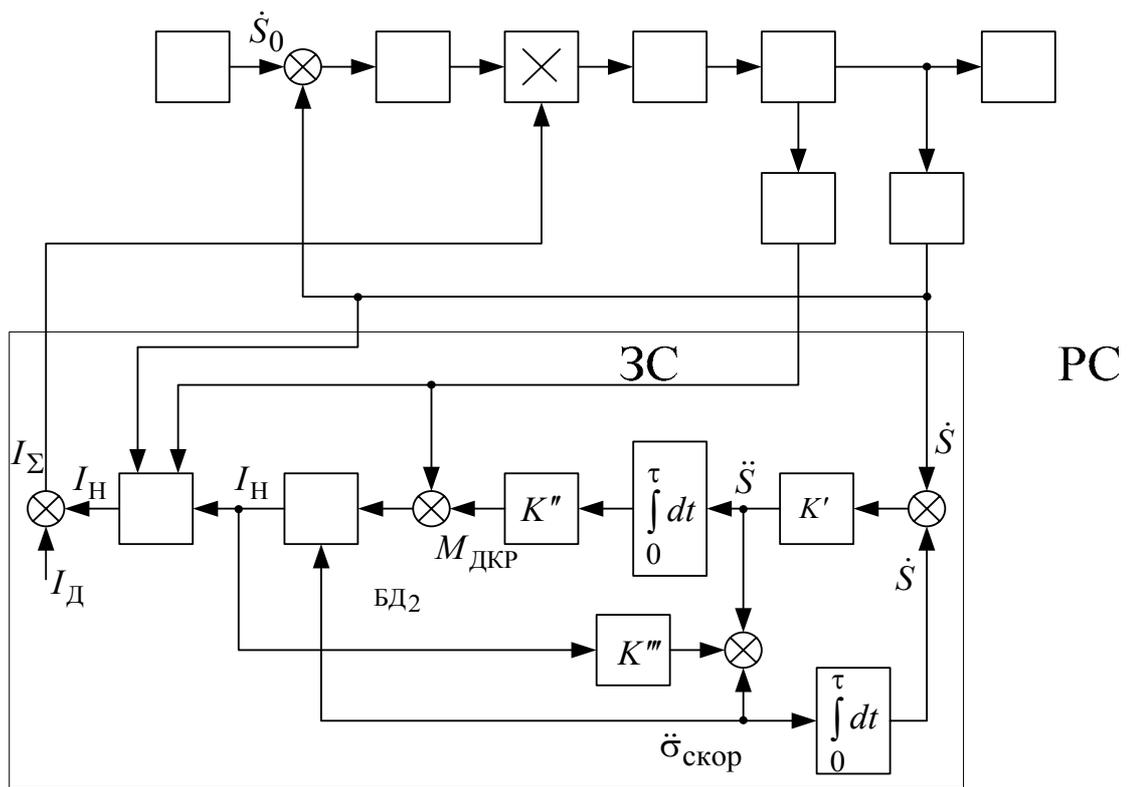


Рис. 1.14. Функциональная схема адаптивного ЭП с самонастройкой регулятора скорости

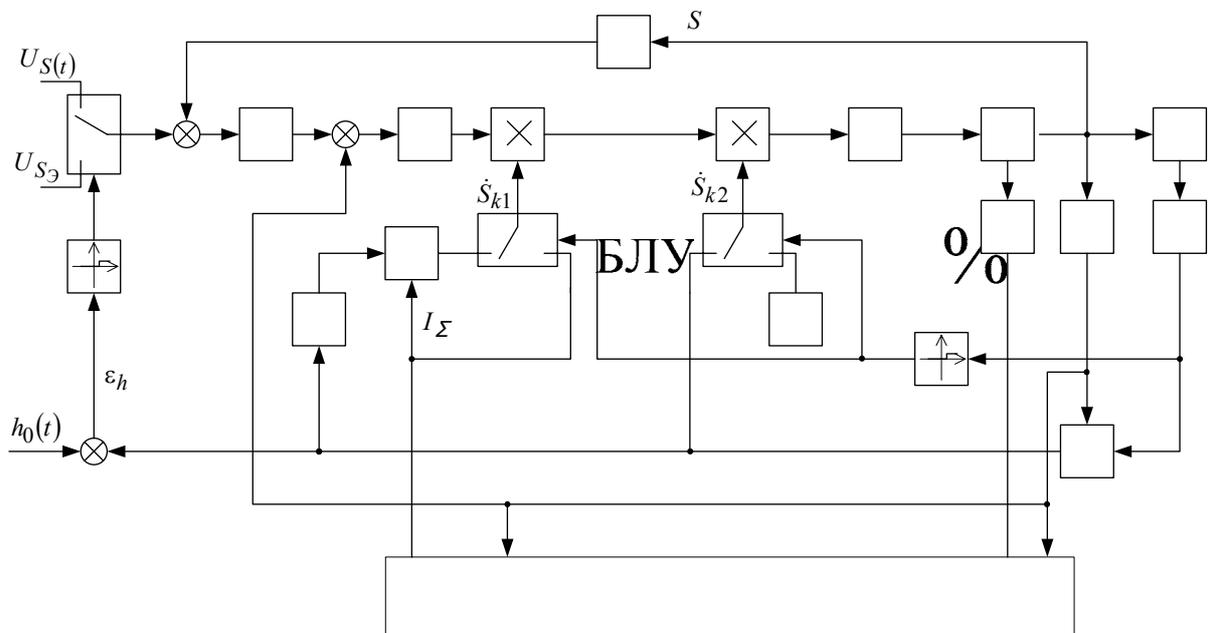


Рис. 1.15. Функциональная схема адаптивного ЭП при многопроходной обработке

Применение КЭ<sub>2</sub>, КЭ<sub>3</sub>, источника единичного сигнала, блока деления БД<sub>2</sub> и ПЭ<sub>2</sub> (см. рис. 1.15) обеспечивают возможность работы самонастраивающейся системы при нарушении контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и упрощают настройку контурного коэффициента усиления.

Если момент на выходном валу постоянный, а коэффициент передачи двигателя уменьшился вследствие увеличения припуска, то происходит увеличение суммарного эквивалентного момента инерции ( $J_{\text{эКВ}} = J_{\Sigma}/K_{ch}$ ) и, следовательно, увеличивается коэффициент усиления системы в целом посредством БД<sub>2</sub>, КЭ<sub>2</sub> и БД<sub>1</sub>. Необходимо заметить, что изменение  $J_{\Sigma}$  происходит практически только вследствие изменения динамического и передаточного отношения СМП. Учет  $\chi$  СМП повышает точность работы устройства идентификации и ЭП в целом.

Если контакт круга с деталью отсутствует, то сигнал на выходе датчика силы ДФ равен нулю и следовательно ПЭ<sub>2</sub> переключает КЭ<sub>2</sub> и КЭ<sub>3</sub> таким образом, что, на вход блока произведений БП<sub>1</sub> поступает корректирующий сигнал  $S_{k1} = J_{\Sigma}$ , т.е. осуществляется настройка в функции переменного момента инерции  $J_n$ , а на вход блока произведений БП<sub>2</sub> поступает единичный сигнал.

При контакте круга с деталью на вход БП<sub>2</sub> поступает корректирующий сигнал  $S_{kz} = h$ . Если  $h$  увеличивается, то в первый момент времени скорость ЭП не изменяется, увеличивается сигнал на выходе БД<sub>1</sub> и как следствие увеличивается  $S_{k2}$  на входе БП<sub>2</sub> т.е. происходит увеличение коэффициента усиления ЭП.

При необходимости обеспечения независимой самонастройки регулятора скорости в функции статического момента  $M_n$ , момента «вязкого трения» и динамического момента применяется алгоритм самонастройки и логическое переключающее устройство (рис. 1.16).

Если при управлении роботом необходимо обеспечить режим врезания со стабилизацией силы резания и режим контурной обработки со стабилизацией мощности, то целесообразно применять ЭП, блок-схема которой представлена на рис. 1.17.

*Режим врезания.* После вывода детали (или шлифовального круга) на исходную позицию (быстрый подвод) начинается медленный подвод по нормали к предполагаемой поверхности детали (программа врезания) до появления контакта поверхностей детали и круга, который определяется по сигналу с датчика силы.

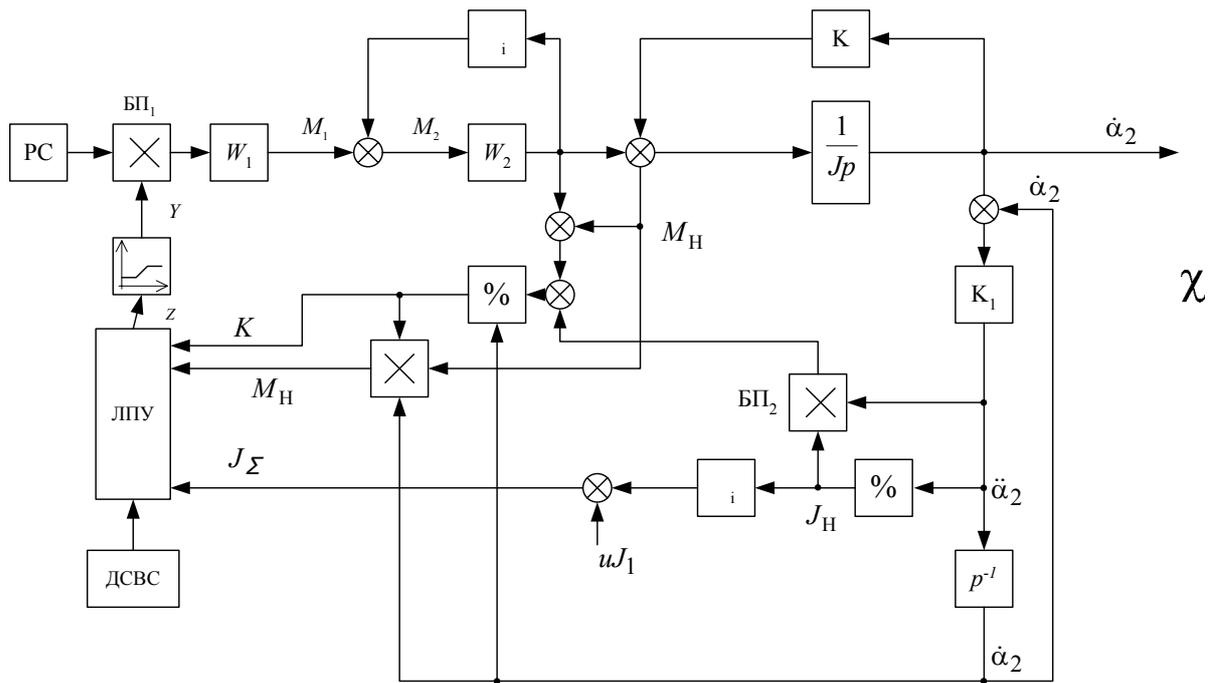


Рис. 1.16. Структурная схема устройства самонастройки ЭП

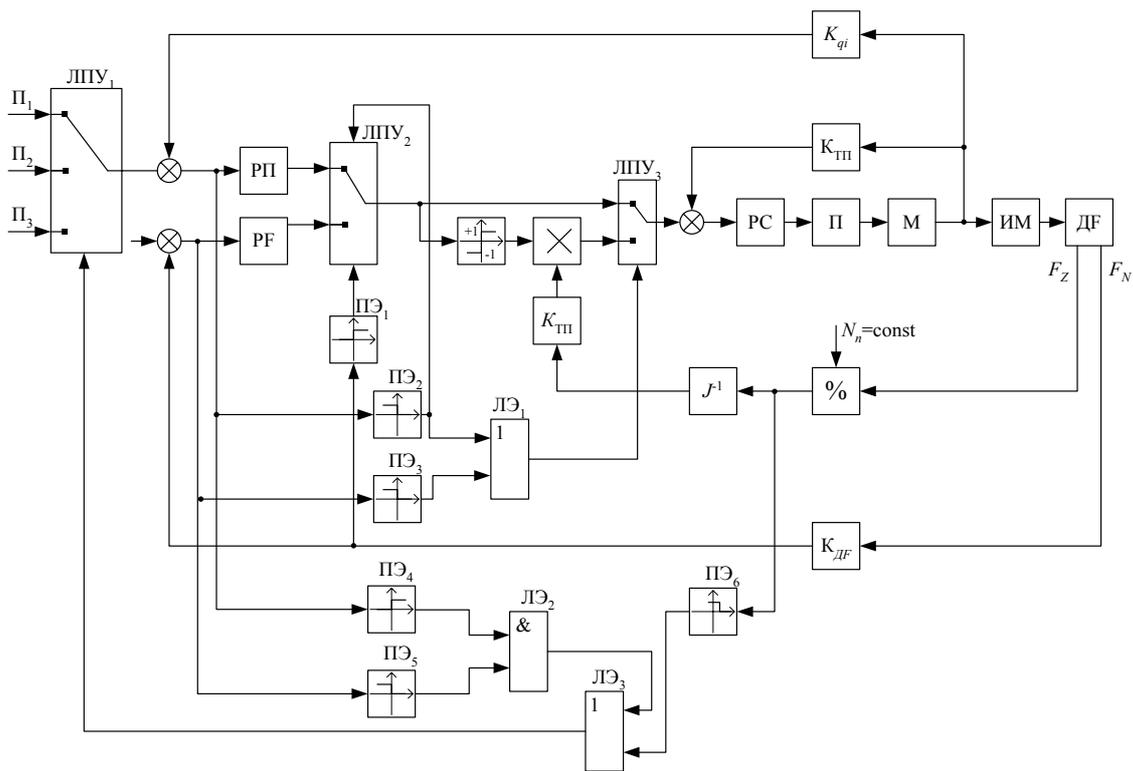


Рис. 1.17. Обобщенная функциональная схема ЭП работа при абразивной зачистке деталей

Пороговый элемент ПЭ<sub>1</sub> переключает ЛПУ<sub>2</sub> и структуру ЭП с управления по положению на управление по силе. Для упрощения управления ЭП по силе врезания шлифовального круга в деталь осуществляется движение по нормали к поверхности, которое обеспечивается предварительной ориентацией соответствующих степеней подвижности ИУ. Этот этап заканчивается достижением  $F_n = F_0$  и переходом к контурной обработке, если ошибка по положению  $\varepsilon_s > 0$ . В противном случае начинается обработка вглубь заданного контура, и пороговый элемент ПЭ<sub>2</sub> осуществляет обратное переключение с помощью ЛПУ<sub>2</sub> структуры ЭП с силового управления на управление по положению. Переключение на программу контурной обработки осуществляется ЛПУ<sub>1</sub> по сигналу логического элемента ЛЭ<sub>2</sub>.

*Контурная обработка.* Этот этап осуществляется по программе обработки контура, заданного опорными точками. ЭП управляются по положению, а скорость перемещения от одной опорной точки до другой определяется величиной нагрузки от тангенциальной силы резания. ЛПУ<sub>3</sub> подключает к входу регулятора скорости РС контур вычисления требуемой скорости подачи  $V_n$ , которая определяется из условия поддержания постоянной мощности подачи  $N = \text{const}$  по формуле  $V_n = N/F_z$ . Значение скоростей перемещения исполнительного механизма (ИМ) отдельных степеней подвижности ИУ определяется через матрицу преобразования  $J^{-1}$ , а направление (положительное или отрицательное) – по знаку ошибки по положению. В процессе обработки заданного контура может оказаться, что  $V_n < V$ , определяемого по условиям производительности процесса шлифования или качества обрабатываемой поверхности. В этом случае однократная обработка невозможна, и требуется несколько проходов, чтобы получить заданную поверхность при имеющемся припуске. Переключение на программу многопроходной обработки осуществляется ЛПУ<sub>1</sub> по сигналу с ЛЭ<sub>2</sub>.

Обработка поверхности заканчивается после обработки последнего кадра программы для заданного контура, и осуществляется быстрый отвод инструмента или детали в начальную точку.

Для увеличения жесткости ИУ при шлифовании ЭП степеней подвижностей, участвующих в формировании траекторий перемещения рабочего органа робота, выполняются необратимыми за счет применения самотормозящихся передач или специальных регулируемых опор, связывающих станину, на которой установлен шлифовальный круг и ИУ робота.

## 1.4. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛАЗЕР-РОБОТОВ

При лазерной обработке объектов сложной пространственной конфигурации с нелинейной поверхностью типа металлоконструкций, корпусов судов и бронетехники целесообразно применение многофункциональных лазерных технологических комплексов (ЛТК) с системой транспортировки излучения (СТИ) в виде манипулятора оптики (МО) на основе волоконной оптики или системы отклоняющих зеркал, перемещающихся по линейной, вращательной и сложной траекториям [32]. ЛТК с МО последнего типа получили название «лазер-роботов» [1].

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

### **Структура многофункциональных лазер-роботов**

Мнофункциональный лазер-робот (МЛР) состоит (рис. 1.18) из источника лазерного излучения (ИИ), манипуляционной исполнительной системы (МИС) в виде совокупности МО и ТМ, системы управления (СУ) информационной системы и вспомогательного технологического оборудования.

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 применяются 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.

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.

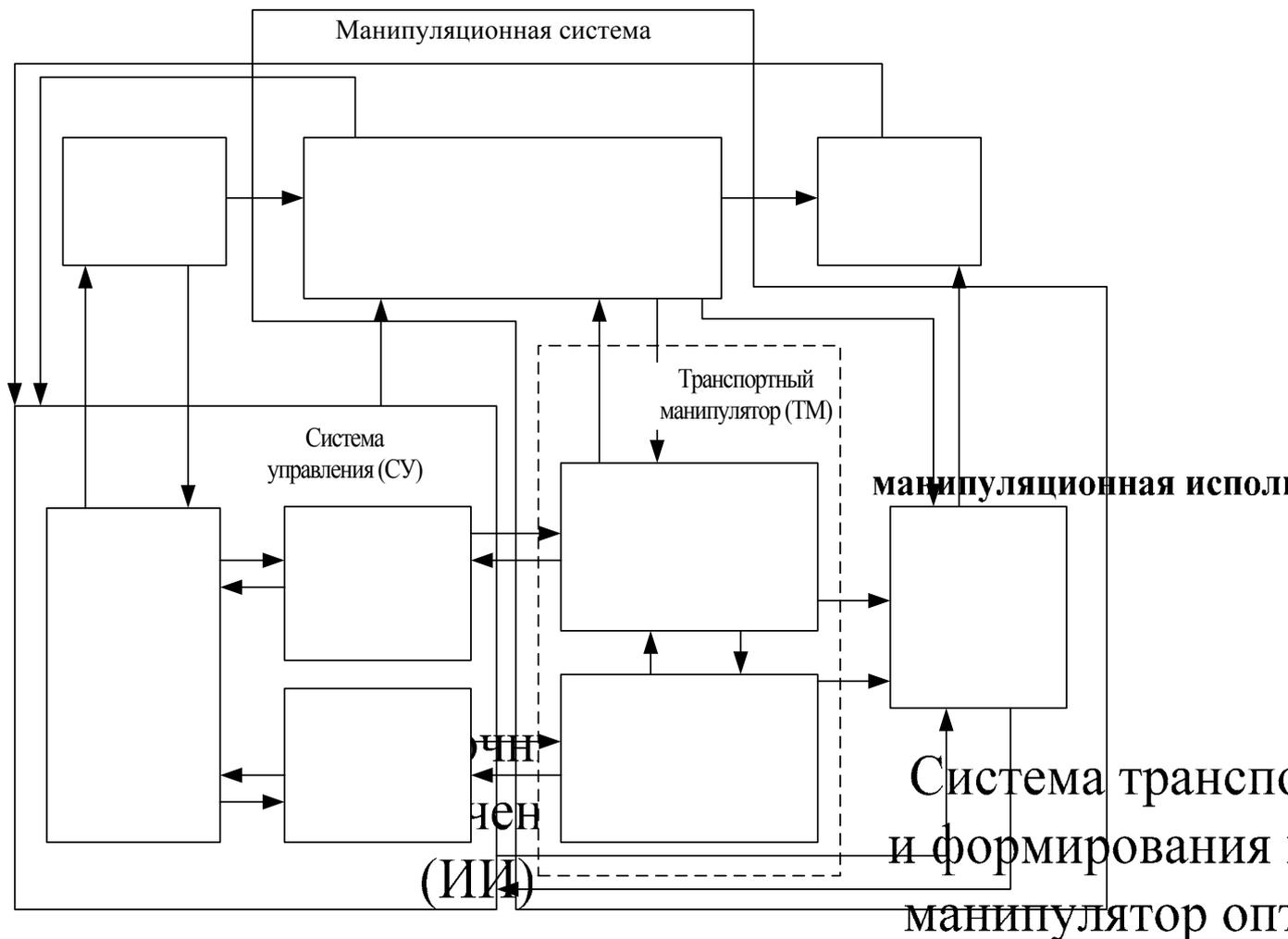


Рис. 1.18. Обобщенная структура многофункционального лазер-робота

### Построение манипуляционных исполнительных систем

Вид манипуляционной исполнительной системы (МИС) зависит от целого ряда факторов и, в первую очередь, от вида технологического процесса и условий его выполнения.

В общем случае в качестве ТМ лазер-робота используются серийные промышленные роботы, позиционеры, координатные столы. Системы управления МО. Взаимное расположение ТМ и МО может быть параллельным (СМ) или раздельным (СМ).

или совмещенным, последовательным раздельным и комбинированным. На рис. 1.19 представлены: 1 – луч лазера; 2 – основной ТМ; 2<sup>1</sup> – технологический манипулятор; 3 – МО; 4 – ОГ; 5 – ОО; 6 – дополнительный манипулятор.

Если манипулятор оптики и изделия раздельные (рис. 1.19, а), то они оснащаются приводами и создают управляемое силовое воздействие на ОГ и ОО. В этом случае данные манипуляторы являются активными манипуляторами.

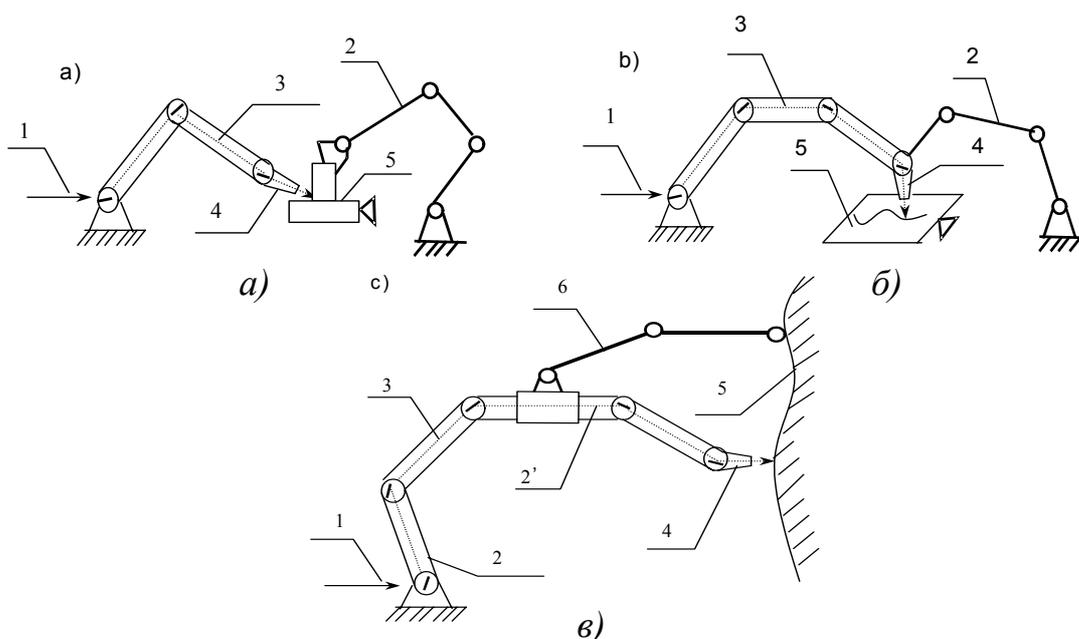


Рис. 1.19. Манипуляционные исполнительные системы многофункциональных лазер-роботов

Во втором случае (рис. 1.19, б) МО может быть как активным, так и пассивным. Пассивный МО не содержит исполнительных приводов и ОГ приводится в движение с помощью ТМ, в качестве которого наиболее целесообразно применять серийные робототехнические и мехатронные устройства. Управление положением точки фокуса осуществляется с помощью микропривода перемещения фокусирующей линзы.

С точки зрения уменьшения грузоподъемности ТМ и повышения точности перемещения ОГ, целесообразно применить разгрузку маломощными моментными приводами со следующими алгоритмами формирования управляющих сил и моментов. При использовании информации о положении звеньев манипуляторов и оптического центра фокусирующей линзы осуществляется опрос датчиков положения ТМ и определение положения рабочей точки ТМ (МО), решение прямой и обратной задач кинематики.

матики для ТМ, прямой задачи динамики для МО и формирование сил и моментов в автономных системах разгрузки. При использовании информации о силомоментном взаимодействии между манипуляторами производится опрос датчика силомоментного взаимодействия, вычисление транспонированных якобианов для ТМ и МО и формирование сил и моментов в автономных системах разгрузки. Последний алгоритм в виду меньшего количества вычислительных операций и большего быстродействия является более предпочтительным.

Особый интерес представляют МИС лазер-роботов, предназначенных для обработки крупногабаритных пространственных объектов. В этом случае ТМ условно представляется в виде последовательного соединения двух манипуляторов: основного ТМ (рис. 1.19, в), доставляющего к объекту работ технологический манипулятор (см. рис. 1.19, в), который, перемещаясь относительно основного ТМ, выполняет необходимые вспомогательные и основные технологические операции. Кроме данных манипуляторов может применяться дополнительный манипулятор (см. рис. 1.19, в), который содержит инструмент для подготовки поверхности для обработки, датчик системы идентификации поверхности и устройство его фиксации на поверхности ОО.

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

Основными факторами, определяющими структуру ИКЦ МО, следует считать потери мощности излучения на отклоняющих зеркалах и девиацию луча вследствие этих отклонений. Это приводит к необходимости минимизации числа отклонений луча от прямолинейности во всем диапазоне изменения заданной ориентации ОГ. Схема прохождения луча для общего случая, когда направление луча, выходящего из ИИ и луча, ориентированного к поверхности ОО, выбраны произвольно, показаны на рис. 1.20, где обозначено: 1 – лазерный луч; 2 – отклоняющие зеркала; 3 – фокусирующая линза; 4 – поверхность обработки.

Обозначим вектором  $L_I$  направление луча, выходящего из ИИ к МО, и вектором  $L_{II}$  – направление луча, ориентированного к поверхности обработки в точке  $A \in Q(t)$ , где  $Q(t)$  – траектория движения точки фокуса.

В случае произвольного пространственного расположения векторов  $L_I$  и  $L_{II}$  для некоторой точки  $O \in L_I$  можно записать замкнутое векторное уравнение  $R_{OA} = L_I + \sum_{i=1}^n L_i + L_{II}$ , где  $R_{OA}$  – радиус-вектор точки А,  $L_i$  – вектор  $i$ -го прямолинейного участка луча в оптическом тракте.

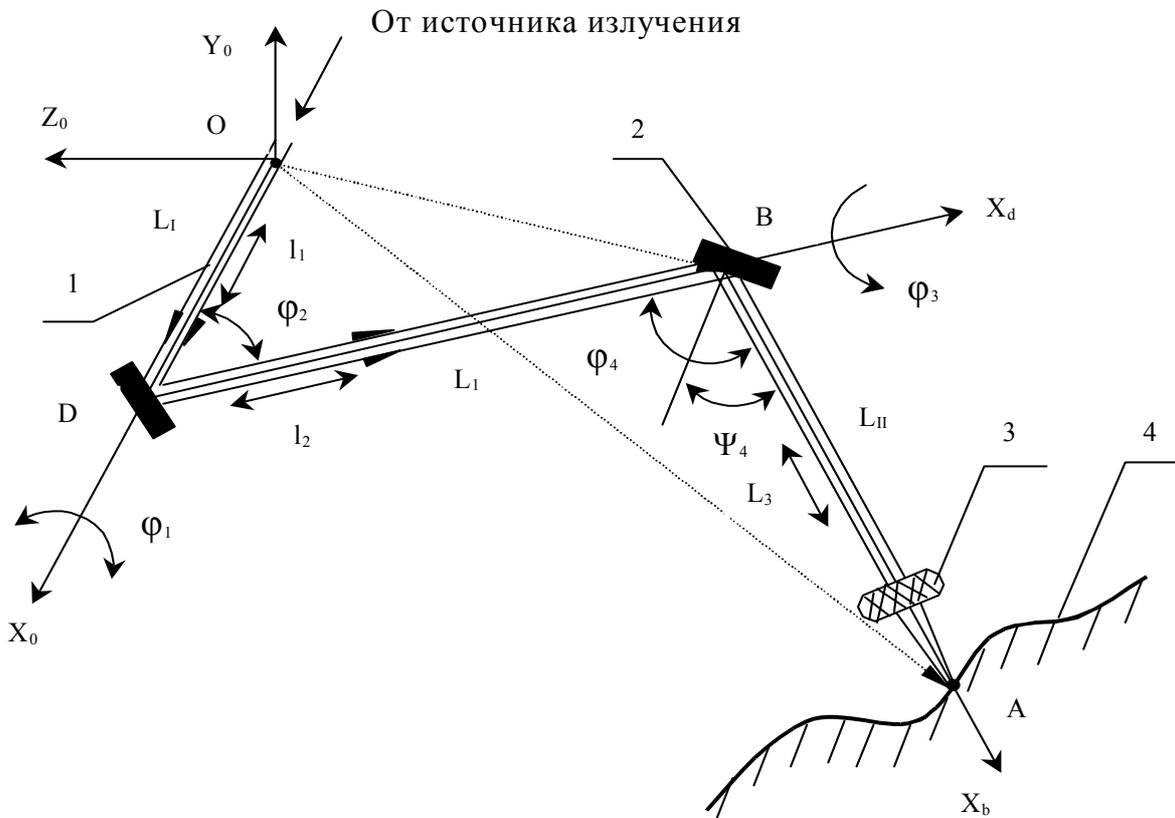


Рис. 1.20. Схема прохождения лазерного луча

Из рассмотрения этого уравнения следует, что число отклонений луча от прямолинейности  $N = n + 1$  при  $L_i \neq 0$ ;  $N = 1$  при  $L_i = 0$ , а  $L_I$  и  $L_{II}$  имеют точку пересечения;  $N = 0$  при  $L_i = 0$ , а  $L_I$  и  $L_{II}$  лежат на одной прямой.

Если на луч не наложены внешние связи, то в общем случае минимальное число его отклонений  $N = 2$  ( $N = 1$  или  $N = 0$  – частные случаи)

и векторное уравнение приобретает вид  $R_{OA} = L_I + L_1 + L_{II}$ , где  $L_1$  – вектор, пересекающий  $L_I$  и  $L_{II}$  в некоторых точках  $D$  и  $B$ , выбранных произвольно.

Расположим в точке  $O$  базовую правую декартовую систему координат  $X_0Y_0Z_0$ , направив ось  $X_0$  по оси луча, а в точках  $D$  и  $B$  системы координат, связанные с лучом и направленные аналогично. Тогда, введя в рассмотрение координаты углового  $\varphi_k$  ( $k=1\dots4$ ) и линейного  $l_j$  ( $j=1\dots3$ ) положения луча, и приняв их за обобщенные, можно, используя однородные преобразования, записать матричное соотношение  $M_{OA}(\varphi_k, l_j) = M_{OB}(\varphi_k, l_j)M_{BA}(L'_{II})$ . Здесь,  $M_{OA}(\varphi_k, l_j)$  – матрица размерности  $4 \times 4$  направляющих косинусов вектора  $L_{II}$  и координат точки  $A$  в системе  $X_0Y_0Z_0$ , выраженных через координаты  $\varphi_k, l_j$ ;  $M_{OB}(\varphi_k, l_j)$  – матрица преобразований координат;  $L'_{II}$  – вектор  $L_{II}$ , представленный в координатной системе точки  $B$  [71].

Если считать, что все  $\varphi_k$  и  $l_j$  являются переменными, то кинематическим аналогом оси луча будет пространственный разомкнутый механизм, имеющий семь степеней подвижности и содержащий три поступательные пары четвертого класса, которые можно заменить четырьмя парами пятого класса. Следовательно, обобщенной пространственной модели луча соответствует МО, обладающий семью степенями подвижности  $q_n$  ( $n=1\dots7$ ). При этом величина  $N = 2$  обеспечивается в случае выполнения условия  $\psi_{2,4} = 0,5(\pi - \varphi_{2,4})$ , где  $\psi_{2,4}$  – углы расположения нормали к поверхности отклоняющих зеркал в точках  $D$  и  $B$  по отношению к оси соответствующих прямолинейных участков.

Из условия обеспечения максимальной универсальности при обработке изделий сложной формы вектор  $L_{II}$  должен иметь в каждой точке  $A \in Q(t)$  5 обобщенных координат ( $f=5$ ) в базовой координатной системе.

Возможные варианты схем пространственного перемещения отклоняющих зеркал без кинематической избыточности и  $N = 2$  могут быть представлены следующими формальными выражениями [71]:

$$\left. \begin{aligned} &P_1 \perp R_2 \Pi P_3 \Pi R_4 \perp R_5; R_1 \Pi P_2 \neg P_3 \Pi R_4 \perp R_5; R_1 \Pi P_2 \perp R_3 \Pi P_4 \Pi P_5 \neg; \\ &R_1 \perp R_2 \Pi P_3 \Pi R_4 \perp R_5; R_1 \Pi P_2 \perp R_3 \Pi R_4 \perp R_5. \end{aligned} \right\}$$

Здесь буквами  $P_i$  и  $R_i$  обозначен вид перемещения зеркала: поступательное перемещение или вращение вокруг оси, а знаками  $\perp$ ,  $\Pi$  и  $\neg$  – прохождение луча по тракту:  $\perp$  – подвижное преломление,  $\Pi$  – отсутствие преломления,  $\neg$  – неподвижное преломление (при «замораживании»  $\varphi_2$  или  $\varphi_4$ ).

Анализ рабочих зон кинематических структур манипулятора оптики показал, что наиболее предпочтительными с точки зрения перемещения точки сфокусированного луча вдоль пространственной кривой минимального радиуса являются схемы с выходными кинематическими цепями в виде вращательных кинематических пар с ортогональными осями.

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

МИС лазер-роботов являются сложными динамическими системами, 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. 1.21, где  $S_i \longrightarrow$  (-----►) – стационарная (нестационарная) направленная позиционная кинематическая взаимосвязь;  $\xi_i \dashrightarrow$  – направленная позиционная оптическая взаимосвязь, характеризующая пространственное положение лазерного луча и точки фокуса;  $F_i \longleftrightarrow$  (◄-----►) – стационарное (нестационарное) направленное силовое взаимодействие;  $U_i \Rightarrow$  – управляющее воздействие;  $P_i$  – мощность, потребляемая от источника питания;  $\tilde{P}_i$  – мощность, передаваемая во время движения в результате позиционно-силового воздействия;  $\mathcal{P}_i$  – мощность лазерного излучения.

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

$$M = \begin{pmatrix} B_1 & SF\xi & SF & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ SF\xi & B_2 & SF & 0 & SF & SF & S\xi & 0 & \\ SF & SF & B_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & SF & \\ 0 & 0 & 0 & B_4 & SF & 0 & S\xi & 0 & \\ 0 & SF & 0 & SF & B_5 & 0 & SF\xi & SF & \\ 0 & SF & 0 & 0 & 0 & B_6 & SF\xi & SF & \\ 0 & S\xi & 0 & S\xi & SF\xi & SF\xi & B_7 & 0 & \\ 0 & 0 & SF & 0 & SF & SF & 0 & B_8 & \\ \text{ОО} & \text{РИ1} & \text{РИ2} & \text{ОТМ1} & \text{ОТМ2} & \text{ОТМ} & \text{МО} & \text{ДТМ} & \end{pmatrix}$$

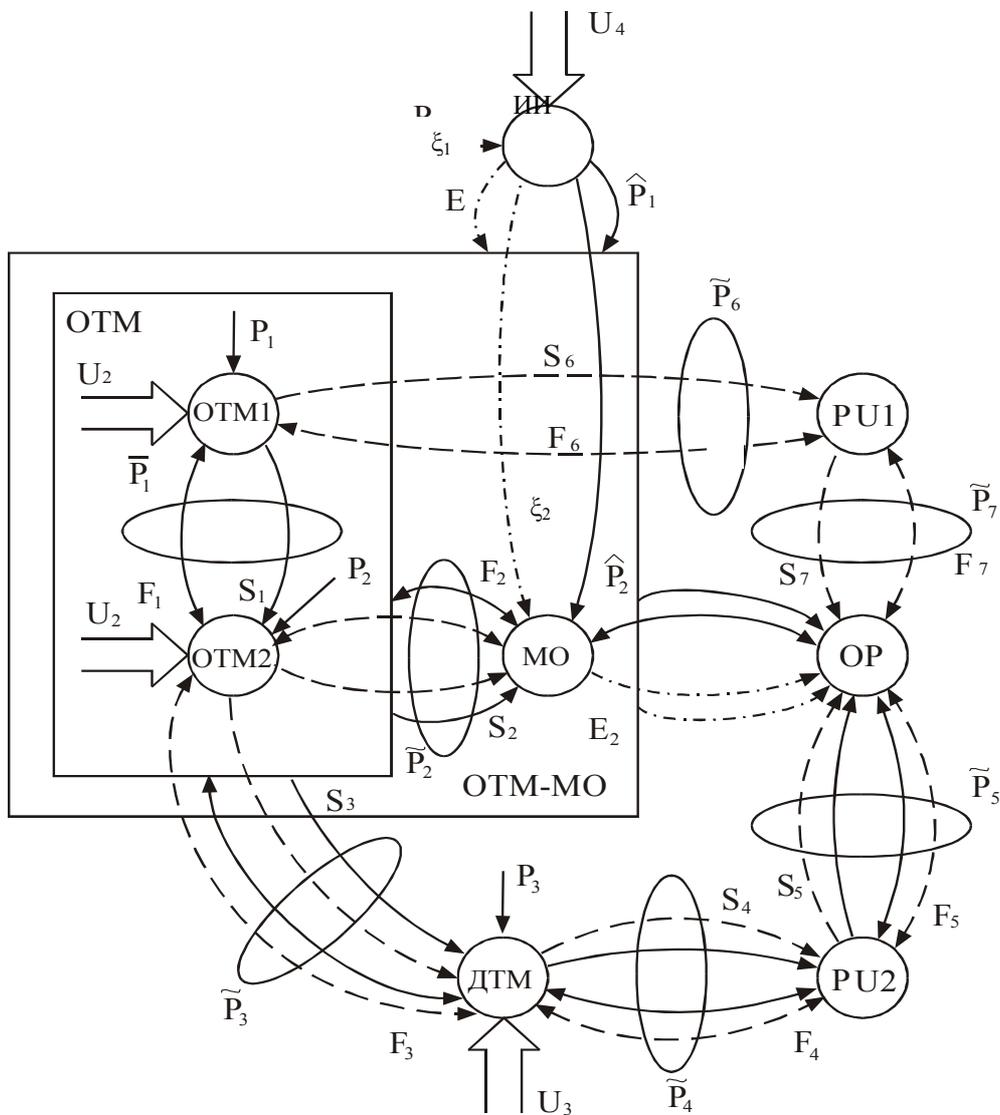


Рис 1.21. Обобщенная схема позиционных взаимодействий и силовых взаимосвязей в манипуляционных исполнительных системах многофункциональных лазер-роботов

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

В каждом конкретном случае построения МЛР схема взаимосвязей будет различной, но очевидно, что эти взаимосвязи имеют взаимозависимый позиционно-силовой характер. Если рассматривать двухманипуляционную систему ОТМ – ДТМ, то внутренние динамические свойства манипуляторов можно описать системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} H_i(q_i, \zeta_i) p^2 q_i + B_i(q_i, \dot{q}_i, \zeta_i) &= \mu_i - G_i(q_i, \zeta_i) - \mu_{Hi}; \\ \mu_i &= \chi_{\Pi i} (\Phi_{\Pi i}, q_{\Pi i}) T_{\Pi i} (D_{\Pi i} + T_{\Pi i} V_i^{-2})^{-1} (M_{qi} V_i^{-2} - D_{\Pi i} q_i); \\ T_{\Pi i} &= C_{\Pi i} + \beta_{\Pi i} p; \quad i = 1, 2. \end{aligned} \right\},$$

где  $H_i$ ,  $B_i$ ,  $G_i$ ,  $T_{\Pi i}$ ,  $D_{\Pi i}$  – матрицы и векторы, описывающие массо-инерционные и упруго-диссипативные свойства манипуляторов с учетом исполнительных приводов;  $\mu_i$ ,  $\mu_{Hi}$  – движущие моменты и моменты внешней нагрузки, отражающие взаимовлияние манипуляторов;  $q_i$ ,  $\Phi_{\Pi i}$ ,

$V_i$ ,  $\chi_{\Pi i}$  – кинематические характеристики.

При параллельном раздельном расположении манипуляторов без учета инерционности объекта перемещения динамические свойства позиционно-силового взаимодействия системы ОТМ–ДТМ–РИ–ОО можно представить выражением

$$\left. \begin{aligned} \mu_{H1} &= J_1^T(q_1, \xi_1) F_{12} + J_3^T(q_1, q_3, \xi_1) N_3 F_{TC}; \\ \mu_{22} &= J_2^T(q_2, \xi_2) F_{12}; \\ F_{12} &= T_1 [q_1 N_1(q_1, \xi_1) - q_2 N_2(q_2, \xi_2)]; \\ F_{PO} &= \chi(S_{TC}, S_{OO}) \{ T_2 [q_1 N_1(q_1, \xi_1) N_3 - J_{01}^T S_{OO}] + F_{TP} + F_{OO} \}; \\ F &= \|F : M\|^T; \\ T_i &= \text{diag} \|C_i + \beta_i p\|, 6 \times 6. \end{aligned} \right\}$$

где  $J_i$ , ( $i = 1 \dots 3$ );  $J_{01}$  – матрицы Якоби;  $F_{PU}$ ,  $F_{PO}$ ,  $F_{TP}$  – внешние силы, действующие в системе РИ – ОО;  $S_{PU}$ ,  $S_{OO}$  – обобщенные координаты положения РИ и ОО;  $\|F : M\|^T$  – шестимерный вектор сил и моментов.

Если объект перемещения (рабочий инструмент) достаточно инерционен, то выражение для позиционно-силовых связей между компонентами системы приобретут вид

$$\left. \begin{aligned} \mu_{H1} &= J_1^T F_1; \mu_{H2} = J_2^T F_2; \\ J_0^T F_1 &= H_0 p^2 S + G_0 + J_{02}^T F_2 + F_{mC}; \\ F_1 &= T_1(q_1 N_1 - S_{10}); \\ F_2 &= T_2(q N_2 - S_{20}); \\ F_{PO} &= \chi(S_{mC}, S_{OO}) \left[ T_3(S_{mC} - J_{01}^T S_{OO}) + F_{TP} + F_{OO} \right]; \\ H_0 &= \left\| \begin{matrix} m_0 E & 0 \\ 0 & J_0 E \end{matrix} \right\|_{6 \times 6}; S_0 \| S_0 : \Phi_0 \|_{6 \times 6}^T; \\ G_0^T &= \left\{ -m_0 g^T \left[ w_0 \times (J_0 \times w_0^T) \right] \right\}, \end{aligned} \right\},$$

где  $m_0, J_0$  – масса и момент инерции РИ;  $F_{TP}$  – сила трения между РО и ОО.

#### Управление движением МИС лазер-роботов

Цель управления МИС лазер-роботов – управление движением точки фокуса по заданной траектории с требуемой точностью при определенной скорости перемещения и ориентации ОГ по нормали к обрабатываемой поверхности; регулирование юстировки МО и моментная разгрузка ТМ и МО.

Существенной особенностью МИС лазер-роботов является нестационарность или неопределенность состояния кинематических, оптических и позиционных взаимосвязей, силовых взаимодействий в процессе работы, обусловленной замыканием или размыканием совокупной кинематической цепи манипуляторов, их взаимодействием с объектом работ, переменностью состояния ИКЦ. Процесс управления движением МИС лазер-роботов по существу является процессом управления указанными взаимосвязями и взаимодействиями с решением задач их идентификации, регулирования и (или) обеспечения инвариантности к их воздействию.

В детерминированных условиях и отсутствии внешних связей управление ТМ лазер-роботов (см. рис. 1.19, а, б) как ведущим манипулятором реализуется в виде контурного или позиционного программного управления с необходимостью коррекции в виде силомоментной разгрузки.

Если МО не имеет автономных приводов и является пассивной нагрузкой для ТМ, то при условии однозначного решения обратной задачи кинематики для МО и отсутствия сингулярностей координированное движение ОГ может быть эффективно обеспечено при управлении в классе адаптивных систем с использованием динамической модели МО.

Корректирующий сигнал формируется в виде рассогласования между вычисленными и измеренными величинами сил и моментов, действующих в месте замыкания кинематических цепей ТМ и МО. Вычисление производится по динамической модели МО, на вход которой подается позиционный входной сигнал, заданный в декартовой системе координат и две его первые производные. Важной особенностью является то, что вычисление параметров динамической модели МО может быть осуществлено заранее, либо производится параллельно с процессом управления движением. Формирование транспонированного якобиана при распределении корректирующего сигнала по приводам степеней подвижности ТМ может быть выполнено с использованием модели МО при учете кинематического подобия манипуляторов.

При значительной мощности излучения его транспортировка от источника к ОГ осуществляется МО, оснащенным системой отклоняющих зеркал и исполнительными приводами. По взаимодействию с ТМ он может быть автономным (см. рис. 1.19, *а*), взаимосвязанным с ТМ (см. рис. 1.19, *б*) или совмещенным с ТМ (см. рис. 1.19, *в*). В этом случае кроме СУ движением ОГ дополнительно применяются подсистемы измерения температуры нагрева и охлаждения зеркал, средства автоматической юстировки зеркал при их существенных отклонениях от геометрической оси вследствие упругих деформаций соответствующих звеньев и подсистема управляемой электромеханической силомоментной разгрузки.

В случае первой компоновки МО применяется чисто программное управление или согласованное робастное или модальное ПСУ с позиционным программным доминированием и дополнительными силовыми связями. При второй компоновке ТМ является ведущим манипулятором с программным управлением. Динамическая коррекция движения манипуляторов может быть реализована формированием управляющих сил и моментов на его приводы путем их вычисления в функции обобщенных координат либо путем реализации независимой силовой обратной связи по информации с силомоментного датчика, установленного в замыкающем зве-

не кинематических цепей ТМ и МО. Применений силовой главной обратной связи и регуляторов силы в исполнительных приводах более предпочтительно, чем, например использование ПД-регулятора в контуре позиционного управления ТМ.

В случае третьей компоновки процесс управления положением лазерного луча внутри ТМ и точки фокуса в пространстве является опосредованным управлением в функции состояния исполнительной системы ТМ и силовых воздействий на него, т.е. задачи управления и регулирования оптическими позиционными взаимосвязями не являются задачами прямого управления и регулирования.

При ограничениях на переменные состояния МИС и действия внешних связей нарушается непрерывность процесса управления перемещением и ориентацией ОГ. Он становится принципиально разрывным управлением, реализуемым в классе систем с переменной структурой. В этом случае рассмотренные выше методы управления свободным движением комбинируются с силовым управлением и реализуются системами независимого или комбинированного ПСУ. Неопределенность или неполнозаданность взаимодействия ОГ с ОО приводит к необходимости применения интеллектуального ПСУ, позволяющего, в частности, решить проблемы позиционно-силового программирования и разработки стратегии отслеживания перемещения ОГ относительно поверхности ОР без обучения на основе её идентификации и применения принципа адаптивного полуавтоматического управления.

Если оптическая головка оснащена силомоментными датчиками, расположенными между соплом и корпусом головки, то газолазерная резка объекта с произвольным контуром поверхности (рис. 1.22, а) может осуществляться по алгоритму, представленному на рис. 1.22, б.

Направление движения задается оператором в режиме позиционного управления, а ОГ – в режиме автоматического управления обходит контур с одновременным процессом резания. При необходимости осуществляется запись точек в память. На участке 1, 2 управление ОГ осуществляется оператором.

Алгоритм управления лазер-роботом зависит в частности от вида ОГ. Первый вариант головок (тип ОГ1) предусматривает измерение зазора, контроль отклонения оптической оси от нормали и контакта с препятствием. Второй вариант головок (тип ОГ2) – «нулевые» и «дифференциально-нулевые» адаптивные головки с разрывным управлением поддержания за-



Если робот оснащен первым вариантом головки (ОГ1), то контрольный проход может быть совмещен с резанием. Для этого алгоритм управления (рис. 1.23) должен быть дополнен условиям перехода к  $j = 1$  по условию срабатывания датчика прореза.

После выхода в точку  $j = 1$  по показаниям датчиков вылета, расположенным на сопловой части по два на каждой из оси  $X$  и  $Y$  по обе стороны от реи сопла, определяется нормаль к поверхности. Нормаль считается достигнутой, если углы и крена находятся в допуске, в противном случае продолжается ориентация оптической головки по нормали. После ориентации по нормали по сигналам датчиков вылета, расположенным в направлении движения определяется зазор. Если зазор в допуске, то проверяется условие наличия контакта с препятствием в направлении движения, и при отсутствии контакта производится переход в точку  $j + 1$ . В случае, если датчик контакта зарегистрировал столкновение с препятствием, анализируется возникшая ситуация. Если столкновение планировалось и было запрограммировано, то с помощью подпрограммы выполнения обхода препятствия (например обхода угла) выполняется соответствующий маневр, а после этого переход в точку  $j + 1$ . Если препятствие не планировалось, управление передается оператору, который в свою очередь определяет, возможен ли маневр обхода препятствия, выполнит его и переводит оптическую ось в  $j + 1$  или, если маневр невозможен, останавливает процесс выполнения операции.

В случае, если после ориентации по нормали зазор вышел за пределы допуска, с помощью привода сопла устанавливается требуемая величина зазора. При этом возможно срабатывание верхнего конечного выключателя (КВ1), и осуществляется отвоз оптической головки на 5 мм от поверхности или нижнего конечного выключателя (КВ2), и осуществляется подвод на 5 мм к поверхности. В случае, если конечные выключатели не сработали, установлен требуемый зазор и отсутствуют препятствия движению, осуществляется переход в  $j + 1$  точку. Если эта точка последняя, то осуществляется возврат в исходную точку и останов выполнения программы. Если  $j + jk$ , то цикл повторяется с опроса датчиков вылета.

Если измерительная система головки (ОГ 2) позволяет оценивать величину угла тангажа и крена, величину зазора и контролировать прорезание объекта, то алгоритмы интерактивного управления ориентацией головки может быть представлены в виде, показанном на рис. 1.24.

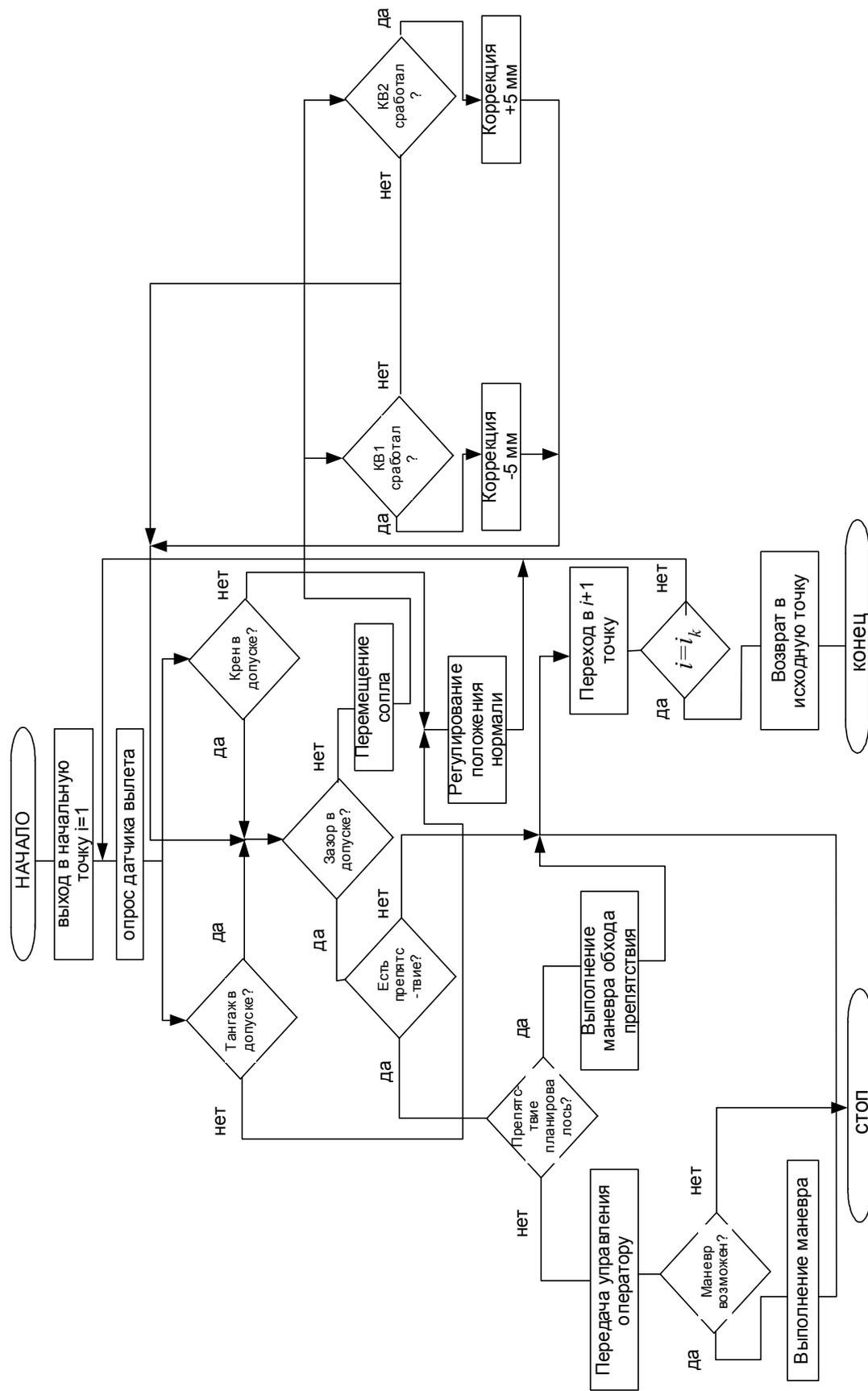


Рис. 1.23. Алгоритм управления лазер-роботом с оптической головкой ОГ<sub>1</sub>

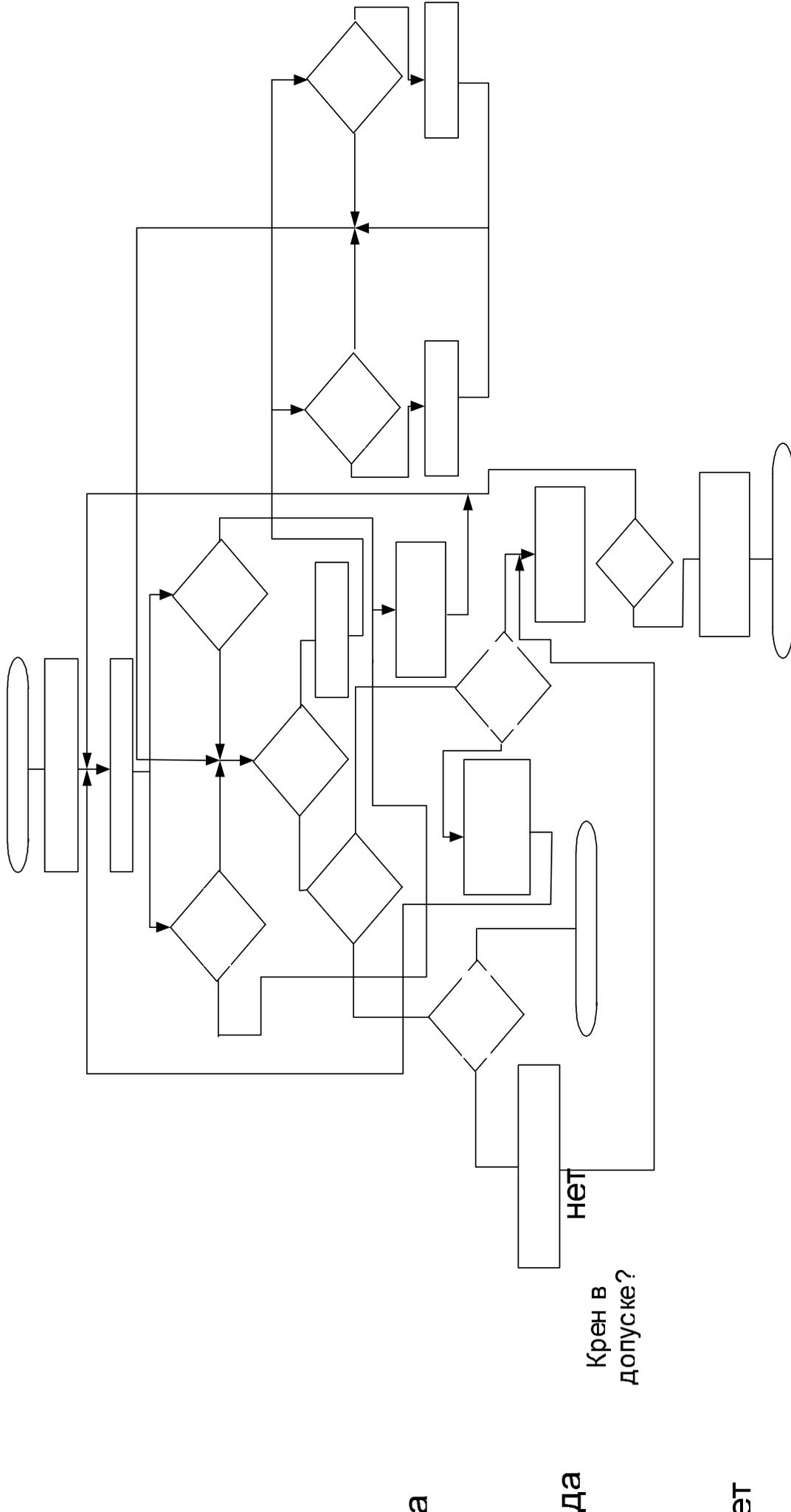


Рис. 1.24. Алгоритм управления лазер-роботом с оптической головкой ОГ<sub>2</sub>

КВ1 сработал ?  
 да  
 КВ2 сработал ?  
 нет  
 КВ1 сработал ?  
 нет  
 КВ2 сработал ?  
 нет

Здесь предусмотрен режим повторного прохода в случае отсутствия сигнала с датчика прореза. Кроме того, этапы вывода в начальную точку, регулирование положения нормали, выполнение маневров обхода препятствий, переход к повторному проходу, перемещение между опорными точками с заданной скоростью и возврат в исходную точку выполняются при наличии команды оператора; опрос датчиков и перемещение сопла по сигналам конечных выключателей осуществляются автоматически.

Если адаптивная оптическая головка типа  $ОГ_3$  позволяет распознавать образ взаимодействия с обрабатываемой поверхностью на основе анализа информации с тактильных или силомоментных датчиков, то алгоритм интерактивного управления может быть представлен в виде, показанном на рис. 1.25.

После выхода в точку  $j = 1$  в случае отсутствия контакта корпуса и сопла с поверхностью обработки показания датчиков, регистрирующих касание в точках 1, 2 и 3  $F1 = F2 = F3 = 0$ . При выполнении этого условия осуществляется перемещение по оси в направлении к поверхности до появления одного из сигналов  $Fj$  ( $j = 1, 2, 3$ ).

Возможны следующие контактные ситуации.

1. Регистрируется контакт в точке 1 ( $F1 > 0$ ),  $F2 = F3 = 0$ , производимая разворот вокруг оси  $Y$  по часовой стрелке. Контакт в точке 1 поддерживается перемещением по оси  $Z$ , ориентация продолжается до момента контакта в точках 1 и 2 ( $F1 > 0, F2 > 0$ ). Ориентация угла тангенса в направлении движения по оси  $Y$  осуществляется разворотом против часовой стрелки вокруг оси  $X$  до момента контакта в точке 3 ( $F3 > 0$ ). Ориентация заканчивается достижением условия  $F1 > 0, F2 > 0, F3 > 0$ : и осуществляется установка зазора перемещением приводом сопла по оси  $Z$  на 1,5 мм от поверхности.

2. Регистрируется контакт в точке 2 ( $F2 > 0$ ),  $F1 = F3 = 0$ . Аналогично пункту 1 производится ориентация разворотами вокруг оси  $Y$  против часовой стрелки и вокруг оси  $X$ .

3. Регистрируется контакт в точке 3 ( $F3 > 0$ ). Производится разворот вокруг оси  $Y$  до появления контакта в точке 1 или 2. Далее ориентация осуществляется по пункту 1 или 2 соответственно.

После завершения ориентации по нормали и установлению зазора при отсутствии сигнала с датчика контакта и наличии с датчика прореза производится перемещение в точку  $j + 1$ . Если на этом этапе произошел

контакт с поверхностью (регистрируется по показаниям датчиков  $F_j > 0$ ), снова осуществляется ориентация в зависимости по 1, 2 или 3. Остальные этапы алгоритма повторяют ранее рассмотренные алгоритмы.

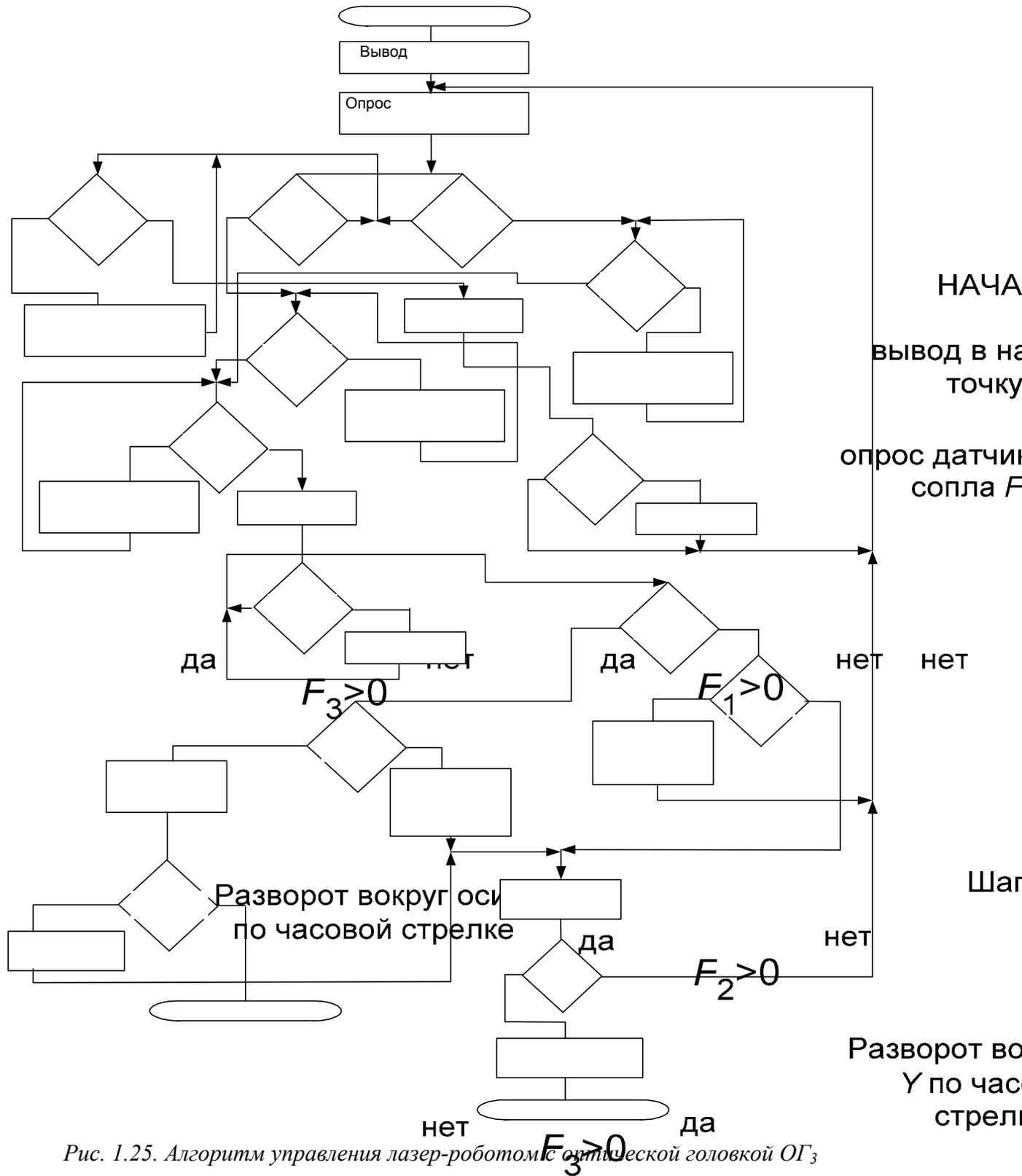


Рис. 1.25. Алгоритм управления лазер-роботом с оптической головкой ОГ<sub>3</sub>

Разворот вокруг оси X против часовой стрелке

Шаг Z=-1,5мм

Рассмотренные алгоритмы основаны на выводе оптической головки в исходную позицию начала процесса резания методом ручного, автоматического или интерактивного управления и последующем интерактивном управлении процессом резания. Опыт фирм Японии «Обаяси Куми», «Мицуи Кэнсэцу», «Кобэ сталелитейный завод», «Симизу Кэнсэцу», «Такэнака», «Кэнден-ко», «Тайси Кэнсэцу» и «Кавасаке Дзюкоге» показывает, что системы управления мобильных и подвижных роботов используют аналогичные способы управления.

Возможны три варианта интерактивного управления процессом резания.

1. Интерактивное управление с доминирующим ручным управлением. Автоматическое управление является его поддержкой или следует после ручного управления.

2. Интерактивное управление с доминирующим автоматическим управлением. Ручное управление применяется в качестве корректирующего управления или управления в тех ситуациях, когда автоматическое управление неосуществимо или неэффективно.

3. Согласованное интерактивное управление, когда ручное и автоматическое управление происходят одновременно. Например, оператор вручную ведет оптическую головку, а ориентация оптической головки по нормали с соблюдением зазора осуществляется в автоматическом режиме.

Информация с датчиков системы «ОГ – манипулятор – объект – робот» поступает к двум центрам принятия решения, но используется она по-разному: для ЭВМ стратегия ее использования определена заранее, у оператора стратегия вырабатывается в процессе управления.

## **2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ КООРДИНАТ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ В СБОРОЧНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

### **2.1. КОМПОНОВКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ**

Робототехнические сборочные системы (РСС) характеризуются разнообразием компоновок. В одних РСС основная функциональная нагрузка по манипулированию с объектами сборки возложена на промышленные роботы, в других – на вспомогательное технологическое оборудование.

Вопросам применения роботов в составе роботизированных сборочных систем посвятили свои работы М. Вукобратович, Ф.М. Кулаков, В.Г. Нуждихин, Д.Е. Охоцимский, Е.И. Юревич, Л.С. Ямпольский, Н. Van Brussel, J.P. Merlit и другие авторы.

В составе РСС можно выделить следующие элементы: манипуляторы для проведения действия над объектами работ; рабочее оборудование и инструмент, предназначенный для операций монтажа; транспортные устройства с датчиками наличия деталей; различные подающие, ориентирующие устройства и сборочные приспособления, сборочные модули с элементами адаптации; органы очувствления и визуализации; систему управления, которая обрабатывает информацию от датчиков и сенсоров и формирует команды для манипулятора.

Сборочный комплекс состоит, как правило, из одного или из двух автоматических манипуляторов, служащих для транспортирования деталей и для их сборки. Иногда промышленный робот служит для транспортирования, сборки и обслуживания технологического оборудования. Кроме этого комплекс может быть снабжен набором быстросменных инструментов и захватных устройств, что позволяет расширить возможности сборочного комплекса.

Автоматическое выполнение роботом сборочных операций можно схематически представить двумя различными способами. Первый способ –

это сборка изделий по разомкнутой схеме. Для достижения удовлетворительных результатов на органы позиционирования, датчики внутренней информации и конструкцию периферийных устройств накладываются повышенные ограничения по жесткости и точности. Однако данное решение оказывается дорогостоящим и снижает производительность труда. При этом также уменьшаются допуски на изготовление деталей. Этот подход подобен разработке специальных механизмов и приемлем в робототехнике лишь в том случае, когда допуски на монтаж достаточно велики. Этот способ целесообразно применять в массовом и крупносерийном производстве при создании сборочных автоматов. В этом случае процесс сборки строго определен программой, обеспечивающей жесткую синхронизацию всех операций. К сборочному оборудованию предъявляются повышенные требования по точности.

Второй способ – это сборка изделий по замкнутой схеме. Этот способ предполагает использование в сборочных процессах робототехнических устройств, оснащенных системой осязательного восприятия, информация от которой по контурам обратной связи обеспечивает правильное ведение сборочного процесса. Замкнутая схема сборки является перспективной в силу большой гибкости, что позволяет ее использовать в серийном и мелкосерийном производстве, кроме того от робота требуются более низкие точностные характеристики.

Применение сборочных роботов, работающих по замкнутой схеме рассмотрено в работах Н.А. Девянина, П.Д. Крутько, В.С. Кулешова, Н.А. Лакоты, Д.Е. Охоцимского, Е.П. Попова, 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 выделяются пассивная податливость и активное использование силомоментной информации.

Для обеспечения нормального протекания процесса сборки должны быть установлены максимально допустимые отклонения в относительном положении собираемых деталей, при которых обеспечивается сопряжение. Если определены допустимые величины отклонения положения  $\Delta E$  и от-

клонения относительного поворота  $\Delta v$ , то должно выполняться следующее условие:  $\delta E \leq \Delta E$ ;  $\delta v \leq \Delta v$ , где  $\delta E$  и  $\delta v$  соответственно погрешности относительного положения и относительного поворота собираемых деталей.

Для обеспечения заданных условий собираемости применяют системы жесткого базирования. Эти системы имеют определенные недостатки, обусловленные сложностью переналадки системы на смену номенклатуры собираемых изделий, а также зависимостью условий собираемости от точности изготовления сборочных единиц. Эти недостатки привели к появлению способов автоматической сборки, основанных на самоориентировании деталей относительно друг друга. При этом одна из сопрягаемых деталей жестко крепится, а вторая сопрягаемая деталь получает свободу перемещения в ограниченном пространстве и при этом имеет возможность самоустанавливаться (вибрационная сборка и др.).

В ряде сборочных роботов используются упругие элементы, установленные в запястье руки робота 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 используется пассивная податливость. Устройствам с пассивной податливостью посвящены работы J.L. Nevins, D.E. Whitney, D.T. Pham, J. Simons, H. Van Brussel и других авторов.

Примером устройства с пассивной податливостью (самокорректировкой) является устройство, разработанное J.L. Nevins и D.E. Whitney (рис. 2.1, а). Это устройство с пассивной податливостью за счет упругих связей, основанных на геометрических свойствах шарнирного четырехугольника с удаленным центром корректировки (RCC), позволяет разграничить поступательное и вращательное перемещения вала, которые вызваны силами, приложенными в центре корректировки  $C$ .

Применение пассивной податливости (RCC) для сборки коннектора показано на рис. 2.1, б, где сборочный робот осуществляет движение сопряжения, а пассивное корректирующее устройство осуществляет корректирующие движения.

Следует отметить, что пассивные устройства обладают недостатком, связанным со сложностью их замены, что затрудняет возможность переналадки и перепрограммирование устройства на сборку другого изделия. Каждое податливое устройство разрабатывается для строго определенных

условий и размеров деталей, что не позволяет применять их в универсальных роботах, предназначенных для широкого спектра производственных операций.

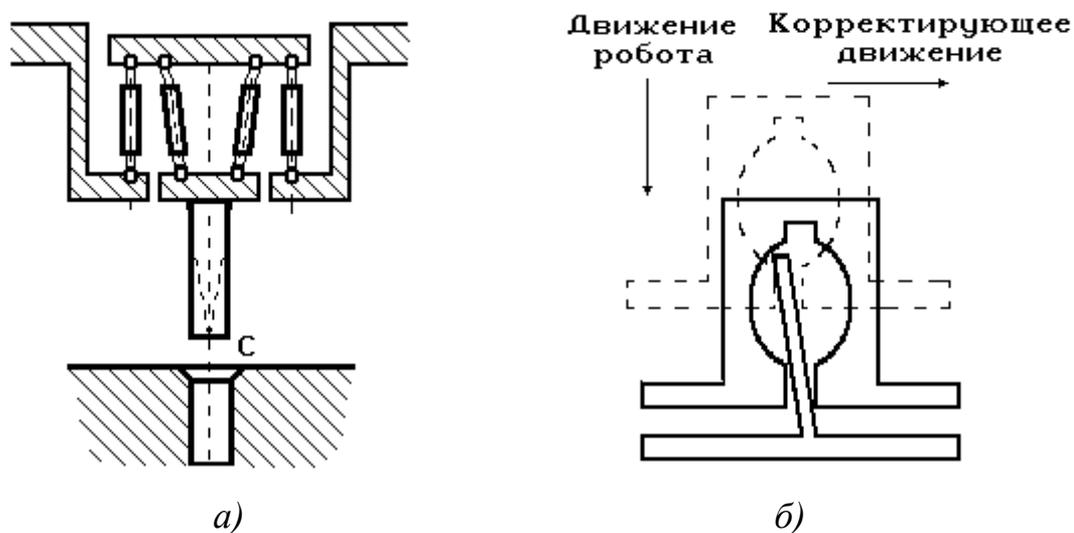


Рис. 2.1. Устройства с пассивной податливостью

Точность позиционирования ИУ технологических роботов достигает величины 1...2 мм, что явно превышает допустимые величины отклонения положения. Повышение точности позиционирования влечет за собой усложнение и удорожание конструкции и системы управления приводами робота. Ограниченная точность приводов перемещения, а также традиционное расположение измерительных устройств на механизмах приводов перемещения, а не в схвате робота, приводят к необходимости введения канала точного перемещения, реализуемого чаще всего в виде отдельного конструктивного узла. Структура канала точного перемещения определяется алгоритмом управления.

Использование силомоментной информации позволяет выполнять сборку деталей ПР с точностью позиционирования, превышающей допустимые величины отклонений положения и в отличие от пассивных средств обеспечивает более широкие возможности перепрограммирования сборочных систем.

Одним из методов получения информации о силах и моментах, действующих на исполнительный орган сборочного робота, является прямое измерение движущих моментов робота [20]. При использовании реверсивных приводов любая сила, действующая на деталь, помещенную в схвате робота, окажет влияние на движущие моменты. При этом двигатели развивают моменты, направленные против моментов сопротивления. Таким об-

разом, воздействующую силу можно определить, измеряя разность между действующим моментом и моментом холостого хода. Это так называемое косвенное измерение сил и моментов. Косвенное измерение сил и моментов для выполнения сборочных операций рассмотрено в работах В.С. Кулешова, Н.А. Лакоты, Н. Inoue, W. Khalil, P. Borrel, P.C. Bolles, R. Paul и других авторов.

Основное преимущество косвенного определения сил и моментов состоит в том, что не требуется применения специализированных датчиков, а используются некоторые рабочие параметры приводов, такие как ток якоря электродвигателя постоянного тока, разность давлений в камерах гидроцилиндра и т.д. Однако применение этого метода имеет определенные ограничения. Во-первых, необходимо применение обратимых приводов робота, во-вторых, в этом методе сильно сказываются неоднородность инерционных сил, наличие груза, упругость его элементов, изменение сил трения в сочленениях и т.д.

Другим методом получения информации о силах и моментах является использование силомоментных датчиков [24]. Силомоментные датчики предназначены для измерения компонент главного вектора сил и моментов, действующих на рабочий орган манипулятора, в проекции на связанную с датчиком систему координат.

Одним из вариантов получения и использования силомоментной информации является введение датчика в привод каждой степени подвижности сборочного робота, что позволяет осуществлять управление соответствующим приводом [24, 56]. Примером данного принципа построения сборочного робота является манипулятор УЭМ-5, в котором датчики моментов измеряют угол закручивания упругого элемента с помощью датчиков угла поворота.

Наиболее перспективно применение многокомпонентных силомоментных датчиков с индивидуальным микропроцессором.

Примером такого типа РСС является сборочный комплекс, выполненный на базе промышленного робота PUMA с ангулярной системой координат, в запястье которого установлен многокомпонентный силомоментный датчик (рис. 2.2). Информация с датчика обрабатывается микропроцессором. На основании полученной с датчика информации микроЭВМ выдает управляющие сигналы на приводы робота.

Еще одним примером использования многокомпонентного датчика, установленного на сборочном роботе, работающем в декартовой системе координат, является сборочная система, рассмотренная в работе. Информация с силомоментного датчика (рис. 2.3), обрабатывается микропроцессорной системой и поступает в миниЭВМ, которая управляет приводами сборочного робота.

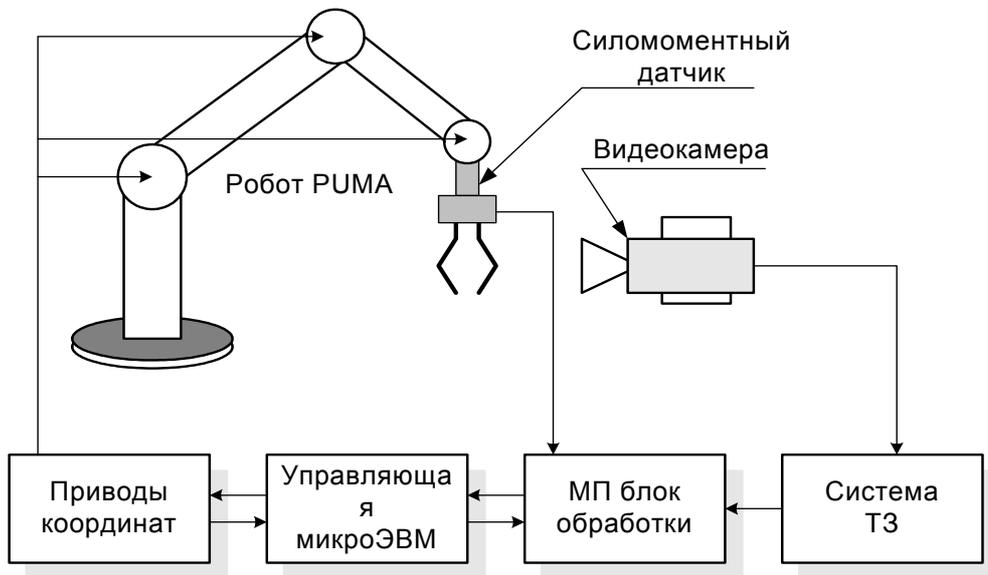


Рис. 2.2. Сборочный комплекс на базе промышленного робота PUMA

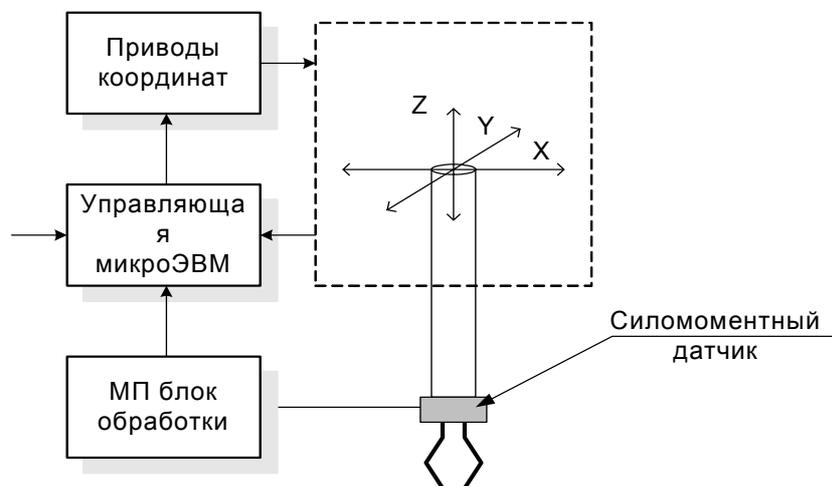


Рис. 2.3. Сборочная система с управлением от микроЭВМ

Вследствие неточности позиционирования, а также действия возмущающих воздействий, со стороны объекта сборки возникает отклонение фактической траектории движения от программной. Необходимо обеспечить перемещение объекта по заданной траектории  $\bar{X} = \bar{X}_{\text{зад}}(t)$  при одно-

временном поддержании вектора сил и моментов реакций  $G$ , действующих на объект на заданном уровне, чаще всего нулевым  $G = G_{\text{зад}}$ .

Для реализации движения исполнительного устройства с рабочим органом в соответствии с алгоритмами управления необходимо использовать позиционно-силовое управление роботом на основании использования информации об обобщенных координатах, скоростях, векторе сил и моментов  $G$ .

В качестве примера роботизированной сборочной системы рассмотрим роботизированный технологический комплекс подачи тепловыделяющих сборок (ТВС) [31].

Во всём многообразии задач автоматизации в атомной промышленности особое место занимает проблема роботизации операций обслуживания зоны ядерного реактора атомных электростанций (АЭС) и разбраковки ТВС с целью их аттестации для утилизации или дальнейшего использования на заводах по переработке ядерного топлива. Основная технологическая операция, выполняемая в бассейне, заполненном водой, при этом заключается в перегрузке и соответствующей подаче ТВС. Автоматизация ее осуществляется с помощью многофункциональных робототехнических систем подобных перегрузочным манипуляторам и реализованными на их основе роботизированным технологическими комплексами.

Нестационарность расположения контейнеров на дне бассейна и неполнозаданность ориентации их ячеек исключают использование алгоритмов автоматической сборки при установке и извлечении ТВС и требуют в начале решения проблемы определения координат контейнера и расчёта центров осей ячеек в нём. Кроме того, ТВС является субтильным элементом, форма искривления которого может быть произвольного вида и при выполнении установочных операций даже при совмещении центров осей ячейки и схвата с ТВС возможны ситуации перекоса и заклинивания. Появление осевых и поперечных сил может привести к разрушению стержня сборки и падению обломков на дно бассейна или ячейки контейнера. Следовательно, нестационарность геометрии предъявляет повышенные требования к точности отработки траекторных перемещений и требует использования силомоментного оучувствления РТС. Субтильность объекта и его относительно большие размеры накладывают ограничения на скорости и ускорения при его транспортировке.

Система управления РТС должна обеспечивать выполнение следующих операций: определение координат ячеек и ТВС; транспортные перемещения ТВС между ячейками контейнеров, ядерным реактором или измерительным устройством; извлечение ТВС из ячеек реактора и контейнера, а также установка ТВС в соответствующие ячейки в условиях нестационарности геометрии и subtilности ТВС; перемещение ТВС перед коллиматором измерительного устройства; сбор обломков, просыпей и удаление их при разрушении ТВС вне контейнера и реактора; высверливание и удаление остатков ТВС при её заклинивании в ячейке контейнера; проведение ремонтно-восстановительных работ; автоматическая смена захватного, измерительного и технологического инструмента. Управление манипулятором РТС должно выполняться в автоматическом, дистанционном и интерактивном режимах.

В настоящее время на объектах ядерной энергетики имеется и используется множество различных устройств и приспособлений для выполнения функций обслуживания, не обладающих свойствами универсальности, которые не всегда выводят персонал из зоны повышенной опасности. В связи с этим актуальной является проблема создания дистанционно-управляемого подъёмно-транспортного и технологического ремонтного оборудования на основе применения роботов и манипуляторов с ЭВМ в системе управления.

Характерным примером такой автоматизированной системы является манипуляционная система обслуживания ядерного реактора. Система содержит платформу для автоматической перегрузки топливных элементов и дистанционную автоматическую систему манипулирования приводом регулирующего стержня. Компоновка этих систем представлена на рис. 2.4, где обозначено: 1 – автоматическая платформа для перегрузки топливных элементов; 2 – пункт дистанционного управления; 3 – передающий механизм; 4 – резервуар реактора; 5 – контейнер с ТВС; 6 – активная зона реактора; 7 – основание оболочки реактора; 8 – система манипулирования приводом регулирующего стержня; 9 – привод стержня; 10 – оболочка первичной защиты; 11 – ТВС; 12 – приборный отсек.

Автоматическая платформа для перегрузки ядерного топлива используется на атомных станциях, где применяются реакторы с горячей водой.

Она предназначена для проведения инспекционного контроля и выполняет комплекс операций после полной остановки реактора: перемещение отработанного ядерного топлива из активной зоны реактора в резервуар для хранения отработанного топлива; погружение топливных стержней

в активную зону реактора в зависимости от степени их выгорания; перемещение контейнера для отработанного топлива; перемещение новых топливных элементов из зоны хранения и др.

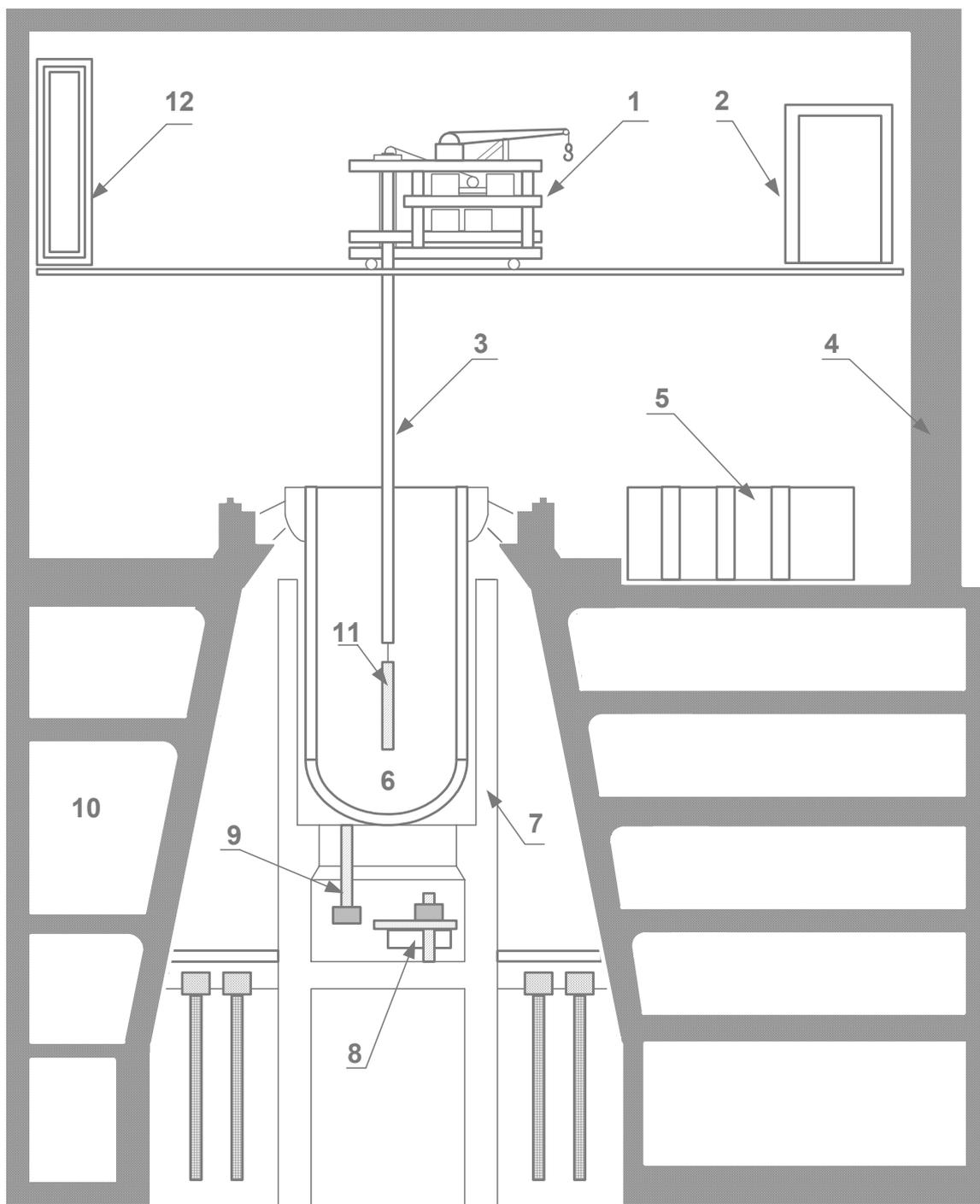


Рис. 2.4. Компоновка системы автоматической перегрузки топливных элементов

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.

Система выбора режима работы обеспечивает функционирование платформы в трёх основных режимах: ручное управление, полуавтоматический режим, автоматический режим. Общее число циклов перемещения топлива за период остановки для проведения профилактики составляет несколько сотен.

В рассматриваемой системе основной является перегрузочная операция с ТВС между отсеком хранения топлива и самим реактором. На заводах по перегрузке ядерного топлива проводятся аналогичные операции с ТВС по перегрузке и контролю их параметров. По условиям безопасности все работы по перегрузке и контролю состояния ТВС выполняются в бассейне, заполненном водой. Перед началом работы в бассейн (размерами 4×12 м и глубиной 6 м) доставляются контейнер с ТВС, подлежащими обработке, и пустой контейнер, которые устанавливаются в исходную позицию. Ячейки в каждом контейнере строго ориентированы. Контейнеры с ТВС должны быть установлены на дне бассейна с абсолютной погрешностью положения по осям  $X$ ,  $Y$  не более  $\pm 5$  мм, а для угла поворота их вокруг своей оси – не более  $\pm 0,38^\circ$  относительно заданного центра их координат. Расположение координатной сетки центров ячеек произвольное.

Объектом манипулирования являются ТВС типа ВВЭР-440, РБМК-1000, РБМК-1500 – детали цилиндрической формы диаметром около 10 см, с соотношением длины к диаметру больше 10, массой 100...200 кг.

В РТС используется манипуляционный робот порталного типа, исполнительное устройство которого представляет собой транспортное устройство с размещённым на нём исполнительным органом (манипулятором) (рис. 2.5).

На рисунке изображены:  $K_1$ ,  $K_2$  – контейнеры с ТВС;  $K$  – коллиматор измерительной установки;  $ЯР$  – реактор;  $МИ$  – магазин инструментов;  $УО$  – сменное устройство ориентации ТВС;  $УУ$  – устройство управления; позиции I, II, и III – операционные точки работы системы;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – координатные оси;  $C$ ,  $B$  – избыточные координаты. Транспортное устройство обеспечивает перемещение исполнительного органа в горизонтальной плоскости  $XOY$  по координатам  $X$  и  $Y$  и содержит мост и тележку, выполненные в виде ферм, снабжённых редукторами и электроприводами.

Мост перемещается по рельсовому пути, установленному над водой вдоль рабочей зоны бассейна. Задача исполнительного органа – вертикальное перемещение по оси  $Z$  захватного устройства с зажатым в нём ТВС, вращение и качание стержня. Транспортные движения с вытянутым из контейнера ТВС в воде бассейна могут привести к значительным его отклонениям от вертикальной оси и раскачиванию, поэтому исполнительный орган предполагается выполнить в виде вертикальной трубы – кессона, внутри которого на роликах установлена каретка с головкой, перемещающаяся с помощью лебёдки и связанная с ней тросовой передачей. В головке размещены двигатель вращения захвата и датчик измерения сил и моментов, возникающих при отклонении захвата и при взаимодействии ТВС со стенкой ячейки.

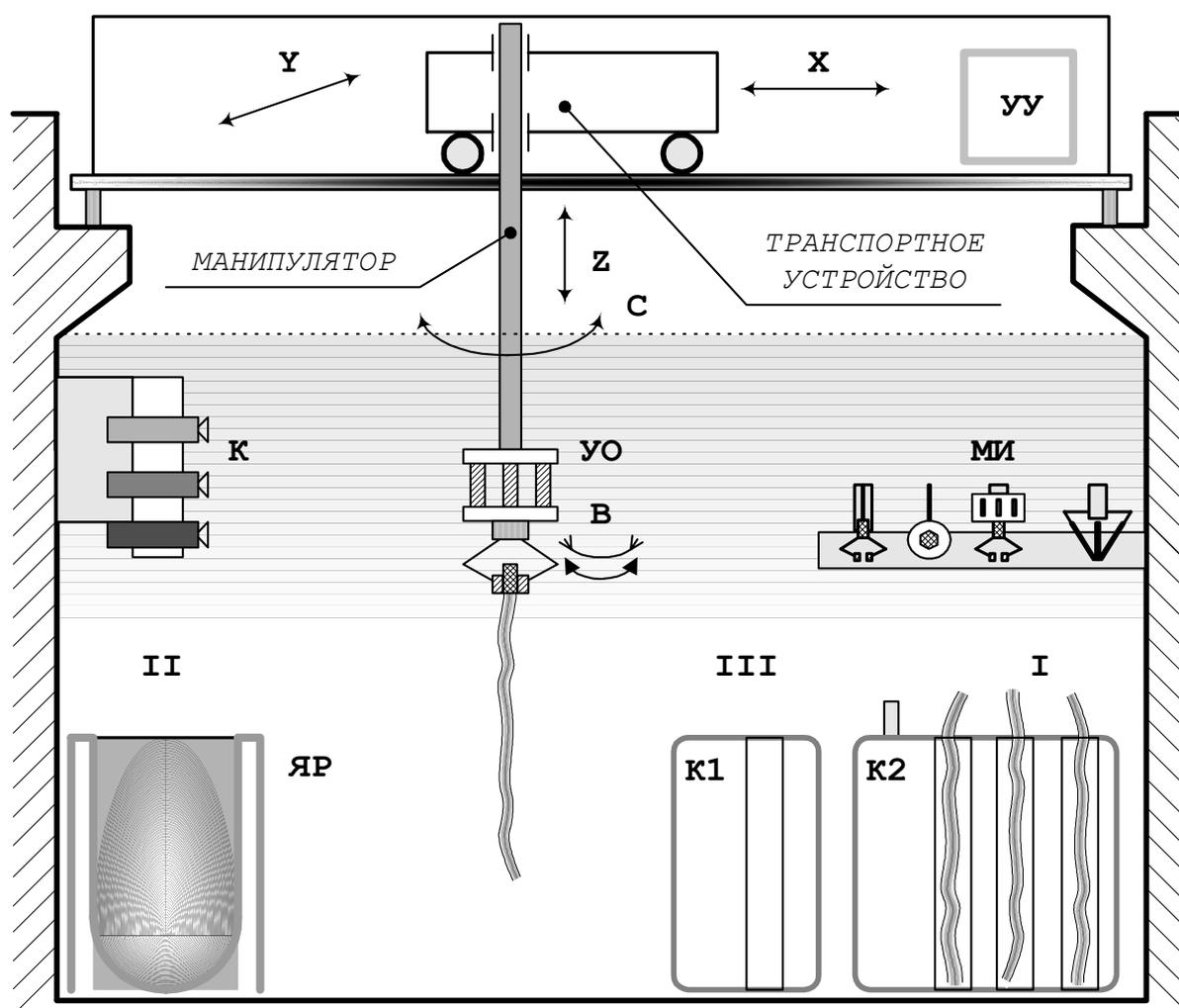


Рис. 2.5. Манипуляционный робот для работы с ТВС

Избыточность универсального исполнительного устройства обеспечивает применение его на многих сходных операциях: в качестве перегрузочного манипулятора (основные приводы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ); как технологического манипулятора при разбраковке и контроле ТВС (с дополнительным устройством ориентации); в качестве ремонтного робота (с использованием сменного инструмента).

Как уже было отмечено, искажения формы ТВС могут приводить при выполнении установочных операций к появлению разрушающих сил и моментов; кинематическая схема с тремя поступательными парами не может обеспечить ориентирующие движения, связанные с поворотом и покачиванием ТВС. Кроме того, любая операция по подъёму упавшего на дно бассейна ТВС заключается, прежде всего, в переводе его из горизонтального в вертикальное положение. Отсюда следует, что конструкция РТК должна быть дополнена устройством ориентации, обеспечивающим дополнительные степени подвижности, расширяющие возможности манипулирования с ТВС.

Известны устройства, увеличивающие количества степеней свободы захватного механизма и расширяющие его функциональные возможности. Например, предлагается установить на вертикальной штанге электроприводы поступательного перемещения с возможностью изменения положения по углу корпуса, штоки которых шарнирно связаны с концами коромысла с установленным на нём захватом. С помощью этих приводов осуществляются опускание, подъём и наклоны схвата. Общий вид устройства представлен на рис. 2.6, на котором: 1 – шарнир; 2 – силовой цилиндр; 3 – коромысло. Перемещение захвата манипулятора производится посредством движения моста и тележки по осям  $X$  и  $Y$ , опускания (подъёма) коромысла с захватом при помощи одновременного изменения длины штоков силовых цилиндров.

Изменение вертикальной ориентации захвата осуществляется посредством

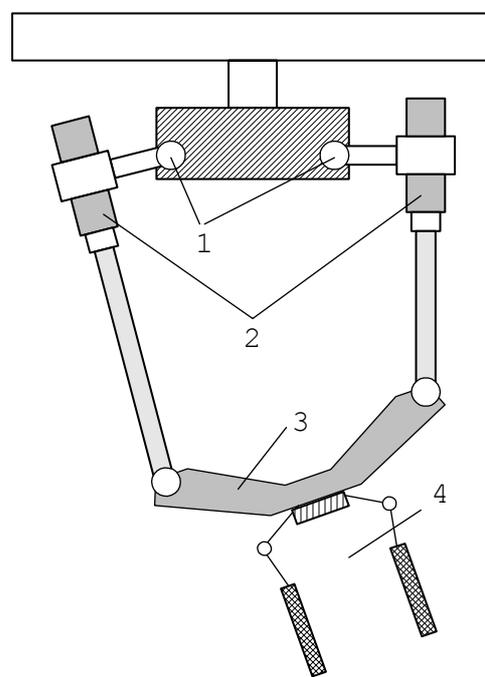


Рис. 2.6. Захватный механизм

установки разной длины штоков силовых цилиндров при помощи механизма изменения положения силовых цилиндров по углу. Это обеспечивает возможность изменения ориентации захвата в пространстве в больших пределах – почти до  $\pm 90^\circ$ .

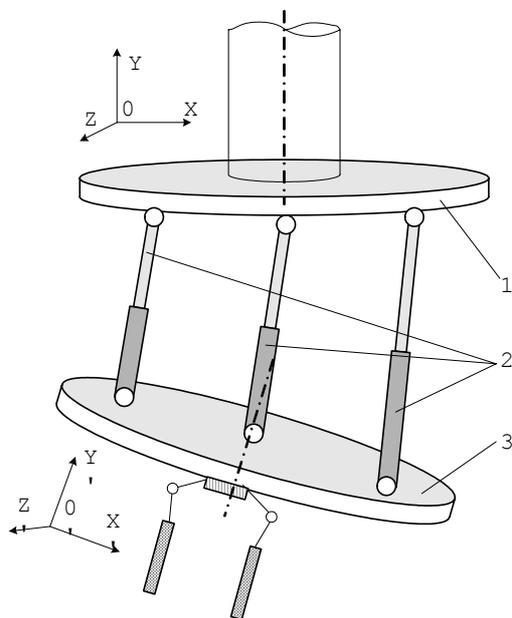


Рис. 2.7. Захватный механизм

Известны также устройства в виде «платформы Стюарта» [46] (рис. 2.7), состоящие из неподвижного, установленного на свободном конце механизма вертикального перемещения, основания (1) и подвижной платформы (3) с закреплённым на ней захватным устройством, связанных между собой тремя или шестью приводами линейного перемещения (2) (поступательными кинематическими парами), шарнирно закреплёнными на обеих платформах. Автономное управление длиной каждого из механизмов приводов позволяет задать любой пространственный угол ориентации захвата и тем самым обеспечить выполнение операций извлечения ТВС из

ячейки и сопряжения ТВС с ячейкой контейнера.

Для расширения функциональных возможностей манипулятора по работе с ТВС на различных операциях вводится дополнительная вращательная пара вокруг оси  $Z$ , устройство ориентации, а также набор сменных захватов и технологического инструмента.

Исходя из задач по перегрузке ТВС, инспекции их состояния и общих требований, предъявляемых к организации систем управления, роботизированный технологический комплекс подачи сборок представляет собой многофункциональную систему (рис. 2.8), состоящую из системы управления с программно-аппаратной задающей и программно-аппаратной исполнительными частями, силовых модулей с приводами координатных перемещений и корректирующих устройств, механизмов перемещений, объекта работ – ТВС и набора сменного инструмента с магазином инструментов. Система управления должна иметь развитый набор датчиков состояния (путевых, позиционных, силовых) и соответственно средства адаптации для обеспечения безусловно безаварийного режима работы. Ин-

терактивный режим работы обеспечивается пультом связи с оператором и видеоконтрольной установкой. Система входит в общий информационно-вычислительный комплекс РТК.

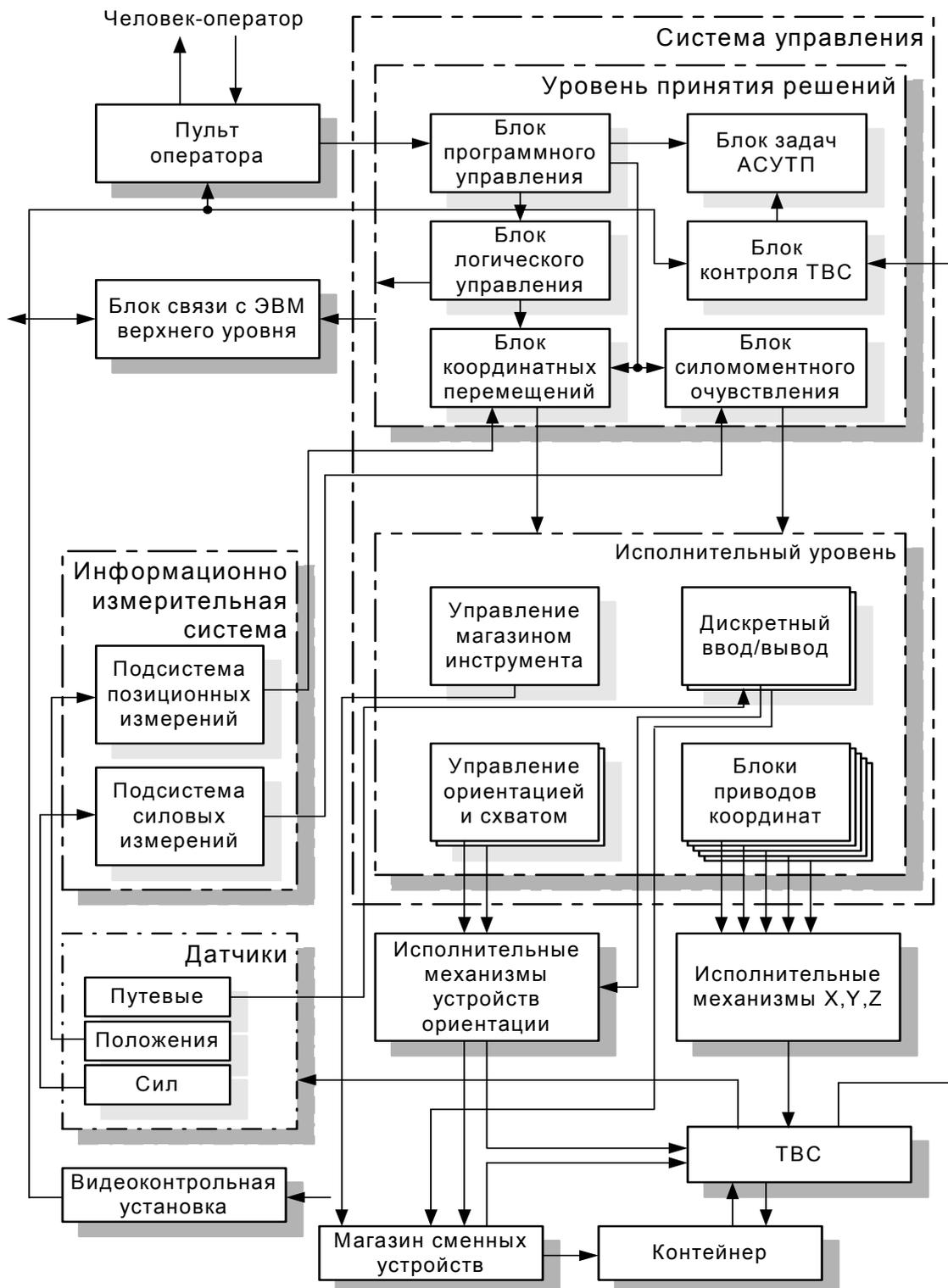


Рис. 2.8. Общая структура многофункционального РТК

## 2.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В общем случае положение одной из сопрягаемых деталей сборки типа «вал – втулка» является незадаанным или не полностью определенным. Например, неточность установки контейнеров в бассейне узла неразрушающего контроля ТВС по координатам  $X$  и  $Y$  и возможность их поворота вокруг своей оси исключают возможность выполнения установочных операций по заранее записанным в память системы координатам, поэтому необходимо вначале решить задачу точного нахождения координат ячеек контейнеров.

Задача поиска состоит в следующем. В системе координат контейнера  $XYZ$  для установки ТВС в горизонтальной плоскости имеется семейство конструктивных отверстий  $M\{X_{i0}, Y_{i0}\}_{i=1}^n$ . Из-за погрешностей установки

контейнера фактические координаты центров ячеек контейнера  $M\{X_{iTM}, Y_{iTM}\}_{i=1}^n$

не совпадают с конструктивными, т.е. имеет место неравенство

$$M\{X_{i0}, Y_{i0}\}_{i=1}^n \neq M\{X_{iTM}, Y_{iTM}\}_{i=1}^n.$$

Следует иметь в виду, что геометрия и взаимное положение центров ячеек в контейнере строго определены и достаточным является определение координат только двух смежных ячеек, по которым можно рассчитать и все остальные. В автоматическом режиме исполнительный орган установки может быть выведен лишь в точку, где предположительно находится центр ячейки контейнера. Ограниченная точность приводов перемещения и расположение датчиков положения на механизмах приводов, а не в схвате робота усложняет задачу. Формирование координатных данных и коррекция управляющей программы могут быть выполнены с применением алгоритмов автоматической сборки либо адаптивного контроля и измерений [64].

Устройства для определения центров круглых предметов, предложенные в работе, выполняют коррекцию положения схвата относительно исполнительного органа (ИО) робота. В данных устройствах величина и направление требуемой коррекции определяется с помощью пневматических, фотоэлектрических, акустических устройств. Эти устройства обладают низкой надежностью из-за невысокой точности, сложности устройст-

ва и системы управления. Известны корректирующие устройства, величина, направление и ориентирование в которых осуществляется ощупыванием деталью. При введении в контакт сопрягаемых объектов типа «вал-штулка» возникает перекося вала, направленный в сторону отверстия. Чувствительные элементы, установленные в кисти ИО робота, например многокомпонентные датчики, регистрируют перекося, выдавая на исполнительные механизмы сигналы на корректировку. Недостатками данных устройств является то, что они сложны по конструкции, установка датчика в кисти робота снижает его жёсткость. Данными устройствами можно собирать детали только цилиндрической формы. Существует устройство для определения центров и проведения сборки, выполненное в виде корпуса с захватными губками, на которых установлены направляющие с упругими лентами. Последние имеют возможность выдвигаться по поверхности собираемой детали за ее торцевую часть и подпружинены в сторону детали. Коррекция положения устройства производится пропорционально деформации упругой ленты.

Среди измерительных устройств различают системы выносного контроля, когда контрольные операции выполняются вне технологического оборудования, и системы встроенного контроля, в которых необходимые измерения и контроль осуществляются непосредственно в ходе выполнения технологической операции. Адаптивный контроль выполняется как специальными измерительными головками, так и с использованием самого объекта манипулирования. Средства автоматического считывания, обработки и записи результатов координатных измерений в зависимости от используемого метода делятся на нулевые и дифференциальные. Известен также метод усреднения, позволяющий скорректировать отклонение осей при сопряжении объектов. В системах управления для точного определения координат расположения базовой детали относительно схвата робота возможно применение метода обучения. В методе обучения, используемом для сборочных многозвенных ПР, обеспечивается точное расположение рабочего инструмента относительно базовой детали, в которую будет устанавливаться взятая им деталь.

В основе принципа действия устройств определения координат лежит тот или иной метод автоматического измерения фактических пространственных координат объекта. В качестве измерительного устройства используется либо специальная измерительная головка, установленная в

схвате робота, либо сама деталь. Систематизацию методов определения координат можно провести по различным классификационным признакам. В зависимости от того, используется при определении координат информация о силовом взаимодействии или нет, можно определить две основные группы систем: позиционные и позиционно-силовые. Один из вариантов классификации приведён на рис. 2.9.

Среди позиционных методов можно выделить нулевые, программные и следящие. Нулевой метод измерения основан на определении фактического положения измерительной головки относительно детали в режиме нуль-индикатора. «Нулевая» головка формирует импульсные сигналы, определяющие абсолютные координаты головки в момент её соприкосновения с деталью. Эти данные подаются в микроЭВМ, рассчитывающую отклонение измеряемых координат от заданных и формирующую сигналы управления. Метод основан на использовании датчиков касания и разделяется на два класса: с изменяющимся (с сохранением положения после контакта) и фиксированным (с возвратом в исходное положение) нулевыми положениями измерительного наконечника, и обеспечивает расчёт координат сетки контрольных точек на заданной поверхности.

Программные методы позволяют определять в процессе измерений соответствие между контрольными точками эталонной и измеряемой поверхностей. Возможно также проведение аппроксимации (интерполяции) реальных значений координат объекта по результатам измерения в контрольных точках. В режиме слежения может выполняться последовательное движение головки по принципу позиционирования «от точки к точке» с экстраполяцией формы измеряемой поверхности.

Позиционно-силовые методы более разнообразны. В отличие от позиционных методов определение координат производится измерительным устройством с определённой силой, что существенно повышает точность измерений. Различают безпоисковые и поисковые методы.

При дифференциальном методе сравнения с мерой используются устройства, формирующие сигнал, пропорциональный отклонению измерительного щупа относительно корпуса головки. При этом сравнение фактических координат детали с заданными производится либо в аналоговой форме с помощью элемента сравнения, либо программно на микропроцессоре.

В зависимости от принципа действия и конструкции, системы, использующие дифференциальный метод, разделяют на два класса: с управ-

ляемым наконечником (установка производится приводом одной из координат, например  $Z$ , с ограничением развиваемой силы) и с самоустанавливающимся наконечником (с грибовым механизмом возврата).

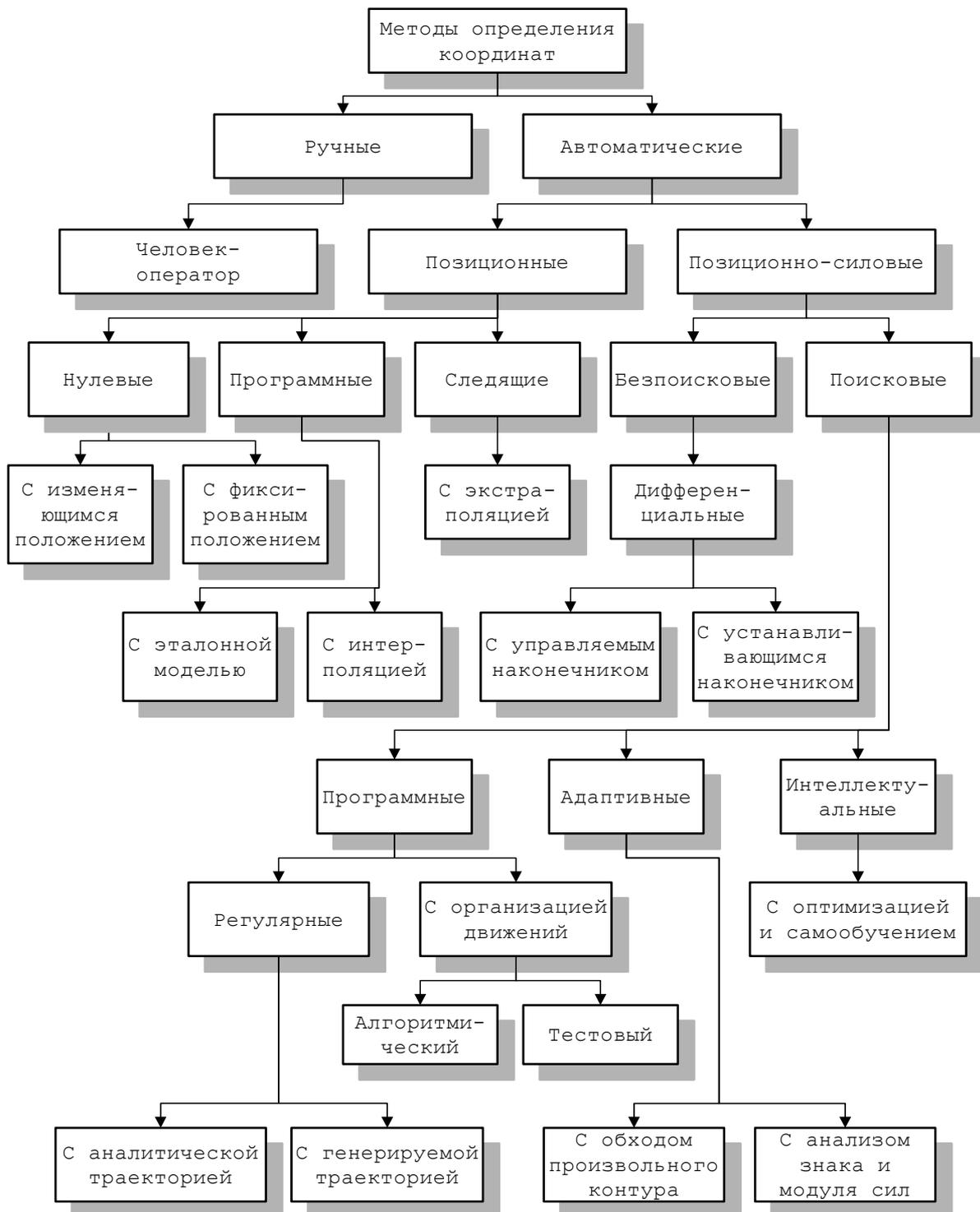


Рис. 2.9. Классификация методов определения координат ячеек

Поисковые методы включают в себя программные, адаптивные и интеллектуальные.

Программирование движений измерительной головки осуществляется в автоматическом режиме, при этом эталонная траектория измерительного наконечника задаётся аналитически или генерируется с помощью некоторого алгоритма. Отклонение реальной траектории движения от программной фиксируется и используется для определения истинных координат. При известных геометрических формах объекта эталонная траектория не задаётся, а организуются специальные движения. Так, метод усреднения величины максимального фактического отклонения осей сопрягаемых деталей предполагает поочерёдные по горизонтальным осям движения с целью определения отклонения осей схвата робота и отверстия и расчёта величины коррекции положения. Метод применим при большой разности между диаметрами объектов, так как «измерительной головкой» является сама деталь или схват манипулятора, либо предполагает использование измерительного щупа.

Метод определения координат с формированием поисковых движений предполагает использование либо объекта манипулирования, либо насадки-щупа. В этом методе на приводы координат подаются поочерёдно дополнительные сигналы формирования поисковых движений (в виде шагов  $X +$ ,  $X -$ ,  $Y +$ ,  $Y -$ , по сходящейся или расходящейся спирали, случайным образом и т.п.). В обоих случаях очевидно ограничение по прочностным характеристикам объекта.

Адаптивные поисковые методы предполагают широкое применение силомоментной информации при определении координат в режимах позиционно-силового управления приводами робота. В режиме обхода по контуру или поверхности форма её может быть заранее и неопределённая, а истинное положение координат вычисляется на основе анализа баланса сил взаимодействия между ИО и объектом.

Метод определения координат центра ячейки, использующий изменение знака и модуля сил, возникающих при контакте, реализуется с помощью установленной вместо рабочего инструмента конической насадки-щупа, на центральном стержне которой расположены датчики деформации. При установке конической насадки в отверстие базовой детали датчики деформации вырабатывают сигналы, по которым определяются координаты положения базовой детали. При работе привода подающей координаты в режиме управления силой измерительный конус «сползает» в центр отверстия. По окончании измерения информация с датчиков положения записывается в запоминающее устройство системы управления и используется для расчёта фактического расположения ячеек. Рассматри-

ваемый метод может применяться и при определении центров деталей типа «стержень» (ТВС). Для этого должна использоваться насадка-щуп в виде обратного (внутреннего) конуса.

Интеллектуальные методы определения координат могут использовать различные алгоритмы поиска из обширной базы данных, пополняемой в процессе работы, и оптимизировать программное движение исполнительного механизма с учётом геометрических, кинематических и динамических ограничений.

### 2.3. АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В группе позиционных методов наибольший интерес представляет нулевой метод определения координат. Алгоритм работы системы представлен на рис. 2.10. После отработки приводами горизонтального перемещения  $X, Y$  заданных в программе координат рабочей точки первой ячейки выбранного контейнера  $T_{k1} (x_{z1}, y_{z1})$  необходимо определить дополнительные координатные составляющие  $x_d$  и  $y_d$ , корректирующие положение схвата относительно центра ячейки контейнера. Приводу по координате  $Z$  сообщается дополнительное движение (формируется  $V_z$ ) в направлении сопряжения до первого контакта измерительной головки с ячейкой. При этом возможно срабатывание любого из четырёх датчиков  $\{K_{x1}, K_{x2}, K_{y1}, K_{y2}\}$  двухкоординатной «нулевой» головки. В момент контакта формируется импульсный сигнал, по которому фиксируется значение перемещения по координате  $z_i$  и устанавливается признак контакта – логический сигнал  $a_j = 1$ . Движение продолжается, головка смещается к центру отверстия.

Процесс прекращается после срабатывания всех четырёх датчиков, т.е. при выполнении условия  $\sum_j a_j = 4$ . В памяти системы фиксируются значения перемещения по оси  $Z$  в моменты контакта головки с ячейкой  $(z_{x1}, z_{x2}, z_{y1}, z_{y2})$ . МикроЭВМ системы решает геометрическую задачу расчёта величин  $x_d$  и  $y_d$ :

$$x_d = f(l, d_r, d_y, \Delta z_x), \quad y_d = f(l, d_r, d_x, \Delta z_y),$$

где  $l$  – длина плеча измерительной головки;  $d_r$  – диаметр головки;  $d_y$  – диаметр ячейки;  $\Delta z_x = z_{x2} - z_{x1}$ ,  $\Delta z_y = z_{y2} - z_{y1}$  – величины смещения по оси  $Z$  в интервале между моментами контакта пары датчиков по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

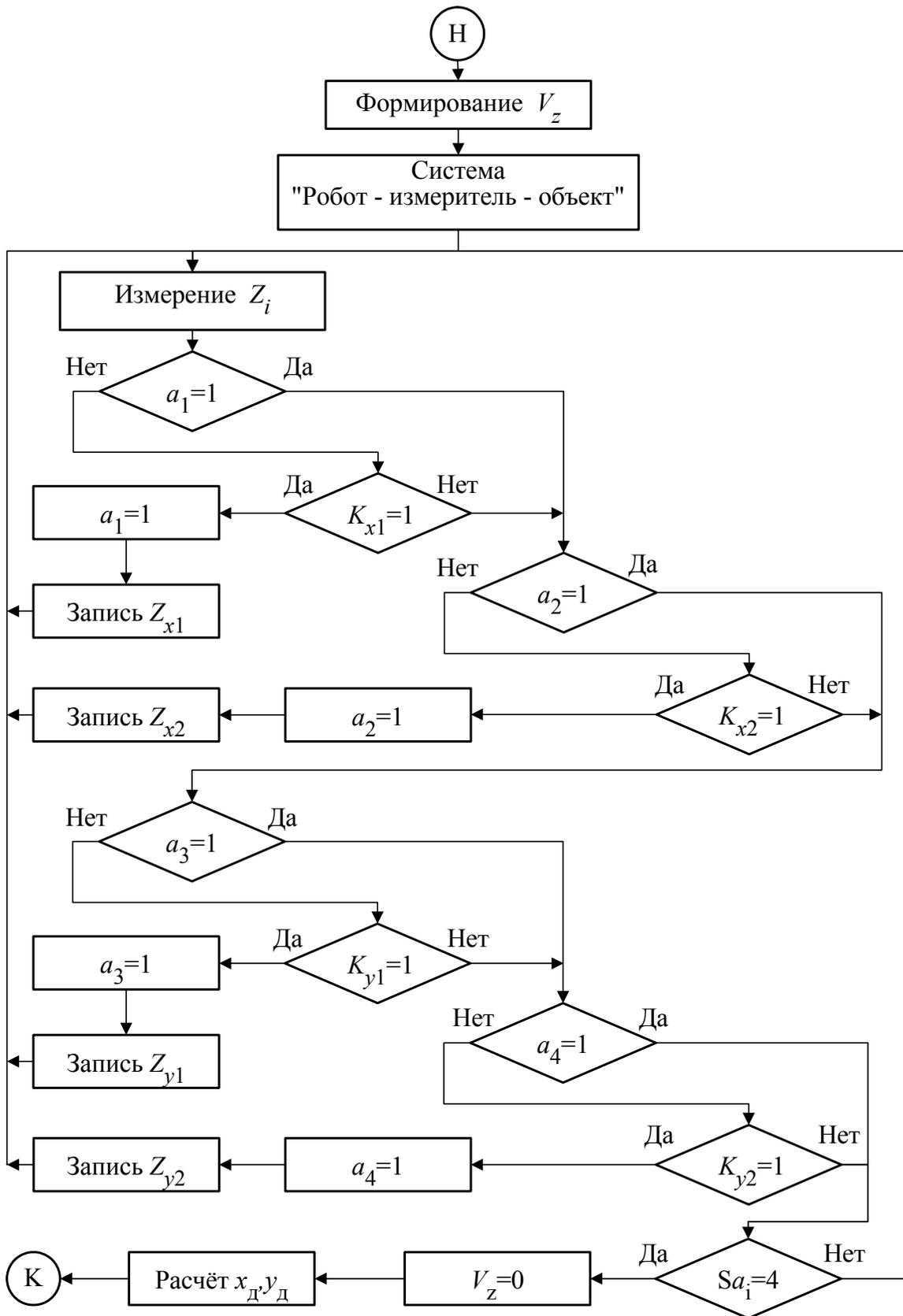


Рис. 2.10. Алгоритм определения координат нулевым методом

Позиционно-силовые системы при выполнении задачи определения координат используют информацию о силовых взаимодействиях, возникающих при несовпадении программных и фактических координат. В группе безпоисковых систем наибольший интерес представляют алгоритм работы и структура системы управления РТК, реализующая дифференциальный метод.

Использование позиционных методов определения координат требует применения программного или аппаратного специализированного вычислителя для расчёта дополнительных координатных перемещений. При дифференциальном методе используются дополнительные датчики положения, установленные в схвате робота или на специальном наконечнике, прямо определяющие рассогласование осей схвата и ячейки. Алгоритм определения координат дифференциальным методом представлен на рис. 2.11. Система оснащается дифференциальной измерительной головкой и должна иметь дополнительный датчик силы по координате  $Z$ .

После выхода системы в программно-заданную точку  $T_{ki}(x_{zi}, y_{zi})$  движение по оси  $Z$  выполняется до момента контакта головки с контейнером, после чего привод  $Z$  переключается с позиционной на силовую структуру с ограничением величины силы. В момент появления силы  $P_z$  система запоминает начальное значение кода с дополнительных датчиков  $x_{д0}, y_{д0}$  и как бы вдавливая измерительную головку в отверстие ячейки.

Процесс выполняется с постоянным анализом силы и координатных приращений

$$\begin{cases} \Delta x_{д} = x_{ди+1} - x_{ди}, \\ \Delta y_{д} = y_{ди+1} - y_{ди} \end{cases}$$

и прекращается при достижении заданного значения силы контакта или при условии неприращения координатных импульсов с дополнительных датчиков за период опроса. При этом логическая функция

$$F(\Delta P_z, \Delta x_{д}, \Delta y_{д}) = 1.$$

Значения  $\Delta x_{д}$  и  $\Delta y_{д}$  добавляются к заданным  $x_3, y_3$  и определяют новое положение оси схвата, а также запоминаются системой программного управления для коррекции координат программной точки. Коррекция возможна, если измеренное приращение превышает величину единицы дискретности  $\delta$  перемещения.

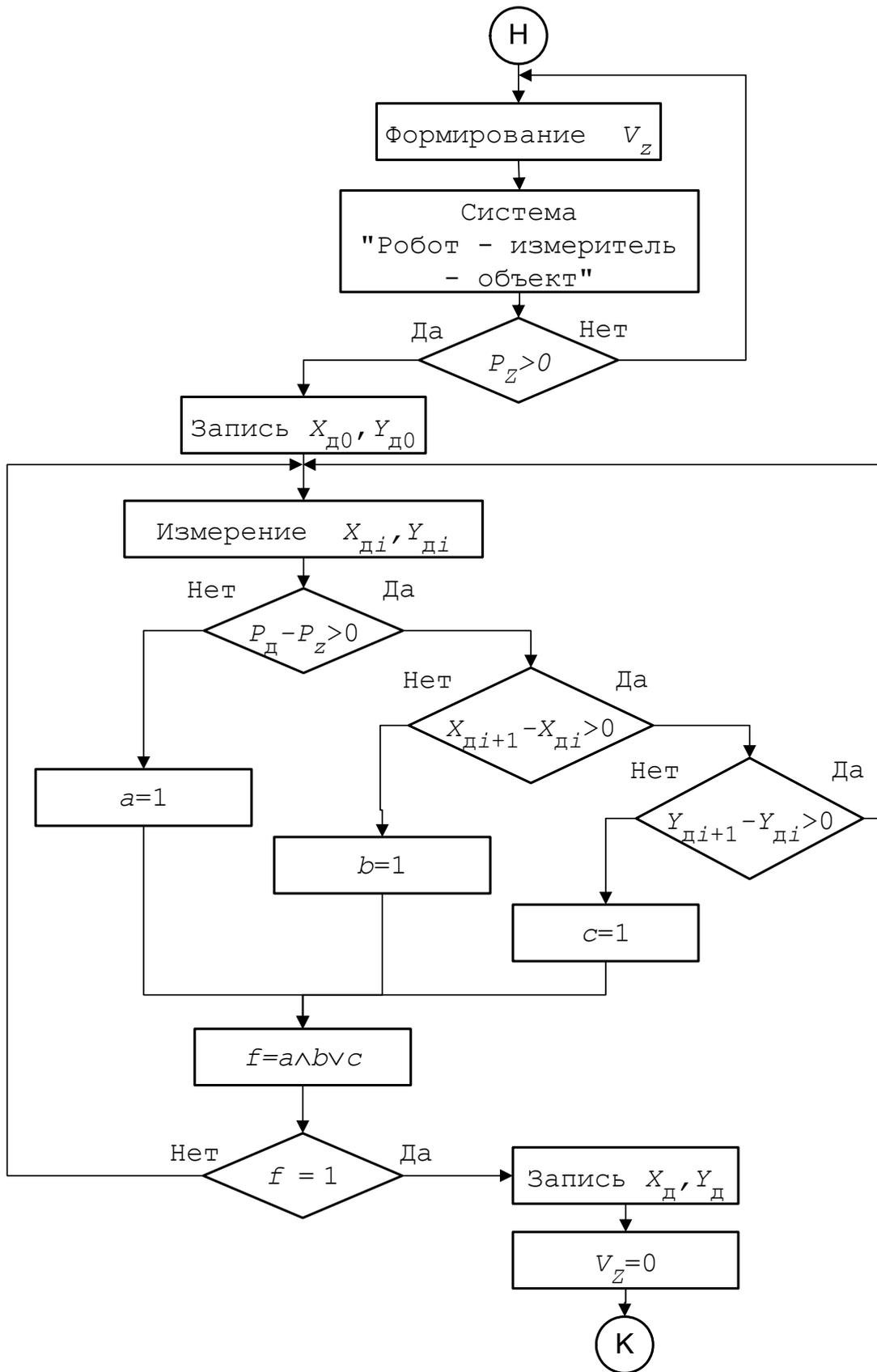


Рис. 2.11. Алгоритм определения координат дифференциальным методом

При определении координат с организацией движений в группе поисковых программных методов для определения центров ячеек возможно применение алгоритмического метода усреднения. Определим алгоритмы работы и структуру системы управления РТК, реализующую этот метод. Метод усреднения, рассмотренный для сборочных операций с деталями типа «вал – втулка» в работе [30], предполагает использование в качестве измерителя одной из деталей узла «вал – втулка».

В применении этого метода для определения центра ячейки контейнера сделаем следующие допущения: перекоп ТВС не превышает угол заклинивания, кинематические звенья приводов ИУ робота жесткие, упругие деформации малы по сравнению с величиной гарантированного зазора.

Движения ТВС, расположенной в кессоне робота, показаны на рис. 2.12. На первом шаге определения сообщается перемещение по оси  $Z$  вниз до контакта деталей (рис. 2.12, *а*). В наихудшем случае имеет место несовпадение осей стержня  $x_3, y_3$  и ячейки контейнера  $x_k, y_k$  на величины  $x_d$  и  $y_d$ , превышающие гарантированный зазор  $\delta$ . Несовпадение центра горизонтальных осей может располагаться в любом из четырех квадрантов плоскости  $X_0O_0Y_0$ .

Задача состоит в организации перемещений стержня в схвате робота с целью точного определения координат  $x_k, y_k$  с отклонением  $\delta_c \leq \delta$ , для чего необходимо измерить фактическое отклонение оси  $Z$  в плоскости контакта  $x_d, y_d$  и затем совместить оси сопрягаемых деталей. Движение начинается перемещением по одной из горизонтальных координат (например  $X$ ) в направлении свободного хода до другого крайнего положения с одновременным измерением расстояния (рис. 2.12, *б*).

Крайнее положение фиксируется по появлению контактной силы. В результате осуществляется перемещение на величину  $-2\Delta x$ , где  $\Delta x$  – отклонение центров координат по оси  $X$  при существующем в данный момент положении осей  $Y$  и  $Z$ . Затем привод реверсируется и в следящем режиме отрабатывает половину величины измеренного расстояния, совмещая тем самым горизонтальные оси  $Y$  стержня и ячейки. Затем сообщается перемещение по вертикальной оси, и в случае несовпадения осей будет контакт и останов привода по оси  $Z$  (рис. 2.12, *в*). Аналогичная процедура повторяется по оси  $Y$  с перемещением на величину  $\Delta y$ , совмещая оси  $X$  (рис. 2.12, *г*). Затем опять сообщается перемещение по оси  $Z$  до следующе-

го контакта деталей. При каждом контакте деталей процедура совмещения горизонтальных осей повторяется. Процесс заканчивается при перемещении по оси  $Z$  на требуемую величину  $Z_{\Gamma}$ , что и будет означать совмещение осей схвата робота и ячейки контейнера, т.е.  $\Delta x = x_{\text{д}}$ ,  $\Delta y = y_{\text{д}}$ . При выполнении аналитически-поисковых движений автоматически учитываются люфты и упругие деформации механической передачи.

Управление для типового движения по горизонтальной координате, например  $X$  (контакт, перемещение в направлении свободного хода с измерением, реверс с перемещением на величину измеренного расстояния), описывается системой уравнений с логическими условиями.

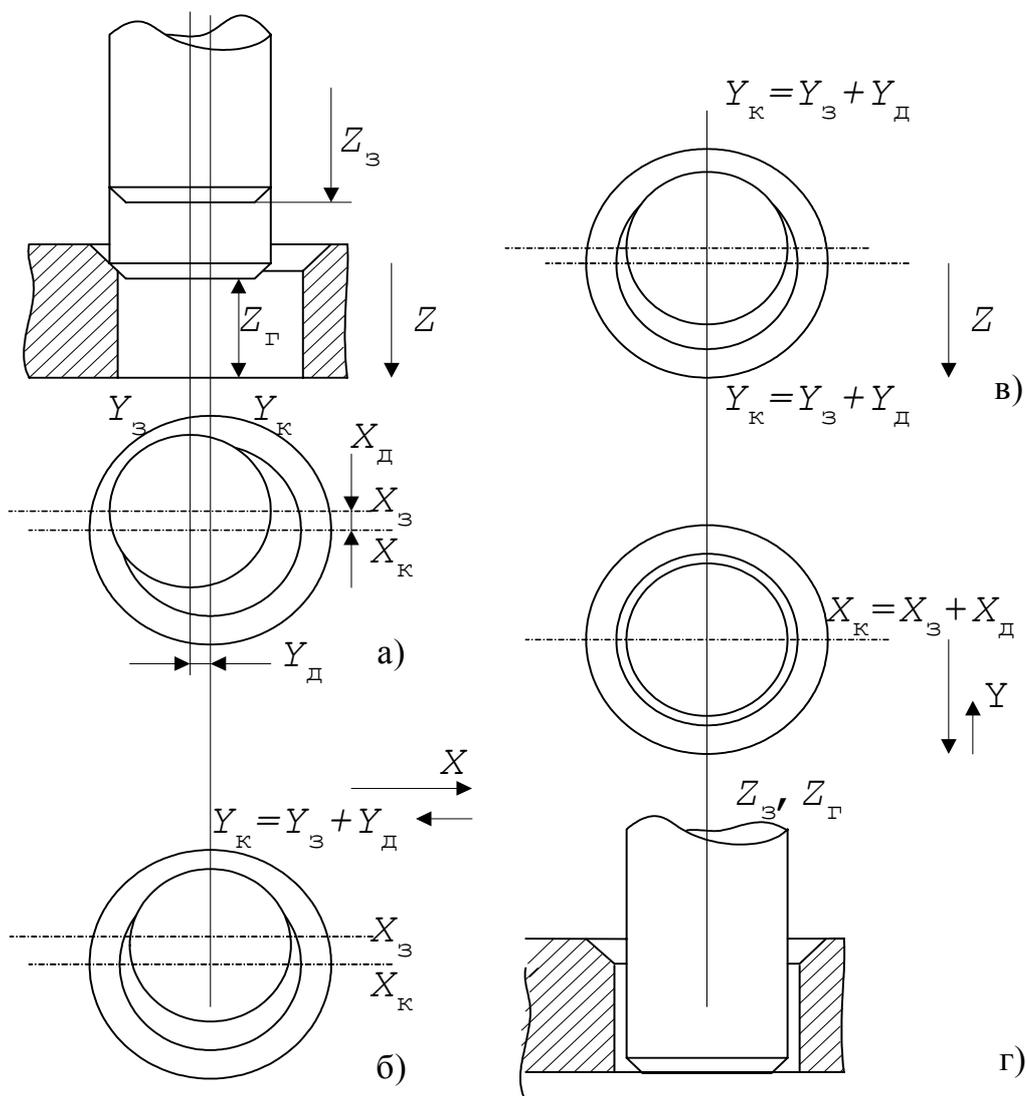


Рис. 2.12. Движения ТВС при определении центра ячейки

*Прямое движение:*

$$G_x = \begin{cases} U_0 \wedge \Phi_{V_x}(p) & \forall \operatorname{sgn} P_{x1} = 1; \\ -U_0 \wedge \Phi_{V_x}(p) & \forall \operatorname{sgn} P_{x2} = 1; \\ 0 & \forall (\operatorname{sgn} P_{x1} \vee \operatorname{sgn} P_{x2}) = 1 \wedge t = t_2. \end{cases}$$

$$\Delta G_x = x_2 - x_1,$$

где

$$\operatorname{sgn} P_{x1} = \begin{cases} 1 \forall (|P_x| \geq |P_{x0}| \wedge P_x) > 0 & \forall t = t_1; \\ 0 \forall P_x < 0 & \forall t = t_1; \end{cases} \quad \operatorname{sgn} P_{x2} = \begin{cases} 1 \forall (|P_x| \geq |P_{x0}| \wedge P_x) < 0 & \forall t = t_1; \\ 0 \forall P_x > 0 & \forall t = t_1; \end{cases}$$

$\Phi_{V_x}(p)$  – передаточная функция привода, замкнутого по скорости;  $P_x$  и  $P_{x0}$  – реакции сил соответственно текущая и граничная;  $t_1$  и  $t_2$  – текущее время начала и конца прямого хода;  $\Delta G_x$  – измеренная ошибка на участке перемещения от  $x(t_1)$  до  $x(t_2)$ .

*Обратное движение:*

$$G_x = \frac{\Delta G_x}{2} \wedge \Phi = \Phi_{G_x}(p).$$

где  $\Phi_{G_x}(p)$  – передаточная функция привода, замкнутого по положению.

Алгоритм определения центра ячейки по методу усреднения приведён на рис. 2.13, где приняты следующие обозначения:  $z_i$  – текущее значение координаты по оси  $Z$ ;  $\delta$  – величина гарантированного зазора;  $\delta_0$  – единица дискреты перемещения;  $P_z$ ,  $P_d$  – соответственно текущие и допустимые значения сил;  $z_r$  – величина гарантированного для точного определения центра перемещения по оси  $Z$ .

Рассмотрим метод определения координат, формирующий поисковые движения при нахождении центра ячейки. Метод предполагает использование либо объекта манипулирования, либо насадки-щупа при выполнении операций; система управления должна быть оснащена датчиками сил по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Суть метода заключается в следующем: при несовпадении фактических и программно-заданных координат точки  $T_{ki}$  движение по оси  $Z$  возможно до контакта с поверхностью контейнера, после чего на приводы координат  $X$  и  $Y$  подаются поочерёдно дополнительные сигналы формирования поисковых движений в последовательности  $X+$ ,  $X-$ ,  $Y+$ ,  $Y-$ . Командой на переключение является появление сигнала с любого из датчиков силы по осям  $X$  или  $Y$ . Признаком определения центра является нулевое значение силы с датчика по оси  $Z$ , после чего система управления записывает значения датчиков положения по осям координат в качестве истинных координат программной точки и возвращает схват по оси  $Z$  в исходную точку.

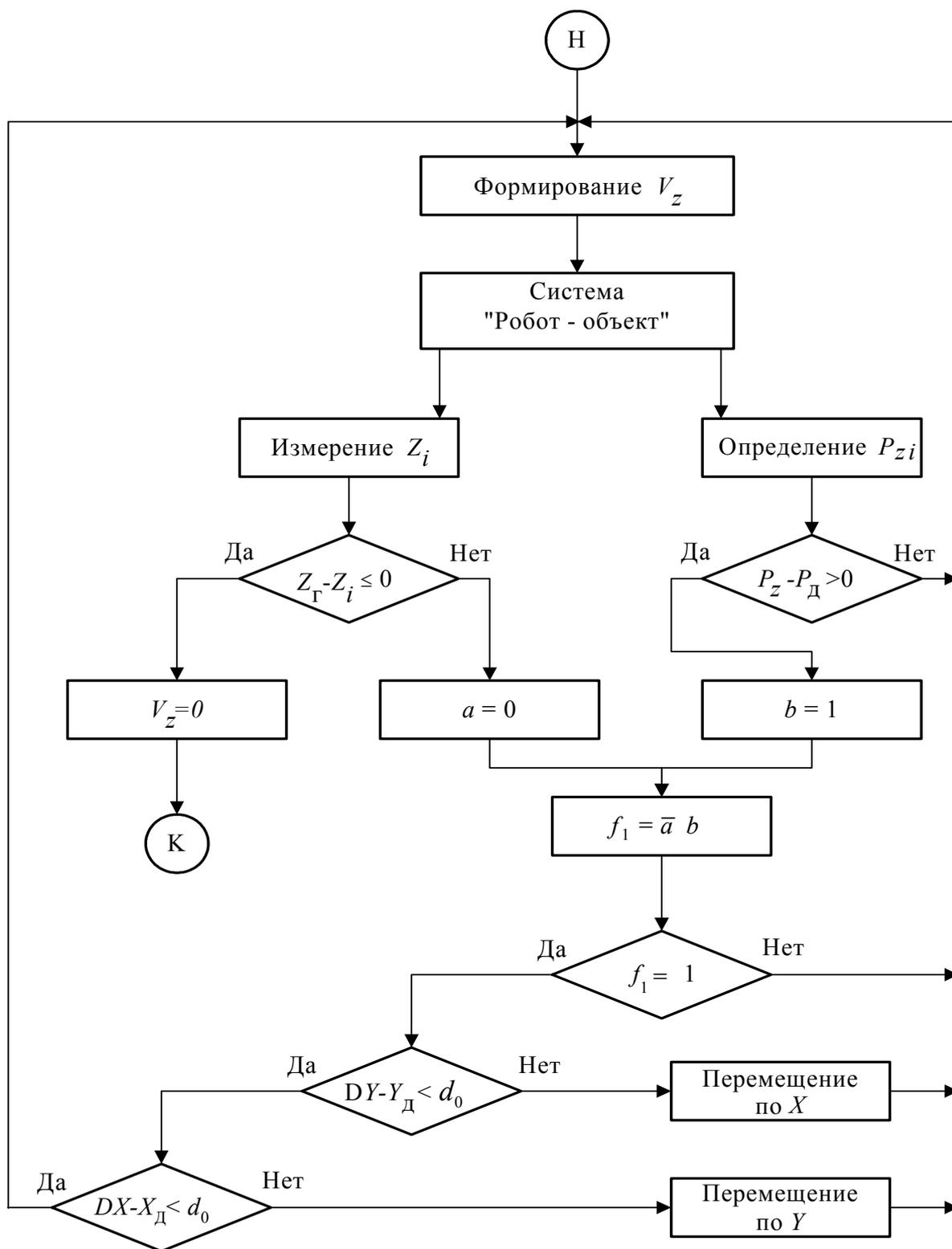


Рис. 2.13. Алгоритм определения центра ячейки по методу усреднения

На рис. 2.14 приведён алгоритм управления системой приводов робота с организацией поисковых движений. Последовательность включения поисковых движений определяется кольцевым счётчиком  $N$  контактных сил, по состоянию которого вырабатываются команды переключения движений  $K(1) \dots K(4)$ .

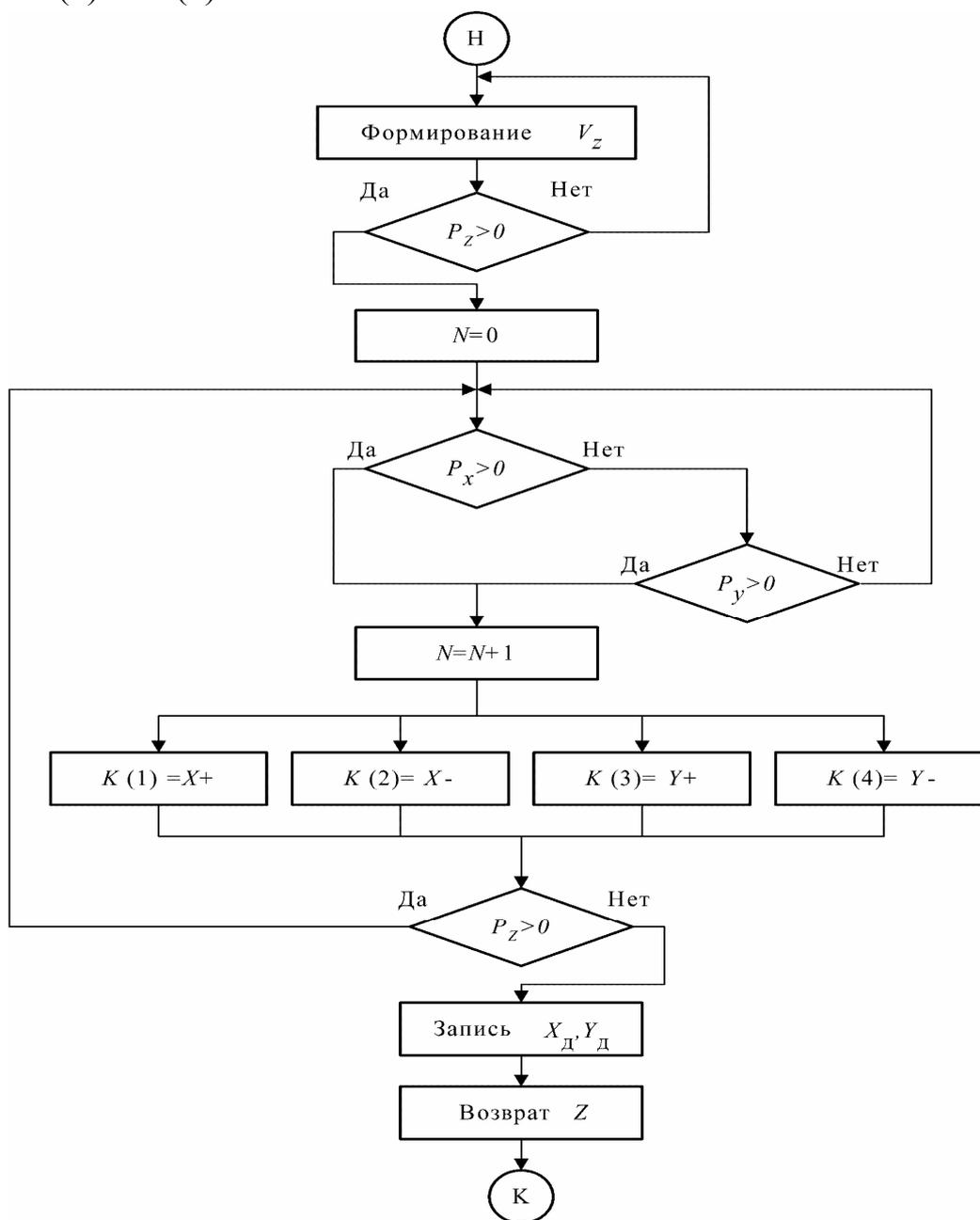


Рис. 2.14. Алгоритм определения координат с организацией поисковых движений

Поисковые движения прекращаются при условии  $P_z = 0$ . Адаптивный поисковый метод определения координат центра ячейки, использующий

измерение знака и модуля сил, возникающих при контакте, реализуется с помощью установленной в схват вместо рабочего инструмента конической насадки-шупа, на центральном стержне которой расположены датчики деформации (рис. 2.15). На основе этого метода разработано устройство управления сборочным роботом.

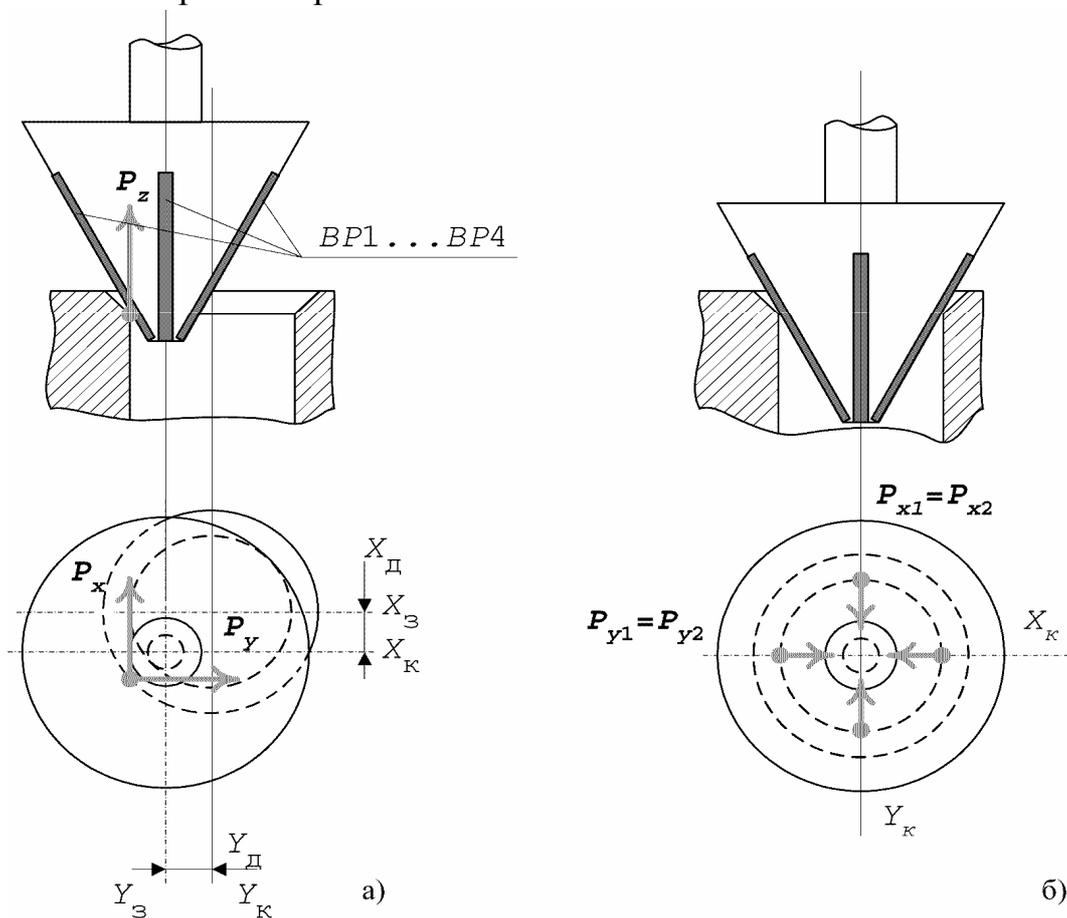


Рис. 2.15. Движения измерительного конуса при определении координат центра ячейки

Датчики деформации  $BP1 \dots BP4$ , расположенные на измерительном конусе, сориентированы вдоль осей  $X$  и  $Y$  системы координат технологического робота. Деформация  $\Delta X_i$  и  $\Delta Y_i$  линейно зависит от реакции сил по осям. При контакте измерительного конуса с деталью сигнал с датчика силы  $ДС_z$  переключает привод  $Z$  в режим управления силой, обеспечивая постоянный контакт конуса с деталью, а приводы по координатам  $X$  и  $Y$  – на режим управления по информации с датчиков деформации. Силы  $P_x$  и  $P_y$ , возникающие в точке контакта и обусловленные неравенствами  $x_3 \neq x_К$ ,  $y_3 \neq y_К$  (рис. 2.15, а), приводят к перемещению схвата робота в направлении  $P_{x1} = P_{x2}$ ,  $P_{y1} = P_{y2}$ . При таком управлении измерительный конус как бы

«сползает» в центр отверстия (рис. 2.15, б), а величины дополнительных перемещений  $x_d, y_d$  и определяют искомые координаты центра отверстия.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.16. В ней выделены: логическое переключающее устройство, программно реализованное в управляющей микроЭВМ, приводы по координатам  $X, Y, Z$  с передаточными функциями по положению  $W$  и моменту  $V$ , кинематическая система и измерительный конус.

Алгоритм работы системы описывается следующей системой уравнений:

$$U_x = \begin{cases} (x_3 - x_i) & \forall \Delta X_i = 0, \\ K(\Delta X_2 - \Delta X_1) & \forall \Delta X_i \neq 0; \end{cases} \quad U_y = \begin{cases} (y_3 - y_i) & \forall \Delta Y_i = 0, \\ K(\Delta Y_2 - \Delta Y_1) & \forall \Delta Y_i \neq 0; \end{cases}$$

$$U_z = \begin{cases} (z_3 - z_i) & \forall \Delta X_i = 0 \wedge \Delta Y_i = 0, \\ (P_z - P_d) & \forall \Delta X_i \neq 0 \vee \Delta Y_i \neq 0, \end{cases}$$

где  $x_3, y_3, z_3$  – координаты программно-заданной точки  $T_{ki}(x_{3i}, y_{3i}, z_{3i})$ ,  $P_z = Kf(\Delta X + \Delta Y)$ .

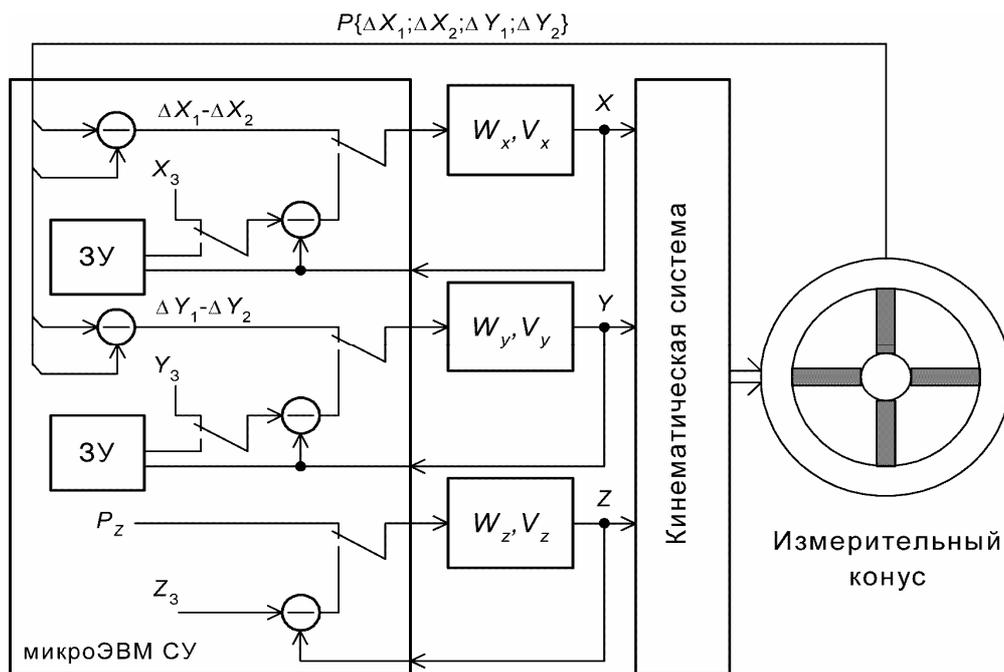


Рис. 2.16. Структура системы управления

Данный алгоритм представлен на рис. 2.17. Он содержит три параллельные ветви измерения сил по координатным осям. При этом логическая функция  $f_1$  определяет ограничение развиваемой силы по оси  $Z$ , а функции  $f_2$  и  $f_3$  – условия фиксации конуса в отверстии ячейки.

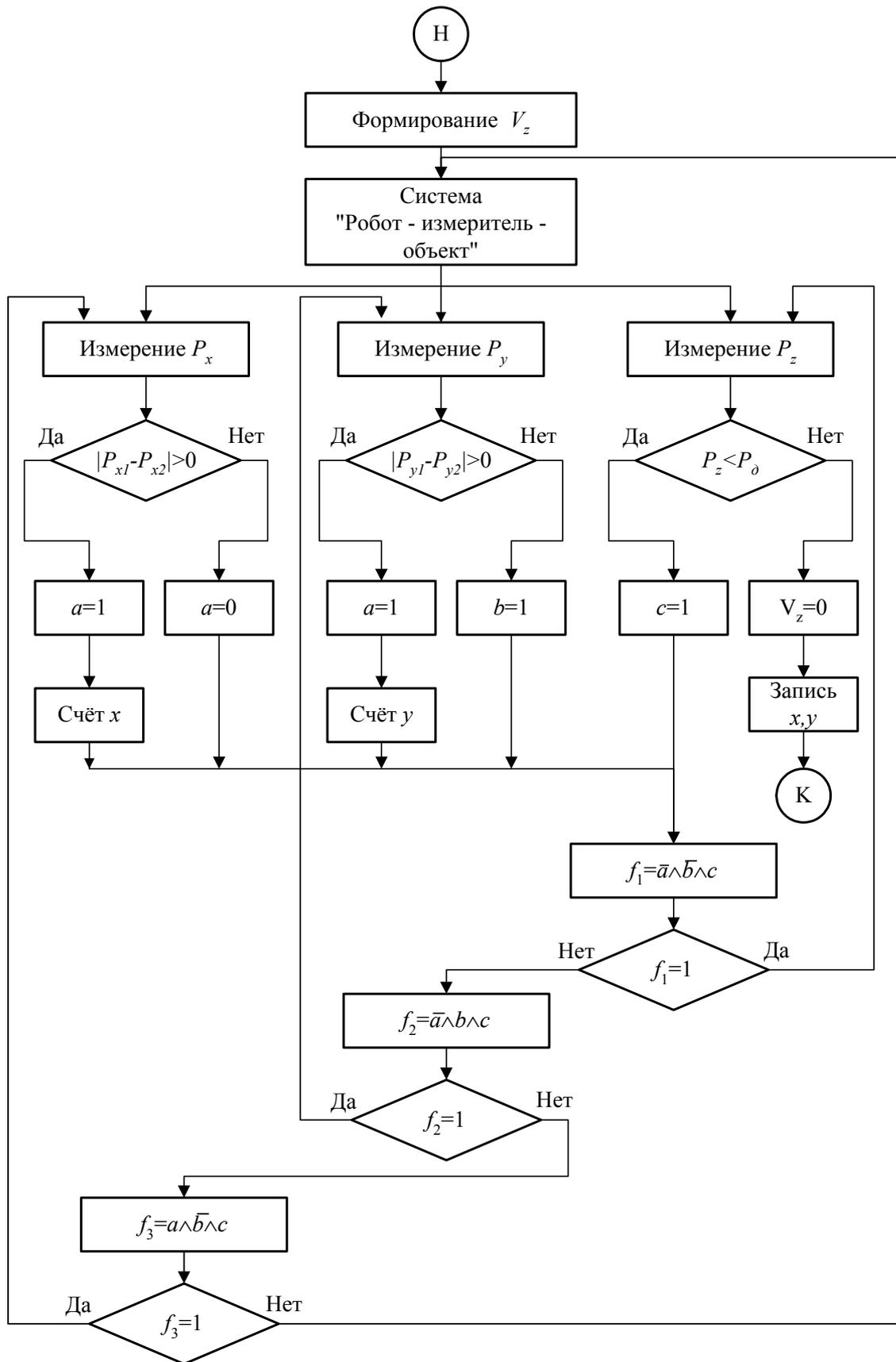


Рис. 2.17. Алгоритм определения координат измерительным конусом

Сигнал разрешения записи данных  $x_d$  и  $y_d$  формируется в виде:

$$U_{\text{зап}} = \begin{cases} 0 & \forall \Delta X_1 \neq \Delta X_2 \wedge \forall \Delta Y_1 \neq \Delta Y_2 \\ 1 & \forall \Delta X_1 = \Delta X_2 \wedge \Delta Y_1 = \Delta Y_2 \end{cases}$$

Алгоритмы управления приводами по осям  $X$  и  $Y$  идентичны. Блок-схема алгоритма для движения по координате  $X$  приведена на рис. 2.18. В зависимости от знака  $\Delta P$  задаётся направление сигнала скорости  $V_x$ , а запись  $x_d$  производится в момент  $P_{x1} = P_{x2}$ .

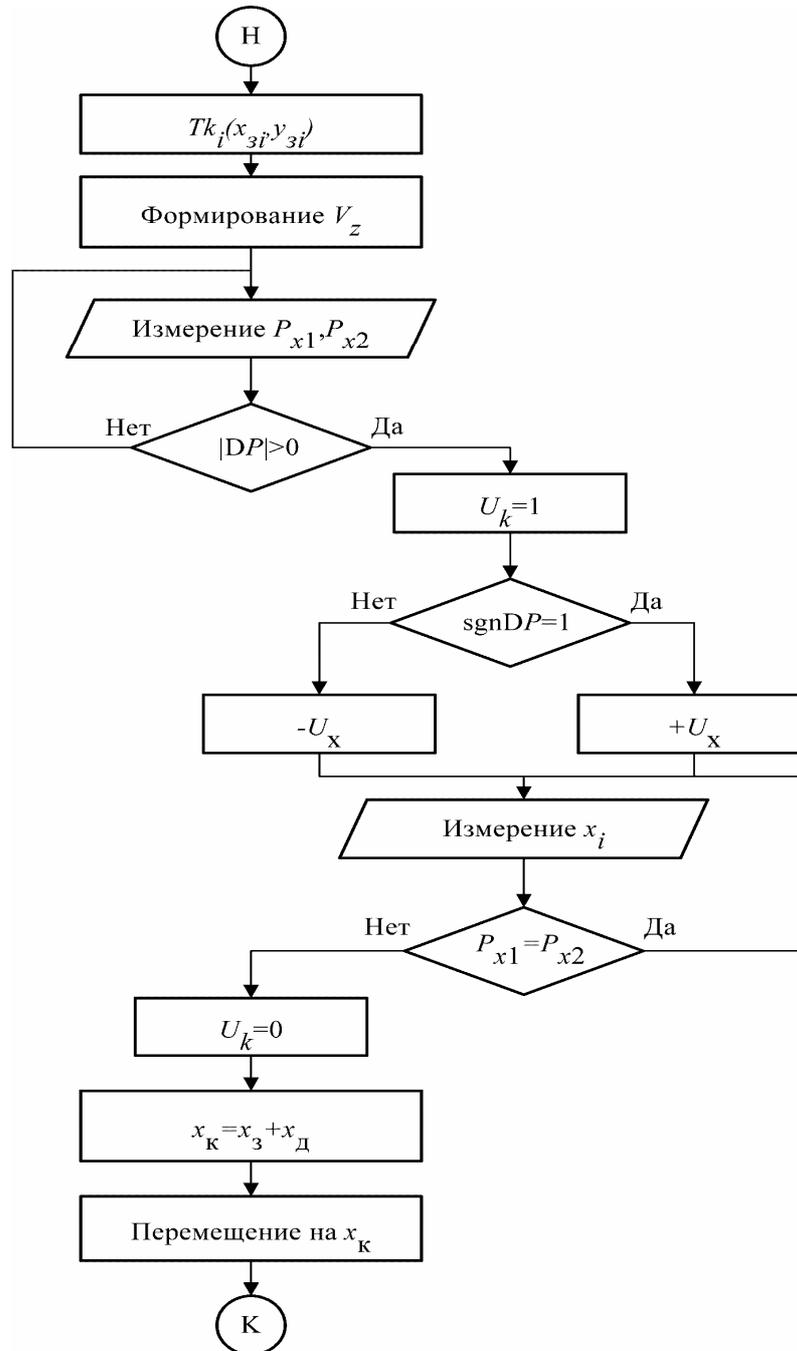


Рис. 2.18. Алгоритм управления работой привода РТК по оси  $X$

## 2.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Вопросам построения математической модели сборочного процесса посвящены работы М. Вукобратовича, В.И. Солнцева, А.А. Бурцева, Т.Н. Балакиревой, Л.Б. Черняховской, Ф.М. Кулакова, П.Б. Слиде и других авторов.

Сборочный процесс является объектом управления промышленного робота. Исходя из этого очевидно, что управляющими воздействиями или входными величинами сборочного процесса как объекта управления являются регулируемые величины или выходные координаты сборочного робота, а именно координаты положения  $\bar{q}$  и скорости  $\dot{\bar{q}}$  рабочего органа. Управляемой координатой или выходной величиной сборочного процесса является вектор сил и моментов  $\bar{F}$ , возникающий при сопряжении деталей в результате появления геометрических связей собираемых компонент.

Кроме того, входными величинами сборочного процесса являются координаты положения базовой детали  $\bar{q}_6$ . Величина  $\bar{q}_6$  является постоянной, если базовая деталь находится на неподвижном основании, и меняется в процессе сборки, если базовая деталь находится на активном сборочном столе. Изменение скоростей движения робота и сборочного стола приводит к непостоянству коэффициента трения  $f_{тр}$  между собираемыми деталями.

Таким образом, выходная координата  $\bar{F}$  сборочного процесса является сложной функцией, зависящей от многих параметров, возникающих в результате действия геометрических связей:

$$\bar{F} = \bar{F}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}, \bar{q}_6, \dot{\bar{q}}_6, f_{тр}).$$

Структурную схему модели сборочного процесса можно представить схемой, изображенной на рис. 2.19.

При составлении математической модели необходимо определить уравнения геометрических связей и уравнения силовых взаимодействий собираемых деталей.

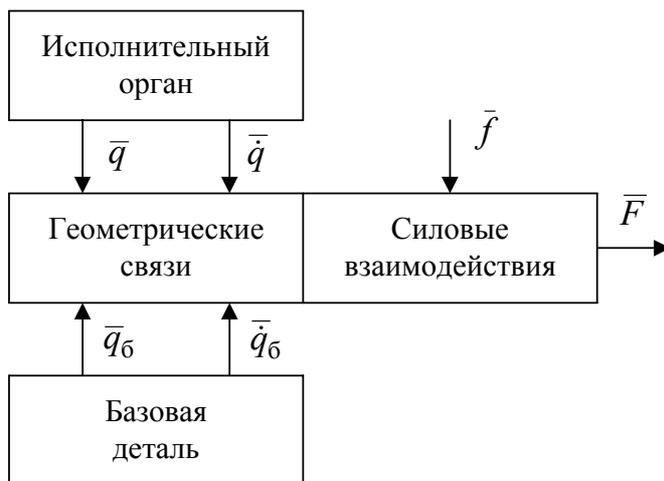


Рис. 2.19. Структурная схема модели сборочного процесса

## Геометрические связи при сопряжении деталей типа «вал – втулка»

Если рассмотреть на плоскости прямую линию, описанную уравнением вида

$$X \cos \alpha + Z \sin \alpha - R = 0,$$

и точку  $P$  с координатами  $X_p, Z_p$  (рис. 2.20), то очевидно, что расстояние от точки до прямой определяется выражением

$$D = X_p \cos \alpha + Z_p \sin \alpha - R.$$

Если точка  $P$  и начало координат  $O$  лежат по разные стороны от прямой, то  $D > 0$ , и если по одну сторону, то  $D < 0$ .

Если предположить, что движение точки  $P$  происходит из начала координат, то при  $D < 0$  взаимодействия с прямой не произойдет. При достижении  $D = 0$  и далее при  $D > 0$  возникает деформация прямой и сила реакции  $N$  пропорциональна величине деформации, т.е.  $N = -CD$ , где  $C$  – коэффициент жесткости.

На основании этих положений определим геометрические условия, при которых возникают силовые взаимодействия собираемых деталей. Для плоской задачи положение вала и втулки с отверстием показано на рис. 2.21. Система координат  $XOZ$  связана с базовой деталью, расположенной на сборочном столе. Координаты  $X_0, Z_0$  точки  $O_6$  базовой детали и угол определяют погрешность установки ее на сборочном столе. В идеальном случае, т.е. когда погрешность базирования равна нулю, точка  $O_6$  совпадает с началом координат  $XOZ$ , а ось симметрии базовой детали (втулки) – с осью  $OZ$ .

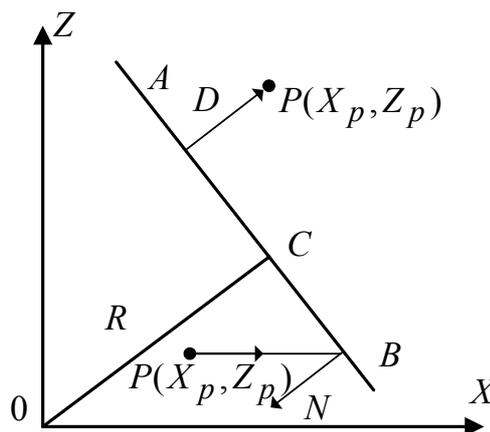


Рис. 2.20. Взаимное расположение прямой и точки

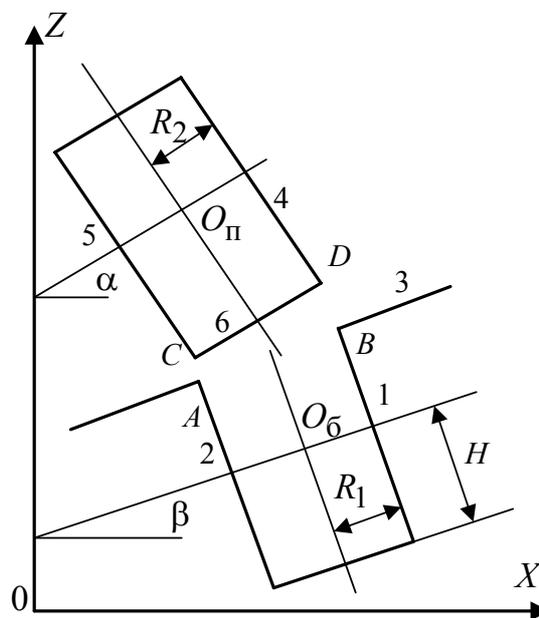


Рис. 2.21. Взаимное расположение вала и втулки

Координаты  $X_n, Z_n$  точки  $O_n$  и угол  $\alpha$  – координаты вала, которые являются выходными координатами сборочного робота. При введении вала в отверстие может произойти контакт между точками  $A, B, C, D$  и линиями, обозначенными на рис. 2.21 цифрами 1...6. Уравнения точек и линий записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 A: \quad & X_a = X_0 + H \sin \beta + R_1 \cos \beta; \quad Z_a = Z_0 - H \cos \beta + R_1 \sin \beta; \\
 B: \quad & X_b = X_0 + H \sin \beta - R_1 \cos \beta; \quad Z_b = Z_0 - H \cos \beta - R_1 \sin \beta; \\
 C: \quad & X_c = X_n + H \sin \alpha + R_2 \cos \alpha; \quad Z_c = Z_n + H \cos \alpha + R_2 \sin \alpha; \\
 D: \quad & X_d = X_n - H \sin \alpha - R_2 \cos \alpha; \quad Z_d = Z_n + H \cos \alpha - R_2 \sin \alpha; \\
 1: \quad & (X - X_0) \cos \beta + (Z - Z_0) \sin \beta + R_1 = 0; \\
 2: \quad & (X - X_0) \cos \beta + (Z - Z_0) \sin \beta - R_1 = 0; \\
 3: \quad & (Z - Z_0) \cos \beta - (X - X_0) \sin \beta + H = 0; \\
 4: \quad & (X - X_n) \cos \alpha + (Z - Z_n) \sin \alpha + R_2 = 0; \\
 5: \quad & (X - X_n) \cos \alpha + (Z - Z_n) \sin \alpha - R_2 = 0; \\
 6: \quad & (Z - Z_n) \cos \alpha - (X - X_n) \sin \alpha - H = 0,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где  $R_1, R_2$  – радиус отверстия втулки и радиус вала;  $H$  – половина длины вала.

На основании анализа операции сборки деталей можно в зависимости от угла взаимного перекоса деталей выделить два случая, при которых возникают силовые взаимодействия.

*Первый случай.* Угол взаимного перекоса  $\nu = \alpha - \beta > 0$ .

Здесь возможны четыре типа контактных ситуаций.

1. Взаимодействие точки  $C$  с линией 3, причем нормальная сила реакции возникает при  $D_1 > 0$ .

2. Взаимодействие точки  $B$  с линией 6 при  $D_2 < 0$ .

3. Взаимодействие точки  $A$  с линией 5 при  $D_3 < 0$ .

4. Взаимодействие точки  $D$  с линией 1 при  $D_4 < 0$ .

*Второй случай.* Угол взаимного перекоса  $\nu = \alpha - \beta < 0$ .

Здесь также возможны четыре типа контакта.

5. Взаимодействие точки  $D$  с линией 3, причем нормальная сила реакции возникает при  $D_5 > 0$ .

6. Взаимодействие точки  $A$  с линией 6 при  $D_6 < 0$ .

7. Взаимодействие точки  $B$  с линией 4 при  $D_7 > 0$ .

8. Взаимодействие точки  $C$  с линией 2 при  $D_8 > 0$ .

Величина нормальной силы  $N_i$ , возникающей при точечном контакте, для каждой из восьми ситуаций определяется в виде:  $N_i = -CD_i$ , при  $i = 1 \dots 8$ , где  $C$  – жесткость собираемых деталей в этом выражении необходимо учитывать знак  $D_i$ :

$$N_i = -\text{sgn}(i)CD_i, \quad (2.2)$$

где  $\text{sgn}(i) = [10001011]^T$  для  $D_i > 0$ ;  $\text{sgn}(i) = [01110100]^T$  для  $D_i < 0$ .

Величина  $D_i$  определяется подстановкой координат точек  $A, B, C, D$  в уравнения линий (2.1). Например, для ситуации 1 (взаимодействие точки  $C$  с линией 3) величина деформации определяется выражением

$$D_1 = (Z_n + H \cos \alpha + R_2 \sin \alpha - Z_0) \cos \beta - (X_n - H \sin \alpha + R_2 \cos \alpha - X_0) \sin \beta + H.$$

Нормальная сила реакции  $N_1 = -1 \cdot CD_1$ .

Аналогично определяются величины деформаций и силы реакции  $N_i$  для остальных контактных ситуаций. Эти уравнения записаны для деталей, расположенных в плоскости  $XOZ$ ; аналогичные уравнения составляются и для плоскости  $YOZ$ .

### **Силовые взаимодействия собираемых деталей**

Определив значение нормальной силы  $N_i$  на основании геометрических связей, возникающих при сборке деталей типа «вал – втулка», необходимо решить задачу разложения силы реакции  $N_i$  по координатным осям с учетом сил трения для каждой сборочной ситуации. Анализ операции сборки деталей типа «вал – втулка» позволяет выделить 6 классов сборочных ситуаций для  $\nu > 0$  и 6 классов для  $\nu < 0$ .

Составим уравнения сил и моментов для каждой сборочной ситуации с учетом, что величина  $N_i$  определяется выражением (2.2). Кроме сил, действующих по координатным осям, определим также значение моментов  $M_{o6}$  и  $M_{on}$ , действующих вокруг центра  $O_6$  базовой детали (втулки) и вокруг центра  $O_n$  перемещаемой детали (вала).

Первая сборочная ситуация описывается уравнениями:

$$1. \quad F_{1X} = N_1 f;$$

$$F_{1Z} = N_1;$$

$$M_{1o6} = N_1(H(f + \nu) - (R_2 + \Delta X));$$

$$M_{1on} = N_1(H(\nu - f) - R_2(1 + f\nu)),$$

где  $\nu$  – угол взаимного перекоса собираемых деталей или ошибка позиционирования по координате вращательного движения;  $\Delta X$  – относитель-

ное смещение собираемых деталей или ошибка позиционирования по координате  $X$ .

Аналогично запишем уравнения для остальных сборочных ситуаций.

$$2. F_{2X} = N_2 v + N_2 f;$$

$$F_{2Z} = N_2 - N_2 f v;$$

$$M_{2об} = N_2(H(f + v) + R_1(1 - f v));$$

$$M_{2оп} = N_2(R_1 - fH - \Delta X).$$

$$3. F_{3X} = N_2(v + f) + N_3(fv - 1);$$

$$F_{3Z} = N_2(1 - fv) + N_3(f + v);$$

$$M_{3об} = N_2(H(f + v) + R_1(1 - fv)) + N_3(H(fv - 1) - R_1(f + v));$$

$$M_{3оп} = N_2(2R_1 - R_2 - fH) + N_3(H - 2R_1v - fR_2).$$

$$4. F_{4X} = N_3fv - N_3;$$

$$F_{4Z} = N_3f + N_3v;$$

$$M_{4об} = N_3(H(fv - 1) - R_1(f + v));$$

$$M_{4оп} = N_3((R_2 - R_1 - \Delta X)/v - fR_2).$$

$$5. F_{5X} = N_4;$$

$$F_{5Z} = N_4f;$$

$$M_{5об} = N_4(fR_1 + vR_2 + \Delta Z - H);$$

$$M_{5оп} = N_4(R_2(f + v) + H(fv - 1)).$$

$$6. F_{6X} = N_3(fv - 1) + N_4;$$

$$F_{6Z} = N_3(f + v) + N_4f;$$

$$M_{6об} = N_3(H(fv - 1) - R_1(f + v)) + N_4(H + fR_1 + 2(R_2 - R_1)/v);$$

$$M_{6оп} = N_3(H - 2R_2v + 2(R_2 - R_1)/v - fR_2) + N_4(R_2(f + v) + H(fv - 1)).$$

Здесь  $N_i f = F_{\text{тр}i}$  – сила трения;  $\Delta Z$  – относительное смещение центров собираемых деталей.

Ввиду того, что в реальных сборочных процессах угол взаимного перекоса величина достаточно малая и не превышает  $4 - 5^\circ$ , в полученных уравнениях сделаны следующие допущения:  $\sin v = v$ ,  $\cos v = 1$ .

Уравнения сил и моментов в матричной форме имеют вид:

$$\bar{F}_i = \sum_{j=1}^4 \bar{B}_i N_j, \quad (2.3)$$

где  $\bar{F}_i$  – вектор-столбец,  $\bar{F}_i = \{F_{xi}, F_{zi}, M_{оби}, M_{опи}\}^T$ ;  $i = 1...6$  – определяет номер сборочной ситуации;  $N_j$  – нормальная сила реакции;  $j = 1...4$  – номер контактной ситуации;

$$B_1 = \begin{vmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ H(f+v) - R_2 - \Delta X & 0 & 0 & 0 \\ H(v-f) - R_2(1+fv) & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; B_2 = \begin{vmatrix} 0 & v+f & 0 & 0 \\ 0 & 1-fv & 0 & 0 \\ 0 & H(f+v) - R_1(1-fv) & 0 & 0 \\ 0 & R_1 - fH - \Delta X & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$B_3 = \begin{vmatrix} 0 & v+f & fv-1 & 0 \\ 0 & 1-fv & f+v & 0 \\ 0 & H(f+v) + R_1(1-fv) & H(fv-1) - R_1(f+v) & 0 \\ 0 & 2R_1 - R_2 - fH & H - 2R_1v - R_2f & 0 \end{vmatrix};$$

$$B_4 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & vf-1 & 0 \\ 0 & 0 & v+f & 0 \\ 0 & 0 & H(fv-1) - R_1(f+v) & 0 \\ 0 & 0 & (R_2 - R_1 - \Delta X)/v - R_2f & 0 \end{vmatrix}; B_5 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & 0 & fR_1 + vR_2 - H + \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & R_2(f+v) + H(fv-1) \end{vmatrix};$$

$$B_6 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & fv-1 & 1 \\ 0 & 0 & f+v & f \\ 0 & 0 & H(fv-1) - R_1(f+v) & H + fR_1 + 2(R_2 - R_1)/v \\ 0 & 0 & H - 2R_2v + 2(R_2 - R_1)/v - fR_2 & R_2(f+v) + H(fv-1) \end{vmatrix}.$$

Уравнения (2.2) и (2.3) представляют математическую модель процесса сборки деталей типа «вал – втулка».

## 2.5. АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СБОРОЧНЫХ СИТУАЦИЙ

### Анализ сборочных ситуаций при сопряжении

При выполнении сборочной операции на промышленные роботы возлагается достаточно широкий круг задач, таких как захват деталей из накопителя, перемещение деталей на позицию сборки, ориентация деталей, выполнение процесса сопряжения, перемещение готовых деталей на другой накопитель и т.д. Некоторые из этих операций может выполнять какое-либо вспомогательное оборудование или транспортные роботы. Из всего набора последовательных действий сборочного робота, участвующего непосредственно в процессе сборки деталей, можно выделить четыре этапа: захват деталей; транспортное перемещение детали на позицию сборки; позиционирование и ориентация вала относительно отверстия втулки с точностью, обеспечивающей выход вала на фаску втулки или, если фаски отсутствуют, с точностью, необходимой для реализации алгоритма сборки; сопряжение деталей.

При использовании универсальных ПР, обладающих точностью позиционирования, превышающей допустимые погрешности базирования, неизбежно кроме первого и второго присутствует третий этап сборочного процесса.

Программное совмещение из-за наличия комплекса ошибок в звеньях сборочного процесса приводит к сравнительно большому смещению сопрягаемых деталей относительно друг друга перед их соединением и к нарушению собираемости. Относительное смещение есть величина случайная, подчиняющаяся закону двумерного нормального распределения [44] и зависящая от многих факторов. Рассмотрим задачу соединения сборочных компонентов по цилиндрическим сопрягаемым поверхностям типа «вал – отверстие». Предположим, что рассматриваются абсолютно твердые тела и деформация сопрягаемых поверхностей является величиной высшего порядка малости, а контакт происходит в математических точках. Детали указанного типа можно разделить на две группы: не имеющие технологических фасок и с фасками. Рассмотрим возникающие взаиморасположения деталей, не имеющих технологических фасок.

На этапе точного позиционирования и ориентации можно выделить три вида сборочных ситуаций. Причем каждая из этих ситуаций имеет по два случая для угла взаимного перекоса собираемых деталей:  $\nu > 0$  и  $\nu < 0$ .

1. Первая сборочная ситуация характеризуется одноточечным контактом между кромкой вала и плоской поверхностью отверстия (рис. 2.22, 1). Нормальная сила реакции  $N$  направлена параллельно оси отверстия.

2. Вторая сборочная ситуация характеризуется одноточечным контактом между кромкой отверстия и плоской поверхностью вала (рис. 2.22, 2). Нормальная сила реакции  $N$  направлена параллельно оси вала.

3. При дальнейшем увеличении угла взаимного перекоса возникает третья сборочная ситуация, характеризующаяся двухточечным контактом (рис. 2.22, 3). Эта сборочная ситуация является наиболее неблагоприятной для нормального протекания сборочного процесса, так как накладывает ограничения на перемещения деталей по координатам  $X$  и  $Z$ , что может привести к заклиниванию деталей.

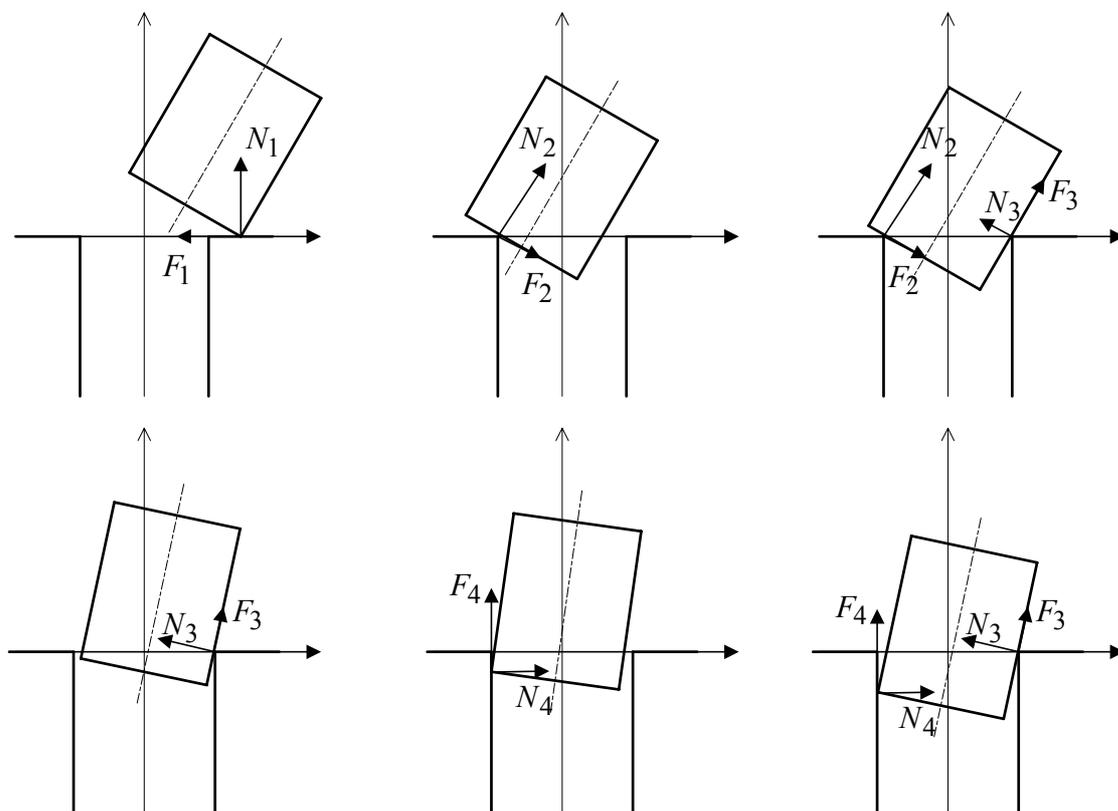


Рис. 2.22. Варианты процесса сопряжения

Выход из создавшейся ситуации возможен только осуществлением вращательного движения вала.

Определим условия существования третьей сборочной ситуации. Как известно, по характеру соединения деталей различают посадки с зазором, с натягом и переходные, при сборке которых возможно получение как зазо-

ра, так и натяга. Как отмечалось выше, будем рассматривать сборку деталей с гарантированным зазором. По принятой единой системе допусков посадок (ЕСДП) СЭВ для деталей с зазором существует восемь классов посадок, которые обозначаются буквами  $a, b, \dots, h$ . Рассмотрим наиболее часто встречающиеся посадки  $c, d, \dots, h$ . Эти посадки отличаются друг от друга величиной отклонения от номинального размера, т.е. определяют величину зазора между деталями. Посадка  $h$  характеризуется минимальной величиной зазора. Для каждого класса посадок существует свое поле допуска, ограниченное верхним и нижним отклонениями. Различают также посадки в системе вала и в системе отверстия. Рассмотрим систему отверстия, характеризующуюся тем, что для всех посадок предельные отклонения отверстия остаются постоянными и нижнее отклонение равно нулю. Значение зазора  $S$  в соединении отверстия с валом определяется по формуле  $S = D - d$ , где  $D$  – диаметр отверстия,  $d$  – диаметр вала.

График рассеивания фактических размеров валов и отверстий в пределах поля допуска (рис. 2.23) соответствует нормальному распределению (распределению Гаусса).

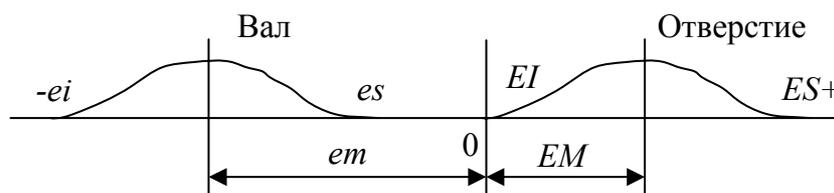


Рис. 2.23. График рассеивания фактических размеров валов и отверстий

На рисунке  $EI, ei; ES, es; EM, em$  – нижние, верхние и средние отклонения размеров отверстия и вала соответственно:

$$EM = 0,5(ES + EI); em = 0,5(es + ei).$$

Допуск размера определяется по формулам:  $t = ES - EI$  или  $t = es - ei$ .

Таким образом, исходя из наибольшей вероятности фактических размеров валов и отверстий, средняя величина зазора  $S$  для данного класса посадок определяется по формуле  $S = EM + em$ .

Величина допуска в зависимости от номинального диаметра деталей определяется качеством, или точностью изготовления деталей. Зависимость зазора  $S$  от номинального диаметра в диапазоне от 2 до 500 мм представлена на рис. 2.24. Рассматривались детали, выполненные по 6 – 8-му

квалитетам, что соответствует второму классу точности. Семейство графиков построено для посадок в системе отверстия, и каждая кривая соответствует своему классу посадок ( $c, d, \dots, h$ ). Графики построены на основании данных, представленных в ЕСДП СЭВ: СТ СЭВ 144-75 и СТ СЭВ 145-75.

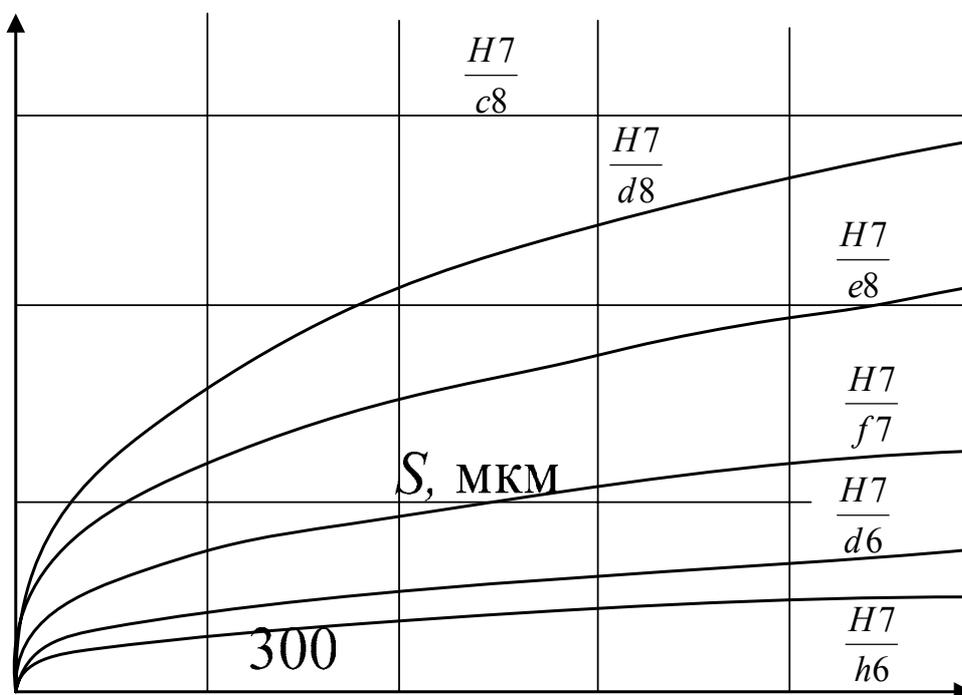


Рис. 2.24. Зависимость  $S$  от диаметра  $D$

Зависимость зазора  $S$  от диаметра  $D$  является функцией вида  $S = f(K, D)$ , где  $K$  – параметр, характеризующий класс посадки. Функция  $S$  носит степенной характер, причем показатель степени меньше 1. В конечном итоге величина зазора  $S$  определяется выражением

$$S = K_i D^e. \quad (2.4)$$

Значения параметра класса посадки  $K_i$  представлены в таблице.

Посадка	$\frac{H7}{h6}$	$\frac{H7}{g6}$	$\frac{H7}{f7}$	$\frac{H7}{e8}$	$\frac{H7}{d8}$	$\frac{H7}{c8}$
$K_i$	0,0053	0,0074	0,0132	0,0214	0,0295	0,0445

Таким образом, при угле взаимного перекоса  $\nu > \nu^*$  (рис. 2.25) возможно существование третьей сборочной ситуации. Отсюда,

$$\cos \nu^* = \frac{d}{D} = \frac{D-S}{D} = 1 - \frac{S}{D}. \quad (2.5)$$

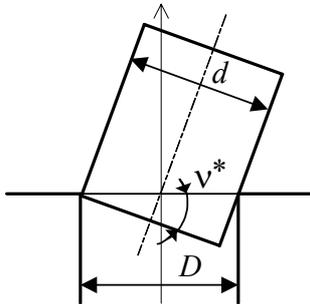


Рис. 2.25. Третья сборочная ситуация

Подставляя выражение (2.4) в (2.5), получаем:

$$\cos \nu^* = 1 - \frac{K_i D^{\frac{1}{e}}}{D}; \quad \nu^* = \arccos \left( 1 - \frac{K_i}{D \left( 1 - \frac{1}{e} \right)} \right).$$

Графики функции  $\nu^*$  для разных классов посадок представлены на рис. 2.26. Полученные графики позволяют определить значение критического угла взаимного перекоса  $\nu^*$ , при котором может возникнуть третья сборочная ситуация. Например, для посадки  $\frac{H7}{f7}$  для диаметра деталей  $D = 10$  мм угол взаимного перекоса деталей не должен превышать  $4,5^\circ$ . Таким образом, для исключения возникновения третьей сборочной ситуации необходимо стремиться к уменьшению угла взаимного перекоса собираемых деталей.

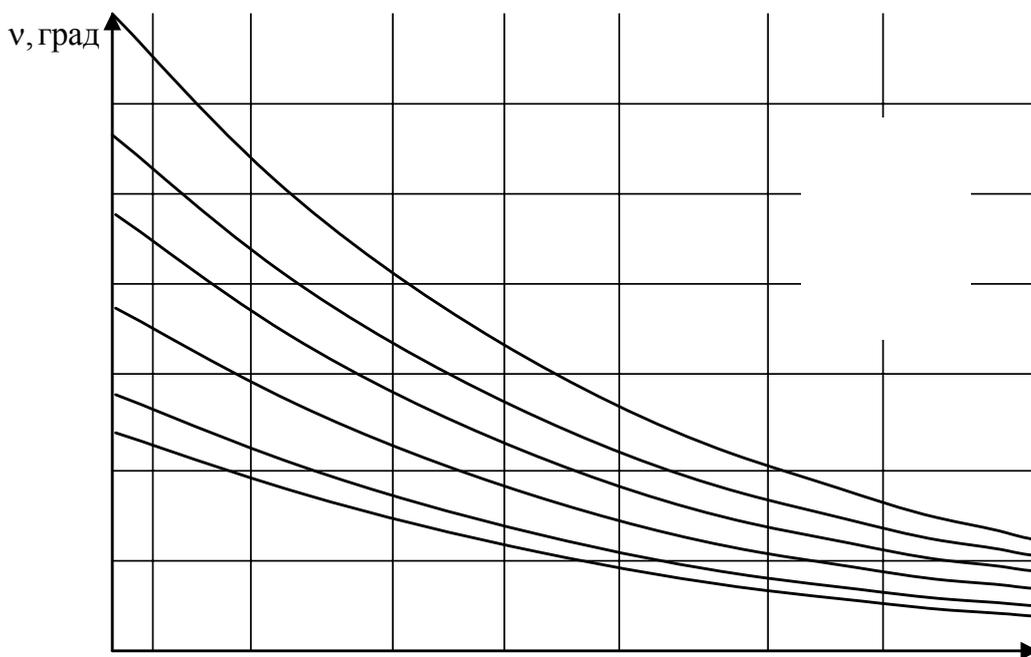


Рис. 2.26. Зависимость функции  $\nu$  от класса посадок

Этап сопряжения предполагает, что вал уже вошел в отверстие. На этом этапе можно выделить также три вида сборочных ситуаций, являющихся продолжением процесса сборки деталей из предыдущего этапа точного позиционирования и ориентации.

4. Четвертая сборочная ситуация характеризуется одноточечным контактом кромки отверстия и цилиндрической поверхностью вала (рис. 2.22, 4). Нормальная сила реакции перпендикулярна оси вала.

5. Пятая сборочная ситуация характеризуется также одноточечным контактом между кромкой вала и цилиндрической поверхностью отверстия (рис. 2.22, 5). Нормальная сила реакции перпендикулярна оси отверстия.

6. Шестая сборочная ситуация является сочетанием четвертой и пятой ситуаций и характеризуется двухточечным контактом (рис. 2.22, 6) Каждая из рассмотренных ситуаций имеет также по два случая для угла взаимного перекося:  $\nu > 0$  и  $\nu < 0$ .

Рассмотрим сборочные ситуации для группы деталей, имеющих технологическую фаску. Различные виды ситуаций представлены на рис. 2.27.

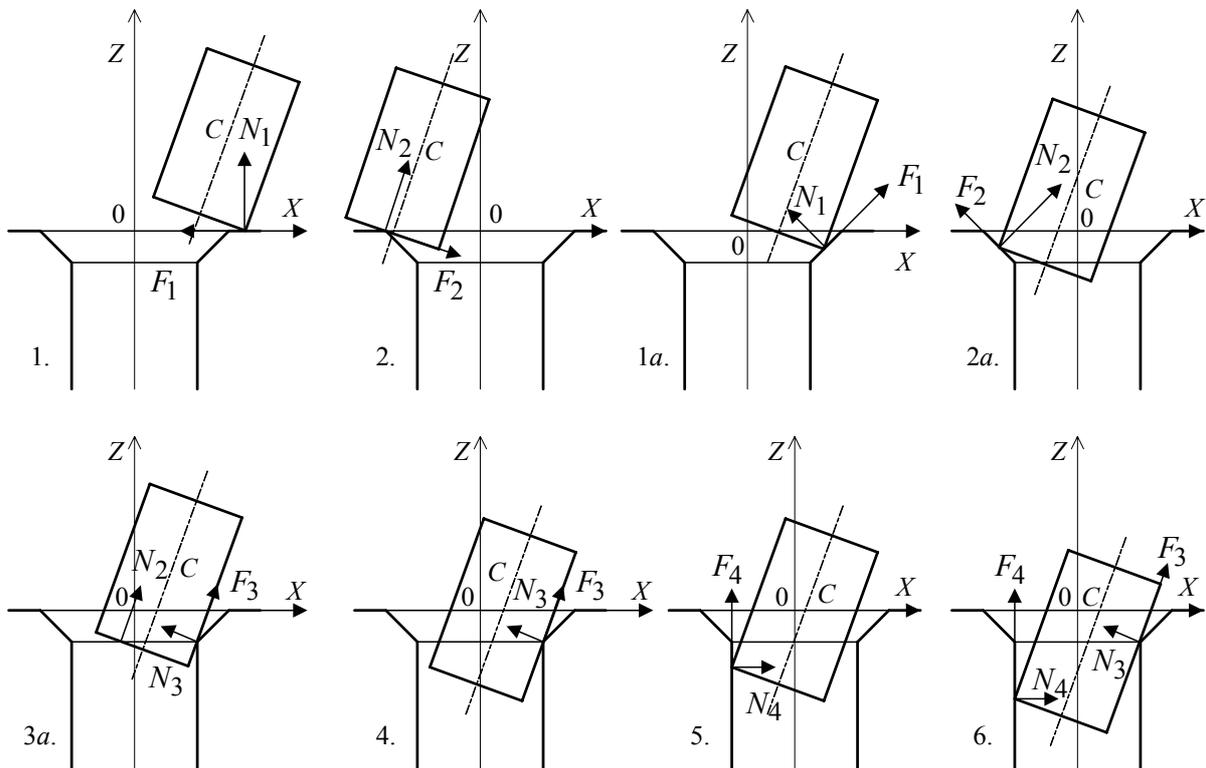


Рис. 2.27. Варианты процесса сопряжения деталей с фаской

В отличие от деталей без фасок здесь добавлены дополнительные ситуации, обозначенные 1а, 2а, 3а, когда точка контакта находится на фаске. Относительно ситуаций, обозначенных 3 (см. рис. 2.22) и 3а (см. рис. 2.27) необходимо сделать следующее замечание. Эти ситуации могут возникнуть при достаточно большом угле взаимного перекоса  $\nu$ . Для деталей, рассматриваемых в плоскости, угол  $\nu$  должен быть больше угла фаски, который обычно равен  $45^\circ$ . Таким образом, можно сделать вывод, что введение технологических фасок исключает сборочные ситуации 3 и 3а.

### **Алгоритмы распознавания сборочных ситуаций**

Алгоритм распознавания сборочных ситуаций строится на основе информации, получаемой с измерительной системы. Он должен работать в масштабе реального времени и отслеживать динамическое поведение системы.

При выведении вала на позицию сборки приводу вертикального перемещения  $Z$  задается управление в функции силы  $F_{Z\text{зад}}$ . Первоначальная сборочная ситуация в реальном процессе может быть какой угодно (см. рис. 2.22). При установившемся переходном процессе можно выделить две группы сборочных ситуаций.

1. *Ситуации 1 и 2.* Признаками этих ситуаций являются нулевое значение скорости по координате  $Z$  ( $\dot{Z} = 0$ ) и координата  $Z$  точки  $A$  вала, приблизительно равная высоте втулки ( $Z \approx H$ ). Знак приближения здесь учитывает погрешность углового взаимного перекоса  $\nu$  деталей:  $Z = H \pm \Delta Z$ , где  $Z = d \sin \nu$ , или с учетом малого  $\nu$ :  $Z = d\nu$ .

Для деталей с фаской  $Z$  лежит в диапазоне  $(H \pm \Delta Z) \dots (H - C \pm \Delta Z)$ , где  $C$  – величина фаски.

2. *Ситуации 4, 5 и 6.* Для этих ситуаций значение скорости по координате  $Z$  при  $Z = H$  не равно нулю, а может принимать нулевое значение при  $Z$  значительно меньше  $H$ .

В свою очередь, ситуации 1 и 2 отличаются друг от друга величиной усилия по координате  $X$ . Для ситуации 1 составляющая  $F_X = 0$ , а для ситуации 2 составляющая  $F_X = F_{Z\text{зад}} / \operatorname{tg} \nu$ . Знак момента  $M_0$  доопределяет ситуации в зависимости от угла взаимного перекоса собираемых деталей ( $\nu > 0$  или  $\nu < 0$ ). Распознавание ситуаций 4, 5, 6 необходимо осуществить более точным измерением составляющих  $F_X$  и  $F_Z$  силы реакции в точке контакта.

Учитывая уравнения сил и моментов математической модели сборочного процесса (2.3), можно определить соотношение между составляющими  $F_X$  и  $F_Z$  для каждой сборочной ситуации.

Ситуация 5

$F_Z = f_{\text{тр}} F_X$  или  $F_X = F_Z / f_{\text{тр}}$ , где  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения.

Ситуация 4

$$F_X = N_3(fv - 1),$$

$$F_Z = N_3(f + v),$$

$$F_{\text{об}} = N_3(H(fv - 1) - R_1(f + v)).$$

Из этих уравнений получаем выражение  $M_{\text{об}} = F_X H - F_Z R_1$ .

Таким образом, измеряя составляющие вектора сил и моментов  $F_X, F_Y, M_C$ , получаем признаки ситуаций. На основании этих признаков получен алгоритм распознавания сборочных ситуаций, представленный на рис. 2.28.

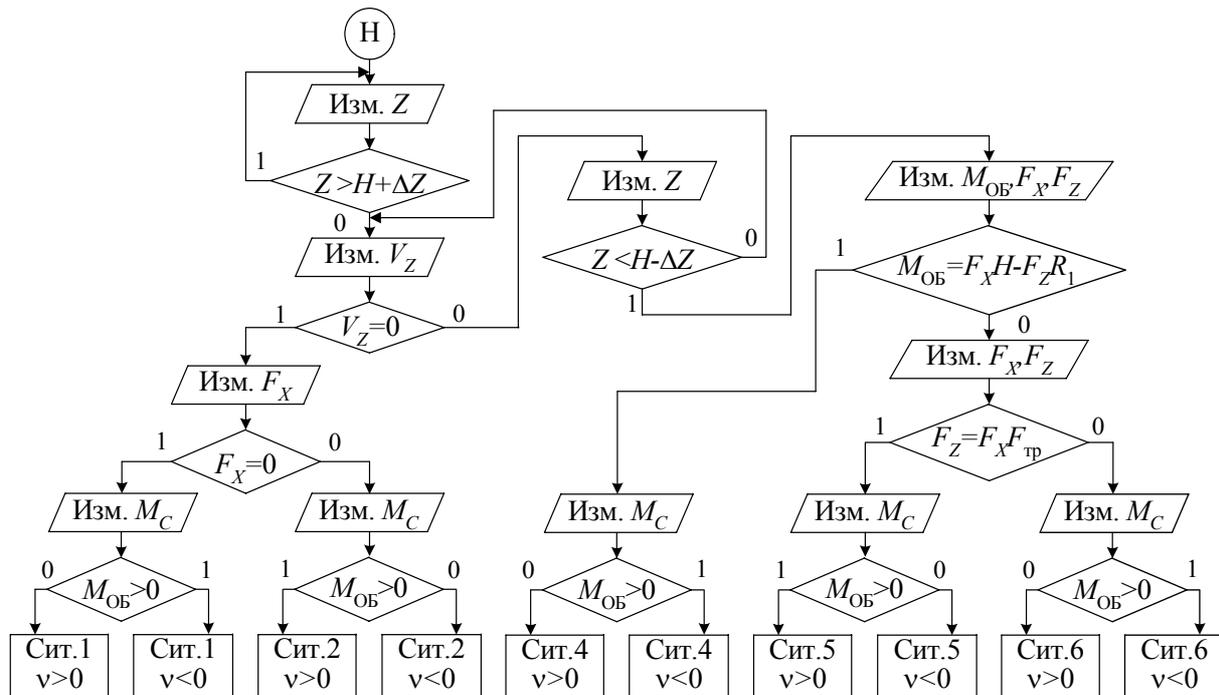


Рис. 2.28. Алгоритм распознавания сборочных ситуаций

Данный алгоритм, кроме первоначального определения сборочной ситуации, позволяет выполнить контроль правильности протекания сборочного процесса. При формировании законов управления приводами протекание процесса сборки должно идти в соответствии с графами переходов. Однако при каких-либо случайных воздействиях может произойти на-

рушение последовательности прохождения сборочных ситуаций. Алгоритм распознавания позволяет в процессе сопряжения деталей вести дополнительный контроль правильности функционирования и в случае отклонения вносить корректировку в алгоритмы управления.

Выполнив соответствующий анализ графической модели, построим графы последовательности прохождения сборочных ситуаций.

### Анализ последовательности прохождения сборочных ситуаций

Последовательность прохождения сборочных ситуаций при выполнении сопряжения деталей можно представить в виде графов переходов. Необходимо сделать следующие допущения. После этапа транспортного перемещения базовая деталь (втулка) находится на позиции сборки, а вал перемещается из исходной позиции. В результате может возникнуть любая из сборочных ситуаций этапа точного позиционирования и ориентации. Сборочный процесс можно считать завершенным, если был переход через 4-ю или 5-ю, или 6-ю сборочные ситуации и вал вошел в отверстие больше чем на  $2/3$  своей длины.

С учетом сделанные замечания, граф прохождения сборочных ситуаций для деталей без фасок представлен на рис. 2.29, а.

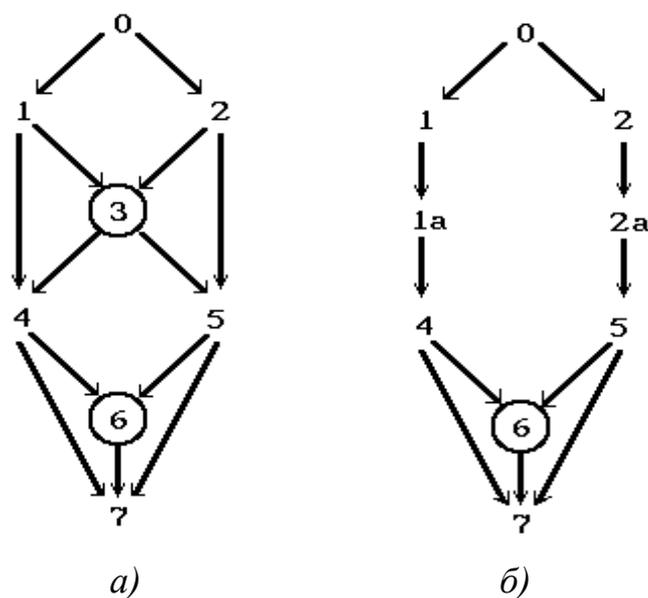


Рис. 2.29. Графы прохождения сборочных ситуаций

На рисунке цифрами обозначены номера сборочных ситуаций. Цифрой ноль обозначена исходная позиция, а цифрой 7 – окончание сборки. Выделенные позиции 3 и 6 характеризуются тем, что в них возможно за-

клинивание деталей. Можно отметить следующее для наиболее оптимального процесса сборки необходимо разработать такие алгоритмы управления, которые обеспечивали бы прохождение по точкам 0-1-4-7 или 0-2-5-7 и исключали возникновение ситуаций 3 и 6, в которых возможно заклинивание деталей.

Для деталей с фасками, как говорилось выше, исключается сборочная ситуация 3, а граф прохождения сборочных ситуаций, представлен на рис. 2.29, б.

Проведение операций по извлечению ТВС из контейнера возможно только после определения координат  $M_{i=1}^n \{X_{i0}, Y_{i0}\}$  центров ячеек. Искажённая

форма ТВС, его хрупкость и subtilность (рис. 2.30) существенно усложняют решение задачи: при вертикальном перемещении вдоль оси  $Z$  и совмещении вертикальных осей схвата робота и ячейки вследствие отклонения центра масс стержня от его геометрического центра возможны ситуации перекоса и даже заклинивания. В отличие от задач автоматической сборки изделий с детерминированными параметрами сопрягаемых деталей система «ТВС – ячейка» является неопределённой и достижение поставленной цели возможно только лишь при использовании информации о внешней среде. Это требует применения наряду с позиционным управлением приводами позиционно-силового и даже чисто силового управления приводами робота (с жёстким ограничением развиваемых сил и моментов). Для изменения положения сборки в ячейке при её извлечении в системе управления могут использоваться приводы перемещения по координатным осям  $X$  и  $Y$  и поворота ТВС вокруг своей оси ( $\alpha$ ).

Рассмотрим алгоритм выполнения операции извлечения сборки. После фиксации ТВС в зажиме захватного устройства робота в точке  $T_{кн}(x_0, y_0, z_n)$  система управления формирует сигнал на перемещение схвата в точку  $T_{к0}(x_0, y_0, z_0)$ . При выполнении

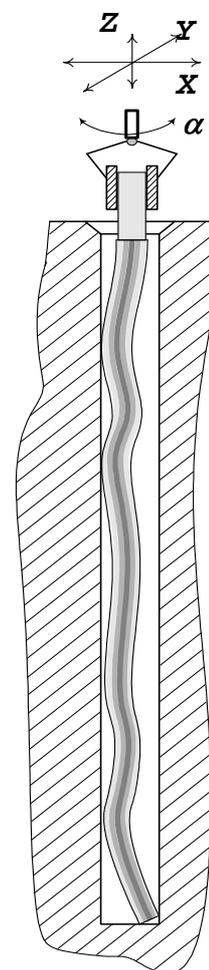


Рис. 2.30. Искажённая форма ТВС

данной технологической операции возможно появление пяти ситуаций ( $C_1, \dots, C_5$ ), отражающих процесс извлечения сборки:

*Ситуация 1.* В идеальном случае робот в позиционном режиме по координате  $Z$  отработывает заданное рассогласование, вытягивая тем самым ТВС из ячейки контейнера в транспортный кессон. Величины ускорений при разгоне и торможении определяются технологическими параметрами объекта с учётом его движения в вязкой среде. Датчики силы по всем трём координатам робота формируют вектор силы  $\vec{P}$ , направленный вдоль оси  $Z$ , а величина его равна силе тяжести стержня. Перемещения вдоль осей  $X$  и  $Y$  исключены вследствие необратимости силовых редукторов соответствующих приводов. Процесс завершается по достижению заданной координаты  $Z_0$ .

*Ситуация 2.* В случае появления дополнительных сил (например, при трении частей ТВС о стенки ячейки контейнера) структура привода  $Z$  изменяется: привод переключается в режим позиционно-силового управления с ограничением развиваемой силы, а скорость движения уменьшается пропорционально увеличению силы сопротивления движению. Действие установленного режима прекращается:

- а) при завершении процесса извлечения;
- б) уменьшении силы сопротивления – переход к ситуации 1;
- в) увеличении силы сопротивления – переход к ситуации 3.

*Ситуация 3.* Продолжающееся увеличение силы сопротивления движению стержня выше некоторого порога, который меньше предельно допустимого значения силы, определяемой физико-механическими свойствами ТВС, приводит к необходимости перехода к управлению микроперемещением с дозированием силы и «нулевой» скоростью движения. Существует два возможных варианта завершения этой ситуации, в которых система управления:

- а) при уменьшении силы ниже установленной возвращается к ситуации 2;
- б) при достижении силой предельного значения переходит в ситуацию 5.

*Ситуация 4.* При извлечении стержня возможно отклонение вектора силы от вертикальной оси и появление горизонтальных составляющих. В этой ситуации приводы  $X$  и  $Y$  отработывают дополнительные перемещения в направлении уменьшения соответствующей составляющей в пределах свободного хода стержня в ячейке, т.е. система управления переключается в режим работы с регулируемой активной податливостью. Величина сме-

щения  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  запоминается в накопителях и может увеличиваться или уменьшаться в зависимости:

- от знака и величины проекции вектора силы на горизонтальные оси;
- величины силы, действующей по оси  $Z$ ;
- допустимого угла отклонения ТВС, который определяется, в частности, длиной оставшейся в ячейке части стержня.

Режим может выполняться одновременно с ситуациями 1, 2 и 3.

*Ситуация 5.* Продолжение операции извлечения невозможно: дальнейшее увеличение силы приведёт к аварийной ситуации – разрушению ТВС, и система управления формирует функцию «отката» – опускает стержень назад на величину  $\Delta Z$  в ячейку до координатной отметки, на которой произошёл переход в ситуацию 2. Привод  $\alpha$  поворачивает стержень на некоторый угол (величина и знак угла поворота могут быть фиксированной уставкой в системе либо могут рассчитываться по значениям проекций вектора силы на горизонтальные оси); из-за искажённой формы ТВС возможно включение ситуации 4, после чего процесс извлечения повторяется: система возвращается в ситуацию 1 с новой начальной координатой  $z_{n1}$ .

### 3. АЛГОРИТМЫ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СБОРОЧНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

#### 3.1. СТРУКТУРЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

Алгоритмы управления РСС и функциональные схемы систем управления РСС строятся в соответствии с алгоритмами определения координат сопрягаемых деталей, рассмотренных в гл. 2. Так, алгоритм управления РСС представлен на рис. 3.1, а функциональная схема системы управления, реализующей нулевой метод определения координат, на рис. 3.2. Система управления РСС включает в себя по каждой координате позиционный привод (усилитель  $У$ , исполнительный двигатель ИД, исполнительный механизм ИМ и датчик положения ДП), «нулевую» головку НГ с датчиками контакта и ключи  $K1 \dots K3$ .

Блок управления и вычислений (БУВ) содержит формирователь импульсов с датчиков контакта (ФИ), переключатель  $П$ , вычислительный (В) и логический (Л) узлы. После отработки системой программной точки  $T_{ki}(x_{zi}, y_{zi})$  в плоскости  $XOY$  ключ  $K1$  по сигналу  $U_{k1}$  переключает вход привода по координате  $Z$  на сигнал задания скорости  $V_z = f(U_z)$ . БУВ фиксирует значения координаты  $z_i$  в моменты контакта каждого из четырёх датчиков и рассчитывает величины  $x_d$  и  $y_d$ . Привод по оси  $Z$  возвращается в исходную точку (формируется  $-V_z$ ), «нулевая» измерительная головка самоустанавливается в исходное положение. Дополнительные величины перемещений  $x_d, y_d$  могут быть добавлены к заданным ключами  $K2, K3$ , и приводы горизонтального перемещения  $X, Y$  переводят схват робота в рассчитанную точку центра ячейки  $T_{ki}(x_{ki}, y_{ki})$  с координатами

$$\begin{cases} x_k = x_3 + x_d, \\ y_k = y_3 + y_d, \end{cases}$$

Коорды занесены в память системы. Аналогичным образом выполняется определение координат второй ячейки контейнера и по двум центрам и известной геометрии производится расчёт всего массива  $M \{X_{i\phi}, Y_{i\phi}\}_{i=1}^n$ .

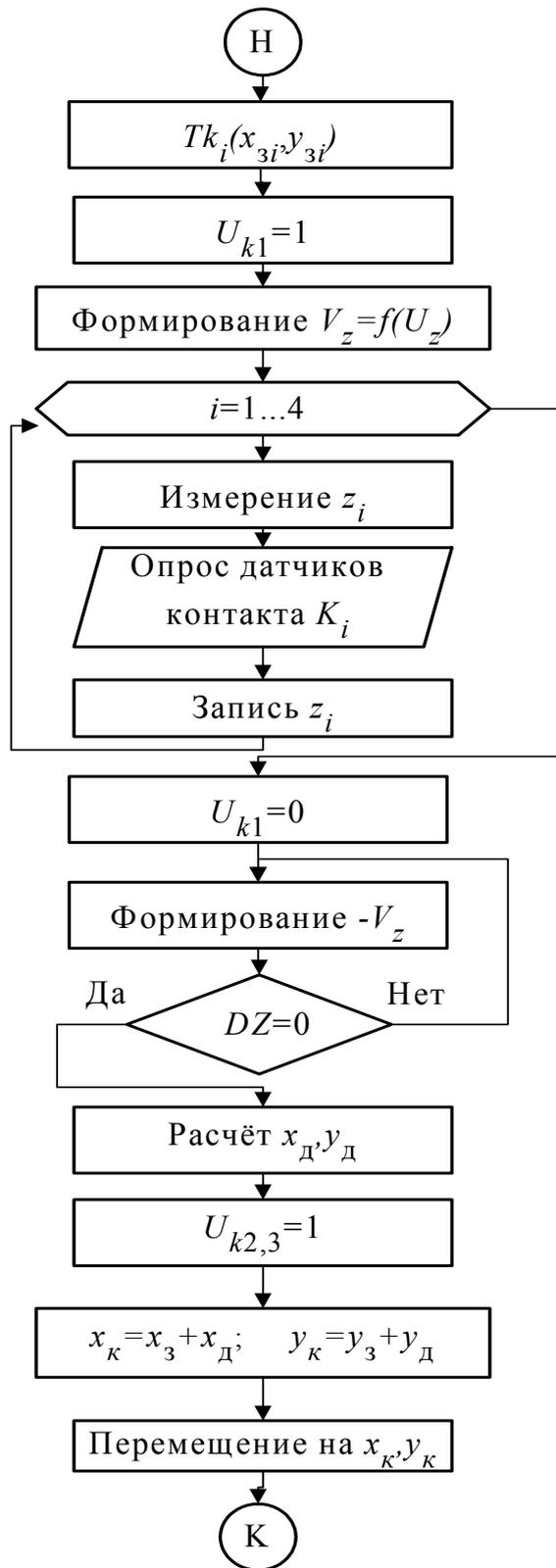


Рис. 3.1. Алгоритм управления  
РСС с нулевой измерительной  
головкой

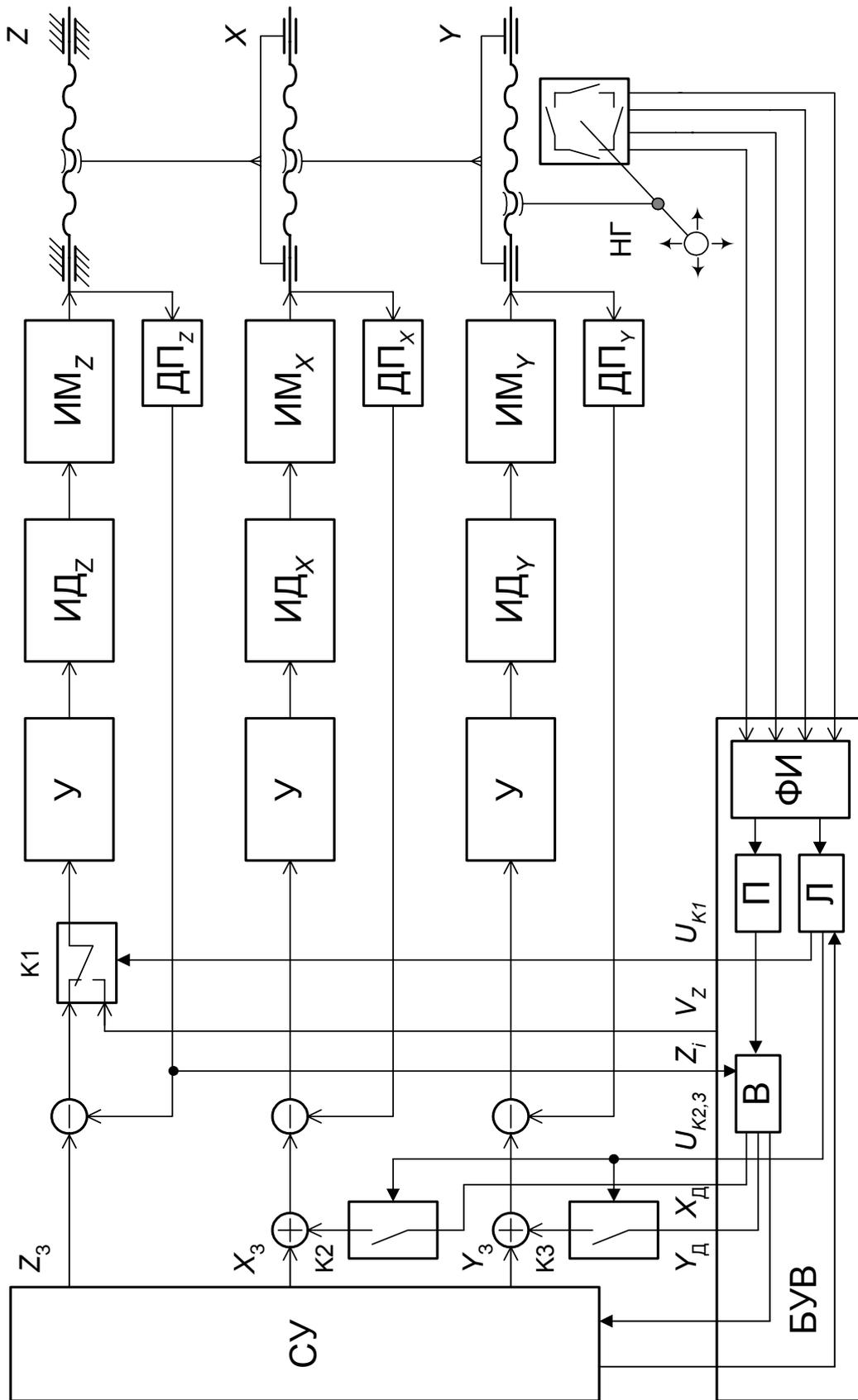


Рис. 3.2. Функциональная схема системы управления с определением координат нулевым методом

На рис. 3.3 представлен алгоритм управления РСС, а на рис. 3.4 – функциональная схема системы управления, реализующая дифференциальный метод определения координат. Система содержит датчик силы  $ДС_z$  по координате  $Z$ , дополнительные датчики положения по осям  $X$  и  $Y$   $ДП_{xд}$  и  $ДП_{yд}$ , установленные в дифференциальной головке ДГ, а также блок управления и коммутации БУК. БУК переключает ключ  $K1$  ( $U_{к1} = 1$ ) на формирование приводом  $Z$  скорости  $V_z = f(P_z)$  и задаёт величину силы по оси  $Z$ .

Определение дополнительных координатных перемещений производится до момента превышения заданного значения силы при измерении  $P_d - P_z > 0$ , после чего величины  $x_d$  и  $y_d$  записываются в память системы. Процесс прекращается, ключ  $K1$  переводит привод по оси  $Z$  в позиционный режим ( $U_{к1} = 0$ ), привод отрабатывает появившееся рассогласование и возвращает схват в начальную точку под действием сигнала ошибки. При этом дифференциальная головка в зависимости от её типа либо остаётся в зафиксированном положении, либо самоустанавливается в исходное состояние. Метод не требует проведения вычислений и даёт значительно более точные результаты по сравнению с позиционным нулевым методом, однако оба они предполагают наличие устройств автоматической замены измерительных головок и технологического объекта, что усложняет конструкцию манипулятора и приводит к появлению дополнительных транспортных перемещений от контейнера с ТВС к кассете с инструментом.

Функциональная схема системы управления РСС для определения центра ячейки, работающая по методу усреднения (рис. 3.5), содержит три привода по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , блок переключения координат, блоки задания и изменения знака скорости, блок изменения масштаба счёта и сумматор. Исполнительные приводы по каждой координате оснащены датчиками сил  $ДС_x$ ,  $ДС_y$ ,  $ДС_z$ , ключи на входе  $K1...K5$  переключают сигналы управления по командам от блока переключения координат (БПК) и блока логики (БЛ). Обработкой сигналов и формированием команд на переключение управляет коммутатор  $K$ . Блоки не имеют физической реализации и представляют собой программные модули специализированной микроЭВМ.

В случае несовпадения программных и фактических координат центра ячейки контейнера контактная сила по оси  $Z$  управляет работой приводов по осям  $X$  и  $Y$ . Следящий привод переводится в режим регулятора скорости путём размыкания ключа  $K4$  ( $K6$ ) в канале ошибки. БЛ через коммутатор  $K$  подаёт управляющий сигнал  $+U$  на вход привода.

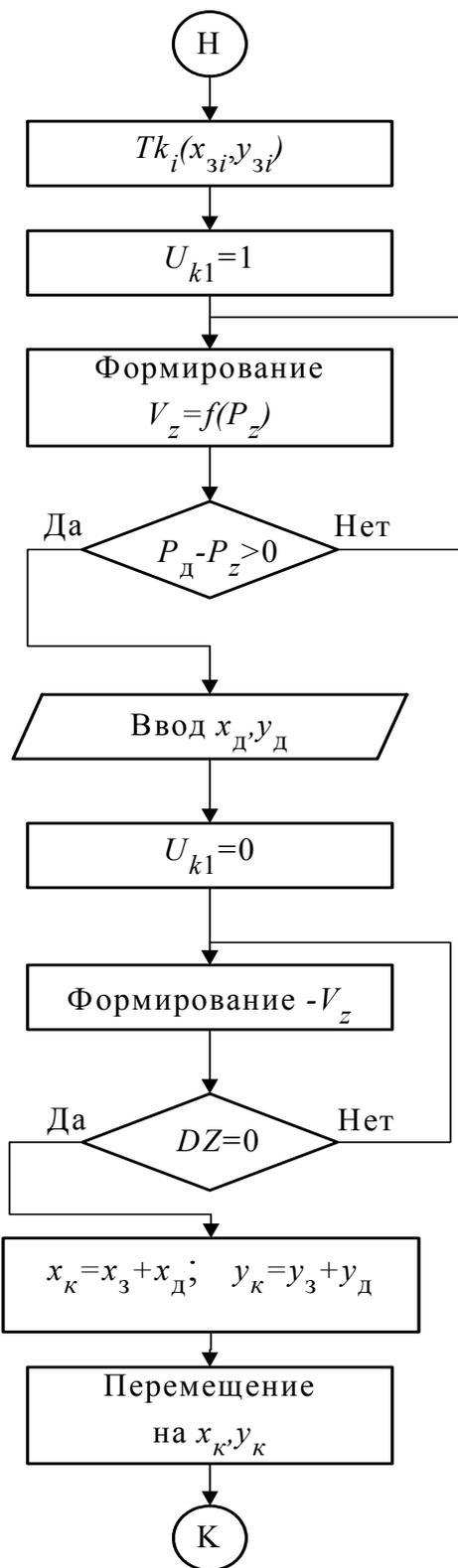


Рис. 3.3. Алгоритм управления  
РСС с дифференциальной  
измерительной головкой

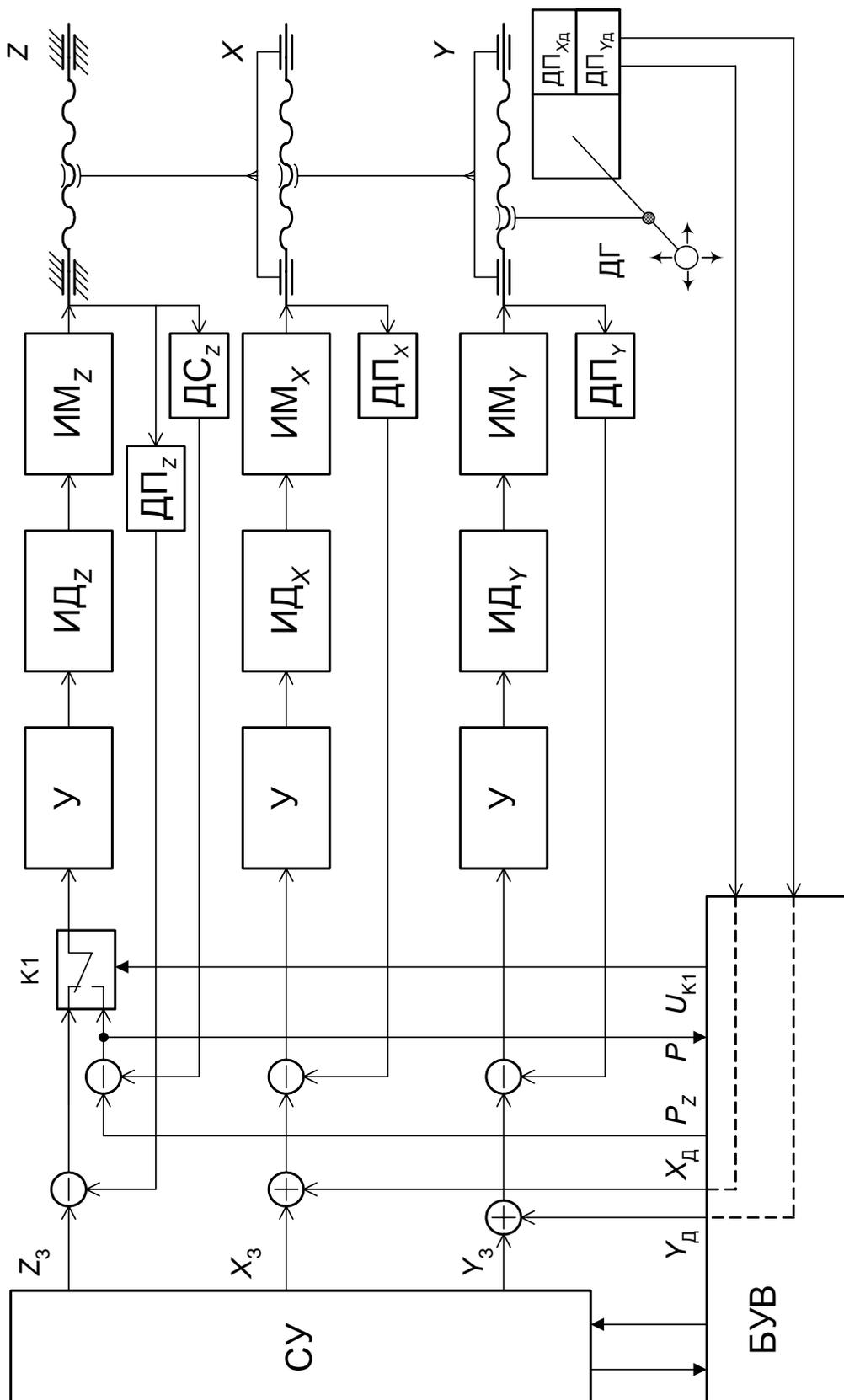
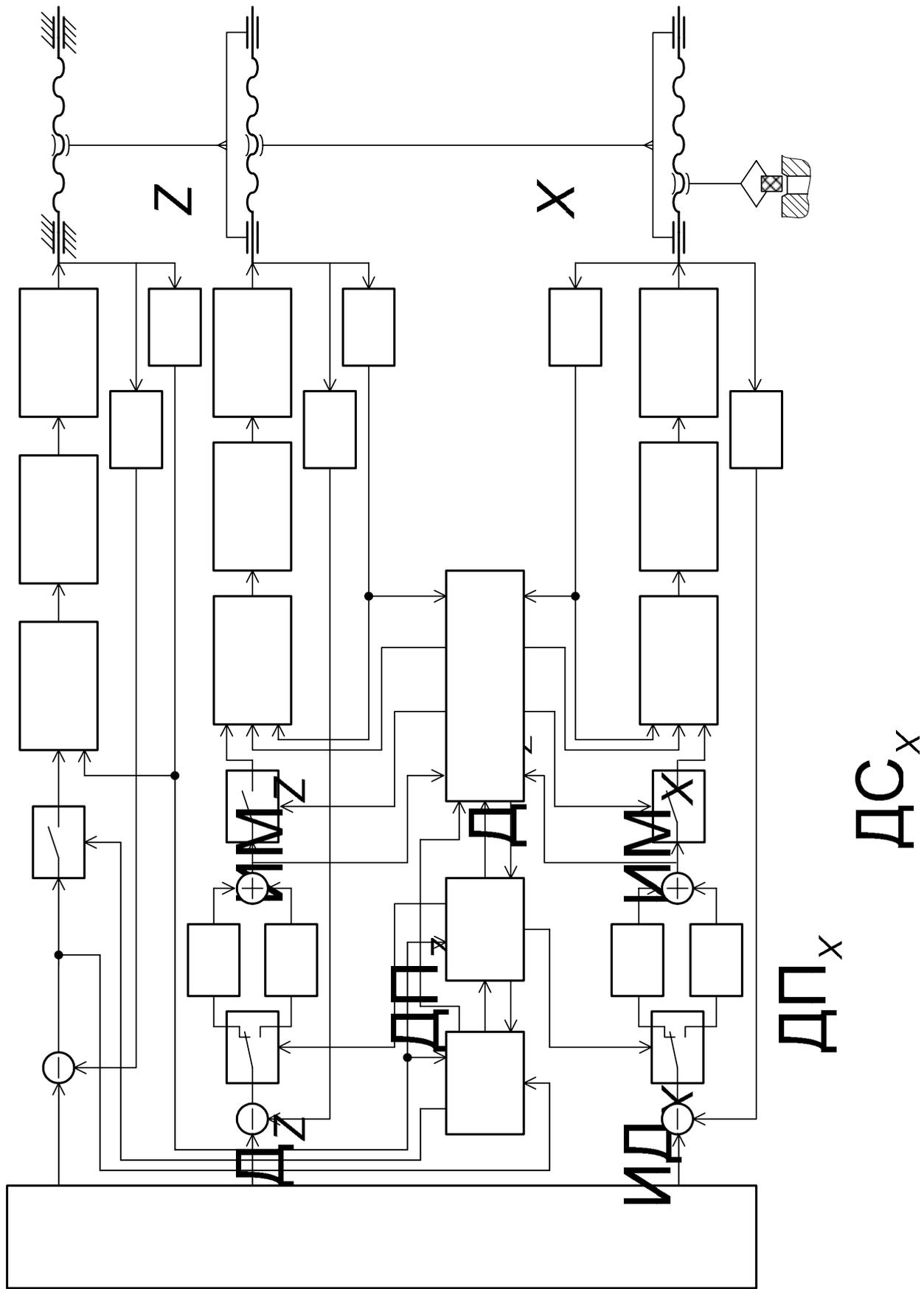


Рис. 3.4. Функциональная схема системы управления с определением координат дифференциальным методом



У

В случае, если перемещение не происходит, что определяется БЛ по сигналам с датчиков положения и сил, то на усилитель подаётся напряжение  $-U$ , привод реверсируется. Таким образом сообщается перемещение схвату со стержнем в направлении свободного хода. При контакте деталей привод останавливается и ошибка в сумматоре, равная величине перемещения привода, определяется удвоенной величиной исходного отклонения совмещаемых осей.

Перед началом движения ошибка была равна нулю, так как приводы  $X$  и  $Y$  отработали заданную программную точку  $T_{ki}(x_{zi}, y_{zi})$ . Далее по сигналу с БЛ ключ К2 (К3) переключает сигнал ошибки на делитель на два, замыкается ключ К4 (К6), привод  $X$  ( $Y$ ) переходит в следящий режим и обрабатывает сигнал, равный половине величины перемещения, совмещая оси. Следующим шагом БЛ даёт команду на включение привода по оси  $Z$ , затем, в случае несобираемости, – на работу привода по оси  $Y$  и так до тех пор, пока не будет достигнуто заданное перемещение по оси  $Z_{z_T}$ . Процесс определения координат завершается замыканием ключа К1 и возвращением привода  $Z$  на исходную точку. Следует отметить, что при определении координат субтильной сборкой использование данного метода затруднено. Наличие в составе системы управления микроЭВМ позволяет по математическому алгоритму рассчитать координаты центра ячейки без движений усреднения, для чего необходимо определить величину смещения по оси  $Z$  (с использованием силовой информации) и длину любой хорды, образованной движением схвата от точки касания ячейкой в направлении любой из горизонтальных осей до противоположной точки контакта, после чего приводы робота выведут схват с ТВС в центр ячейки.

Функциональная схема системы управления, реализующей алгоритм с организацией поисковых движений (рис. 3.6), дополнительно к трём позиционным приводам по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  содержит датчики сил  $ДС_x$ ,  $ДС_y$ ,  $ДС_z$ , блок логики управления переключением БЛ и коммутаторы переключения  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ . Поиск центра ячейки производится следующим образом. При подаче сигнала от системы управления  $M$  через элемент И1 начинается движение координата  $Z$  в прямом направлении. При контакте деталей сигнал с датчика силы  $ДС_z$  через элемент И2 обеспечивает обработку приводом координаты  $Z$  заданной величины силы. Этот же сигнал разрешает работу через дешифратор  $DC$  координатам  $X$  и  $Y$ . Дополнительные сигналы на перемещение  $U_x$ ,  $U_y$  подключаются коммутаторами  $K_x$  и  $K_y$  на вход приводов. Направление перемещения определяется знаком сигнала  $U_i$  и задаётся состоянием выходов дешифратора:  $DC0$ ,  $DC2$  – знак «+»;  $DC1$ ,  $DC3$  – знак «-».

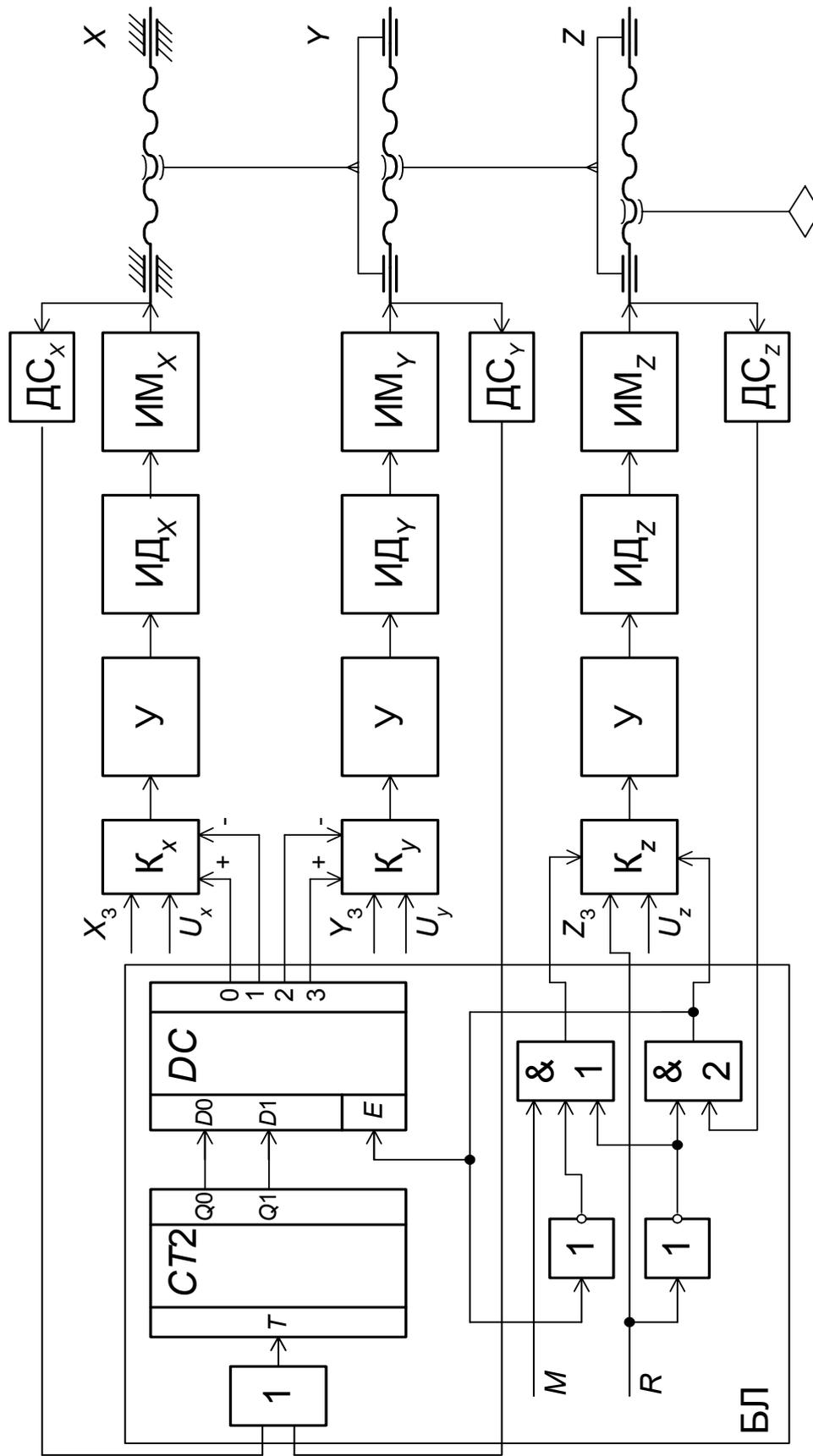


Рис. 3.6. Функциональная схема системы управления с организацией поисковых движений

В исходном состоянии  $DC0 = 1$ , начинает движение канал  $X$  в прямом направлении. При фиксации останова координаты  $X$  сигнал с датчика силы  $ДС_x$  через элемент ИЛИ переключит счётчик СТ2 в следующее состояние. Сигнал разрешения движения на втором выходе дешифратора  $DC1 = 1$  приводит в движение координату  $X$  в обратном направлении. При следующем упоре любой из датчиков силы координат  $X$  или  $Y$  увеличит значение счётчика на единицу. Это обеспечивает движение координаты  $Y$  в прямом направлении. Следующий упор – движение в обратном направлении. Если совмещение образующих отверстия ячейки и шупа не произошло, поисковые шаги координат  $X$  и  $Y$  повторяются. Если совмещение произошло, сигнала с элемента И2 не будет, дешифратор  $DC$  блокируется. Это исключает движение координат  $X$  и  $Y$  и обеспечивает через элемент НЕ и элемент И1 движение координаты  $Z$  до полного совмещения осей. Сигнал управления  $M$  отключается, а сигнал  $R$  возвращает хват по координате  $Z$  в исходную позицию. В это время второй элемент НЕ исключает движение по  $Z$  в прямом направлении и отработку силы. Схема не требует настройки после проведения каждой операции определения центра, она работоспособна с любого момента времени, причём, даже если произошло заклинивание при выполнении движений, устройство позволяет путём последовательных движений каналов продолжить поиск или возвратиться в исходное состояние.

Функциональная схема системы управления РТК с измерительным конусом, реализующая адаптивный поисковый метод определения координат центра ячейки, изображена на рис. 3.7. Система содержит: датчики положения  $x_3, y_3, z_3$ , сумматоры, ключи К1...К3, позиционные приводы по координатам; измерительный конус с датчиками деформации  $ДС_{x1}, ДС_{x2}, ДС_{y1}, ДС_{y2}$ , блок памяти ЗУ для записи координат, пороговые элементы ПЭ, блоки выделения модуля БВМ, усилители-формирователи логических сигналов Ф, элементы ИЛИ, ИЛИ-НЕ и RS-триггер управления переключением режимов.

Устройство работает следующим образом. С датчика по координате  $X$  поступает сигнал на отработку приводом заданного положения  $x_3$  для исполнительного механизма  $ИМ_x$ . Этот сигнал сравнивается с сигналом положения с датчика  $ДП_x$  и поступает через ключ К1 на корректирующий усилитель У, исполнительный двигатель  $ИД_x$  и исполнительный механизм  $ИМ_x$ .

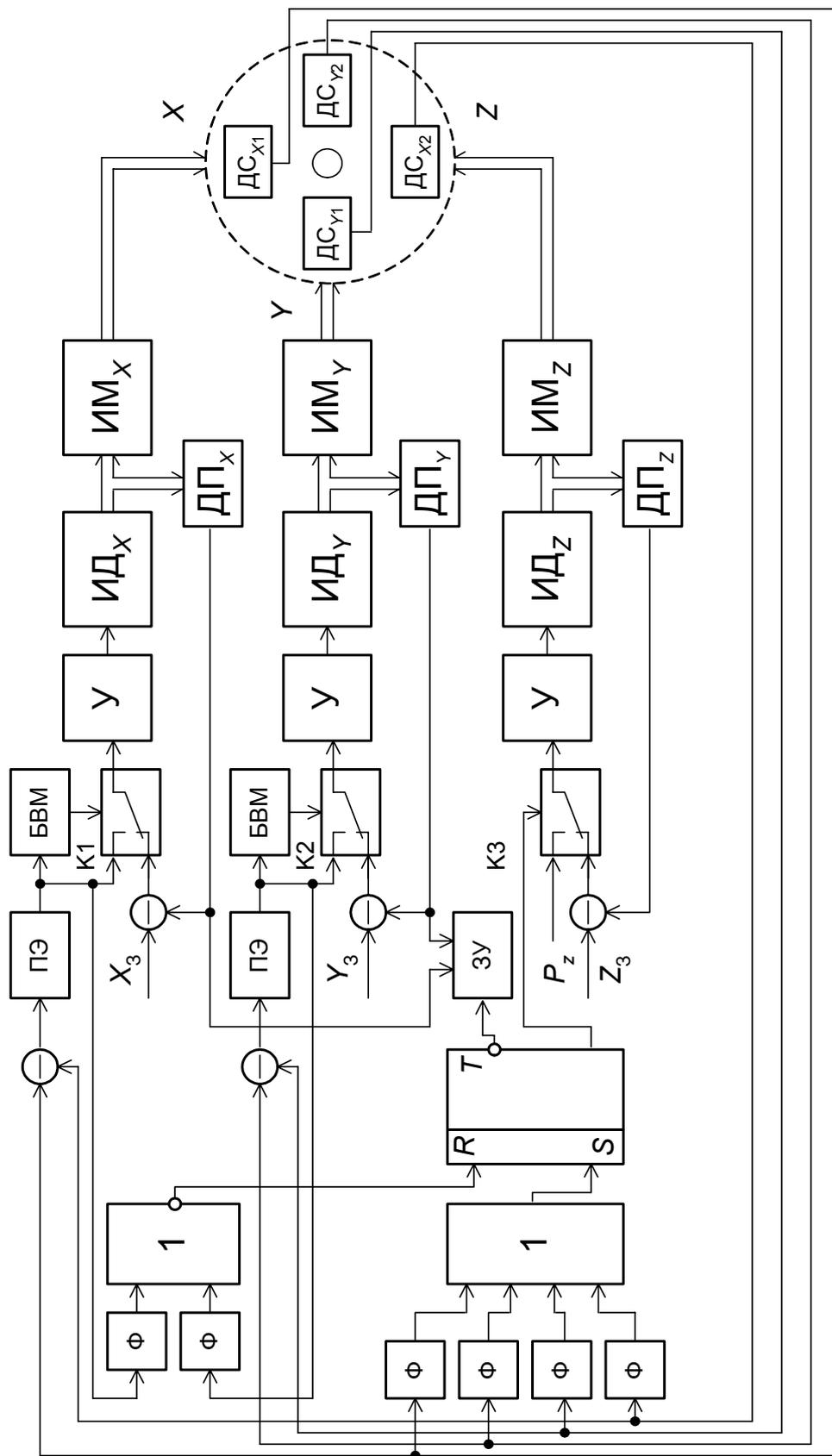


Рис. 3.7. Функциональная схема системы управления с определением координат измерительным конусом

По координатам  $Y$  и  $Z$  от задатчиков положения  $y_3, z_3$  аналогично управляются приводы по осям  $Y$  и  $Z$ . Исполнительные механизмы управляют движением схвата робота, в котором расположен измерительный конус. На четырёх лепестках конуса с внутренней стороны находятся датчики деформации. При основном контакте лепестков со стенкой отверстия их деформация вызывает появление сигналов на выходе хотя бы одного из датчиков  $ДС_{x1}, ДС_{x2}, ДС_{y1}, ДС_{y2}$ . Эти сигналы через усилители-формирователи  $\Phi$  и элемент ИЛИ переключают  $RS$ -триггер в единичное состояние. Под действием сигнала с прямого выхода триггера ключ  $K3$  переключает работу привода координаты  $Z$  с режима управления положением на режим управления силой с задатчика  $P_z$ . В таком режиме привод  $Z$  обеспечивает постоянный контакт измерительного конуса с ячейкой контейнера. Разность сигналов деформации с ортогональных пар датчиков  $ДС_{x1}, ДС_{x2}$  через пороговый элемент ПЭ и блок выделения модуля БВМ подключает ключ  $K1$  к выходу ПЭ, имеющего релейную характеристику с зоной нечувствительности.

Привод по координате  $X$  обрабатывает сигнал с выхода ПЭ и перемещает измерительный конус в сторону уменьшения разности сигнала с элемента сравнения. Аналогично работает привод по координате  $Y$ . Происходит перемещение схвата с измерительным конусом одновременно по координатам  $X$  и  $Y$  и движение по координате  $Z$ , обеспечивающее постоянный контакт конуса с ячейкой. При совпадении оси ячейки с осью конуса сигналы с датчиков деформации равны между собой, но могут быть отличны от нуля; если это условие выполняется, нулевые сигналы с выходов сумматоров через усилители-формирователи переключают элемент ИЛИ-НЕ в единичное состояние. Сигнал с выхода элемента ИЛИ-НЕ сбрасывает  $RS$ -триггер, сигнал с инверсного выхода которого разрешает запись координат  $X$  и  $Y$  схвата робота в ЗУ системы управления. Одновременно нулевые сигналы с выходов сумматоров приводят к переключению ключей  $K1$  и  $K2$  в исходное положение, а нулевой сигнал с прямого выхода  $RS$ -триггера переключает ключ  $K3$ . Таким образом, приводы по всем координатам переключаются снова на позиционный режим.

При необходимости определения центров ТВС, вставленных в ячейки, измерительный конус предварительно настраивается: лепестки с датчиками деформации, образующие конус, поворачиваются вокруг нижнего

шарнира, образуя обратный конус, угол при вершине которого зависит от диаметра ТВС, и фиксируются в таком положении. Работа устройства при определении центров валов аналогична той, которая выполняется при определении центров отверстий.

Алгоритм управления РТК при извлечении ТВС с формированием рассмотренных ситуаций представлен на рис. 3.8. Здесь через  $P_Z$ ,  $P_D$  и  $P_{\max}$  обозначены соответственно текущая, допустимая и максимальная силы, развиваемые приводом робота по оси  $Z$ ;  $P_X$  и  $P_Y$  – проекции вектора силы  $\vec{P}$  на горизонтальные оси.

Очевидно, что система управления должна реализовывать разрывное управление по координатам в классе систем с переменной структурой. Общий вектор управления  $\vec{U} \in \{g_Z, g_X, g_Y, g_\alpha\}$  определяется переключаемыми функциями  $g_Z, g_X, g_Y, g_\alpha$  для каждого из приводов робота. Определим управление роботом при данной операции через рассмотренные пять ситуаций:

$$\vec{U} = \begin{cases} g_Z \vee C1 \vee C2 \vee C3; \\ g_Z \wedge g_X \wedge g_Y \vee C1 \wedge C4 \vee C2 \wedge C4 \vee C3 \wedge C4; \\ g_Z \wedge g_\alpha \vee C5; \\ g_\alpha \wedge g_X \wedge g_Y \vee C5 \wedge C4, \end{cases}$$

где  $C1 \dots C5$  – ситуации процесса извлечения.

Рассмотрим характер формирования функций переключения для каждой из управляемых координат робота.

Управление  $g_Z(z_0, P_Z, P_D, P_{\max})$  для обеспечения движения по координате  $Z$  описывается системой уравнений с логическими условиями:

$$g_Z = \begin{cases} z_0 \wedge V_Z \wedge \Phi_{G_Z}(p) \quad \forall P_Z = G_C; \\ z_0 \cdot k_{\text{РП}}(P_Z) \wedge V_{Z1}(P_Z) \wedge \Phi_{G_Z}(p) \quad \forall G_C < P_Z \leq P_D; \\ k_{\text{РС}}(P_{\max} - P_Z) \wedge V_{Z2}(P_Z) \wedge \Phi_{V_Z}(p) \quad \forall P_D < P_Z < P_{\max}; \\ -\Delta z \wedge -V_Z \wedge \Phi_{G_Z}(p) \quad \forall P_D = P_{\max}, \end{cases}$$

где  $\Phi_{G_Z}(p)$ ,  $\Phi_{V_Z}(p)$  – операторные уравнения привода  $Z$ , замкнутого по положению и по скорости соответственно;  $V_Z$  – скорость извлечения стержня;  $G_C$  – сила тяжести ТВС;  $k_{\text{РП}}$  и  $k_{\text{РС}}$  – коэффициенты передачи регуляторов положения и силы привода  $Z$ .

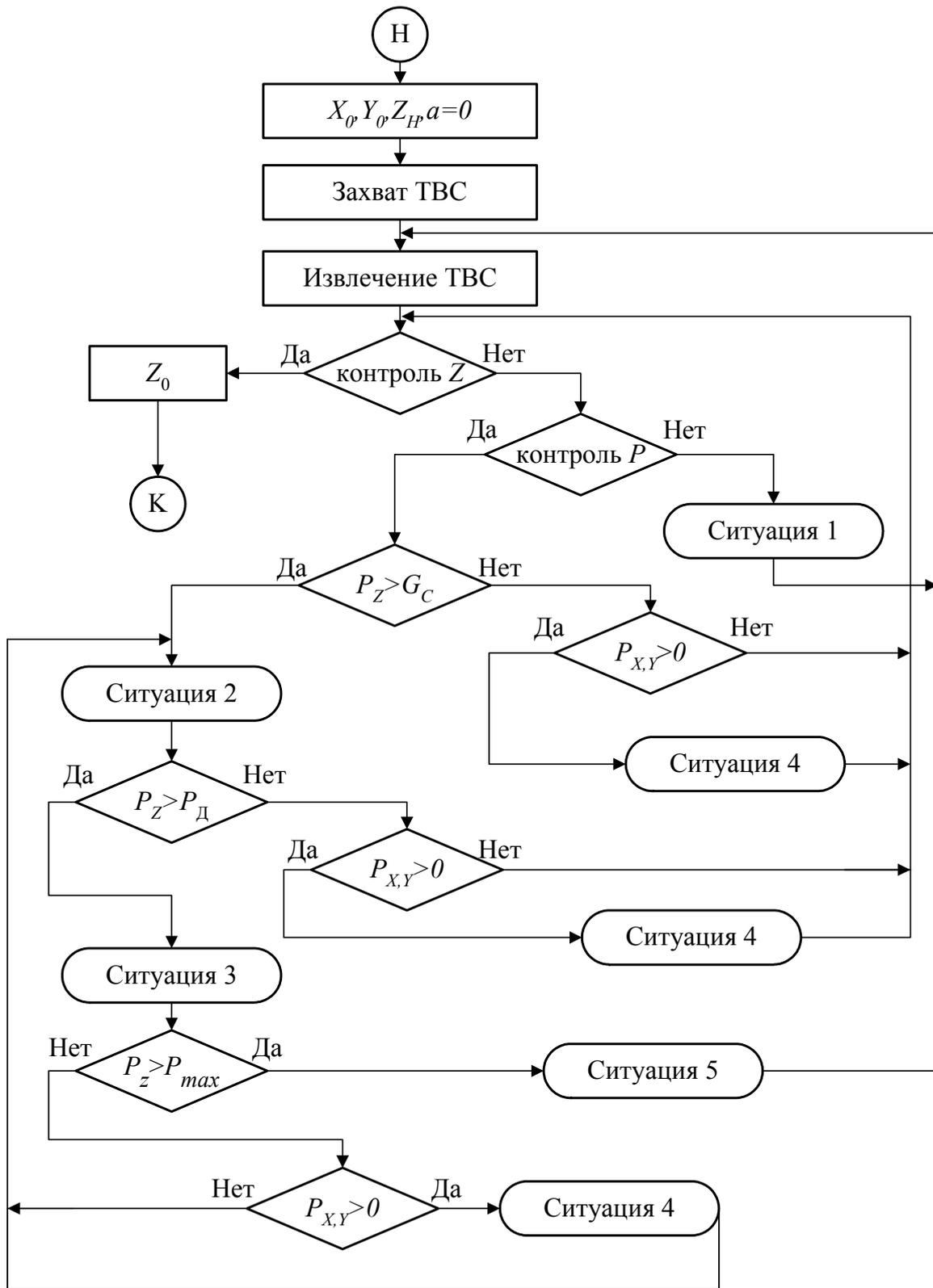


Рис. 3.8. Алгоритм выполнения операции извлечения ТВС из ячейки контейнера

Дополнительные координатные составляющие перемещения по осям  $X$  и  $Y$  определяются следующим образом:

$$x_{\text{д}} = \begin{cases} 0 \forall |P_x| < P_{x0}; \\ +\Delta X \forall \text{sign}(P_x - P_{x0}) = 1; \\ -\Delta X \forall \text{sign}(P_x - P_{x0}) = -1; \end{cases} \quad y_{\text{д}} = \begin{cases} 0 \forall |P_y| < P_{y0}; \\ +\Delta Y \forall \text{sign}(P_y - P_{y0}) = 1; \\ -\Delta Y \forall \text{sign}(P_y - P_{y0}) = -1, \end{cases}$$

где  $P_{x0}, P_{y0}, P_x, P_y$  – пороговые и текущие значения сил по осям  $X$  и  $Y$  соответственно;  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  – единицы дискреты перемещения, обрабатываемые координатными приводами.

Управление движением по оси  $X$  определяется задающим сигналом  $g_X(x_0, x_{\text{д}}, P_Z, P_X, S_{\text{max}})$  вида

$$g_X = \begin{cases} x_0 \wedge \Phi_{G_X}(p) \quad \forall |P_X| < P_{x0}; \\ x_0 + \sum_{i=1}^n x_{\text{д}} \wedge \Phi_{G_X}(p) \quad \forall |P_X| > P_{x0} \wedge P_X = 0 \wedge S < S_{\text{max}}; \\ k_x(P_Z)(x_0 + \sum_{i=1}^n x_{\text{д}}) \wedge \Phi_{G_X}(p) \quad \forall P_Z > 0 \wedge S < S_{\text{max}}; \\ x_0 + x_S \wedge \Phi_{G_X}(p) \quad \forall P_Z > 0 \wedge S = S_{\text{max}}, \end{cases}$$

где  $\Phi_{G_X}(p)$  – операторное уравнение привода  $X$ , замкнутого по положению;  $k_x(P_Z)$  – коэффициент обратно пропорциональной взаимосвязи величины силы по оси  $Z$  и смещения по оси  $X$ ;  $S$  и  $S_{\text{max}}$  – соответственно текущее и максимально возможное отклонения осей схвата робота и ячейки контейнера;  $x_S$  – проекция предельного отклонения  $S_{\text{max}}$  для текущей величины подъёма стержня на горизонтальную ось.

Аналогичным образом формируется переключательная функция управления обеспечением движения и по оси  $Y$ :

$$g_Y = \begin{cases} y_0 \wedge \Phi_{G_Y}(p) \quad \forall |P_Y| < P_{y0}; \\ y_0 + \sum_{j=1}^k y_{\text{д}} \wedge \Phi_{G_Y}(p) \quad \forall |P_Y| > P_{y0} \wedge P_Y = 0 \wedge S < S_{\text{max}}; \\ k_y(P_Z)(y_0 + \sum_{j=1}^k y_{\text{д}}) \wedge \Phi_{G_Y}(p) \quad \forall P_Z > 0 \wedge S < S_{\text{max}}; \\ y_0 + y_S \wedge \Phi_{G_Y}(p) \quad \forall P_Z > 0 \wedge S = S_{\text{max}}, \end{cases}$$

где  $\Phi_{G_Y}(p)$  – операторное уравнение привода  $Y$ , замкнутого по положению;  $k_y(P_Z)$  – коэффициент взаимосвязи;  $y_S$  – проекция предельного отклонения  $S_{\text{max}}$ .

Управление  $g_X$  и  $g_Y$  имеет место только в том случае, когда суммарное поперечное смещение

$$S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \Delta X\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^k \Delta Y\right)^2}$$

не превышает максимального возможного отклонения координатных осей ячейки и ТВС, определяемого как

$$S_{\max} = \frac{D_{\text{ЭФФ}_\gamma} - d_C}{2}.$$

Здесь  $d_C$  – паспортный диаметр ТВС;  $D_{\text{ЭФФ}_\gamma}$  – эффективный диаметр ячейки, определяемый максимально возможным углом отклонения ТВС от вертикальной оси  $\gamma$ , зависящим, в свою очередь, от длины оставшейся в ячейке части ТВС:

$$D_{\text{ЭФФ}_\gamma} = \begin{cases} D_\gamma & \forall z_i = z_H; \\ k_\gamma \frac{(z_0 - z_H)}{(z_0 - z_i)} & \forall z_H < z_i < z_0, \end{cases}$$

где  $D_\gamma$  – диаметр ячейки;  $k_\gamma$  – коэффициент пропорциональности.

Функция управления  $g_\alpha$  поворотом ТВС вокруг оси  $\alpha$  имеет место при невозможности продолжения операции извлечения и определяется как

$$g_\alpha = \begin{cases} 0 \forall P_Z \neq G_C; \\ \pm \Delta \alpha \wedge \Phi_{G_\alpha}(p) \forall P_Z = G_C \wedge z_i = z_{n1}, \end{cases}$$

где  $\Phi_{G_\alpha}(p)$  – операторное уравнение привода  $\alpha$ , замкнутого по положению;  $z_{n1}$  – значение координаты.

### 3.2. АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СБОРКОЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Разрывный закон управления можно трактовать как набор взаимовключающих управлений для непрерывных подзадач. Например, при декартовой системе координат сборочного робота по осям  $X$ ,  $Y$  осуществляется позиционное управление, а по оси  $Z$  – силовое или позиционное.

Рассмотрим некоторые алгоритмы сопряжения цилиндрических объектов типа «вал – втулка». Предположим, что путем пробного наклона вала

определена прямая  $AB$  (рис. 3.9) в плоскости  $XOY$  или найдено положение направляющей фаски. При линейной интерполяции прямой  $AB$  в плоскости  $XOY$ , например по методу оценочной функции, управляющие сигналы на ЭП по осям  $X, Y$  определяются выражениями:

$$U_x = \begin{cases} U_0 & \forall S > 0; \\ 0 & \forall S < 0; \end{cases} \quad U_y = \begin{cases} U_0 & \forall S < 0; \\ 0 & \forall S > 0, \end{cases}$$

где  $S = S(X, Y)$  – непрерывная функция, обладающая непрерывными частными производными  $dS/dx, dS/dy$ , а  $S = \langle X, Y \rangle: S(x, y) = 0$  – гладкая кривая.

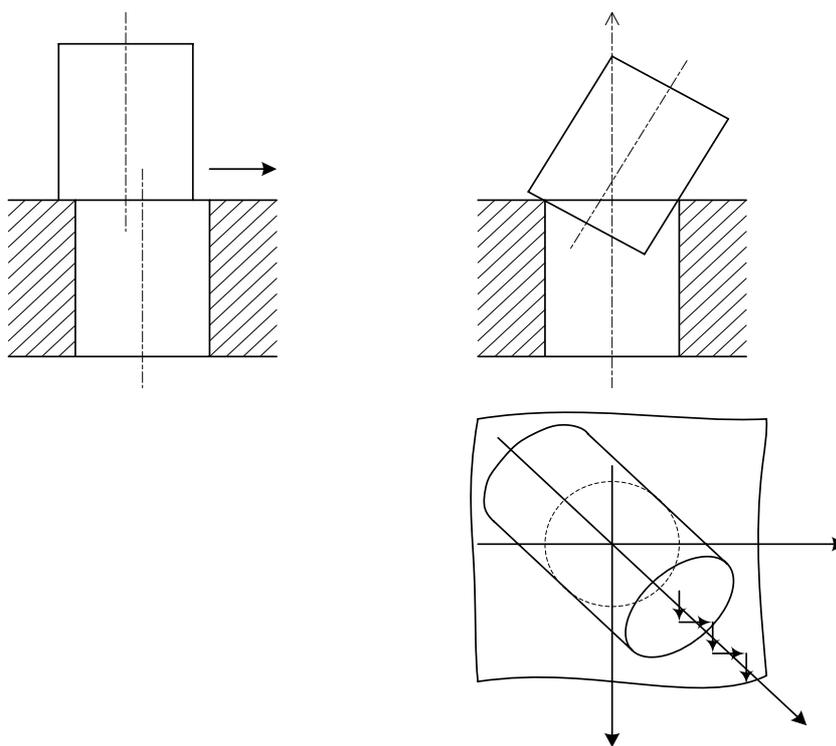


Рис. 3.9. Схема определения направления перемещения объекта

Если образующая поверхности фаски является некоторой кривой, то управление ЭП осуществляется сигналами вида

$$U_x(t) = \begin{cases} U_0 & \forall -\frac{dS}{dY} > 0 \wedge S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} > 0; \\ -U_0 & \forall -\frac{dS}{dY} < 0 \wedge S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} > 0; \\ 0 & \forall S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} < 0; \end{cases}$$

$$U_y(t) = \begin{cases} U_0 & \forall \frac{dS}{dY} > 0 \wedge S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} < 0; \\ -U_0 & \forall -\frac{dS}{dY} < 0 \wedge S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} < 0; \\ 0 & \forall S \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dS}{dY} > 0. \end{cases}$$

Управление претерпевает разрывы первого рода при равенстве нуля функции

$$P(x, y) = S(x, y) \frac{dS(x, y)}{dx} \frac{dS(x, y)}{dy}.$$

При реализации системы достаточно определять для формирования  $U = \langle U_x, U_y \rangle$  не  $\frac{dS}{dx}$  и  $\frac{dS}{dy}$ , а  $\text{sgn } x = \pm \frac{dS(x, y)}{dy}$ ;  $\text{sgn } y = \pm \frac{dS(x, y)}{dx}$ .

Приводы робота вдоль оси  $Z$  должны при этом создавать постоянное давление одного объекта на другой и исключать возможность перекоса осей. Тогда при совпадении осей объектов произойдет сборка.

Если при пробном наклоне объекта определено не только направление перемещения, но и его величина  $S_k$ , то во время программного движения вдоль прямой  $S$  объект по оси  $Z$  приподнят или, по крайней мере, не прижимается дополнительной силой.

При организации программного движения с линейной интерполяцией по методу оценочной функции вдоль некоторой предварительно определенной эквидистанты (смещенной фаски)  $AB$  (рис. 3.10) первоначально осуществляется установочное перемещение вдоль оси  $Z$ . Если точка  $C$  совпадает с эквидистантной ( $S = 0$ ), то организуется поочередное перемещение схвата робота с объектом или сборочного стола с закрепленной втулкой вдоль оси  $X$  на величину  $\Delta x = \delta_\Gamma / 2$  и объекта вдоль оси  $Z$  до тех пор, пока не произойдет сопряжение. Так как во время поисковых движений контролируются перемещение объектов и возникающие силы, то управляющие сигналы для ЭП по оси  $X$  и  $Z$  равны [27]:

$$U_x = \begin{cases} U_0 \forall S < 0; \\ 0 \forall S > 0; \end{cases} \quad U_y = \begin{cases} 0 \quad \forall S < 0 \wedge U_x \neq 0; \\ U_g \quad \forall S < 0 \wedge U_x = 0, F_z \geq F_g; \\ U_0 \quad \forall S > 0 \wedge F_g, \end{cases}$$

где  $U_g$  – управляющий сигнал, определяющий допускаемое значение силы контакта  $F_g$ .

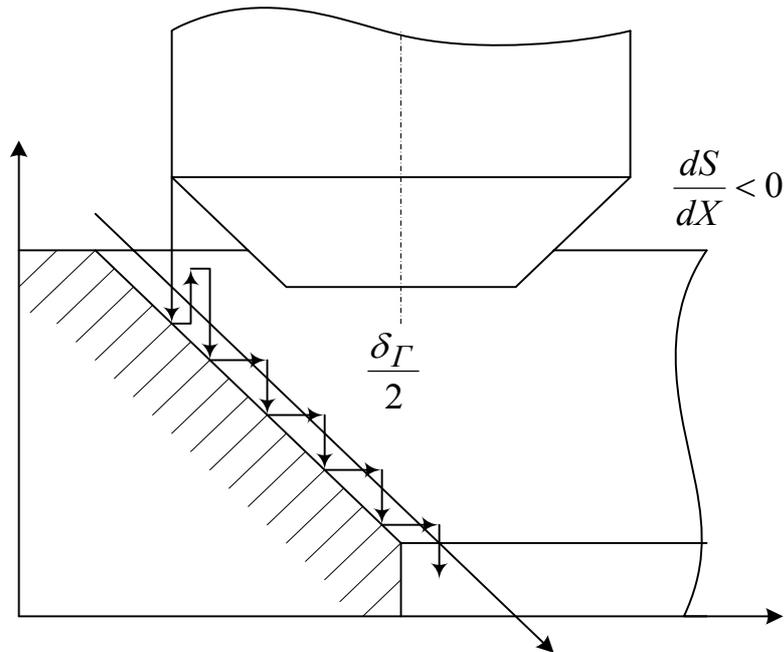


Рис. 3.10. Схема перемещения одного объекта относительно поверхности другого

Переход с управления по перемещению на управление по силе происходит в момент касания объектов в соответствии с блок-схемой алгоритма, изображенной на рис. 3.11.

Предположим, что центры сопрягаемых объектов совпадают в плоскости  $XOZ$  (рис. 3.12). Тогда возможны два варианта организации процесса сопряжения деталей. В первом случае привод  $X$  осуществляет движение с постоянной скоростью  $V_x$ , а привод  $Z$  прижимает объекты с постоянной силой и преобразует неударживающую связь в ударживающую. Во втором случае за направлением движения принимают идентифицированное направление фаски  $S$ .

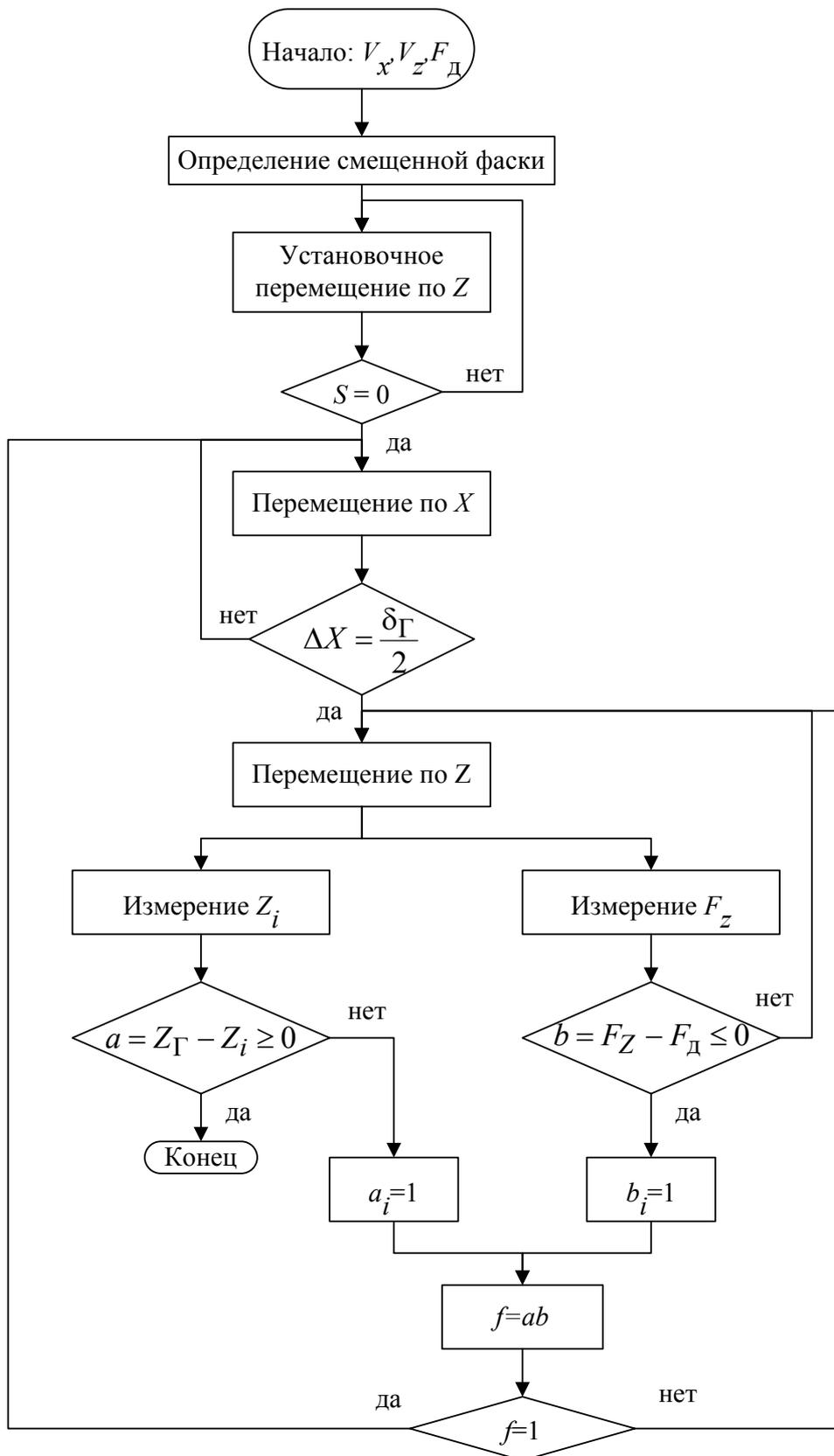


Рис. 3.11. Блок-схема алгоритма сопряжения объектов с линейной интерполяцией смещенной фаски по методу оценочной функции

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 следующим образом:

$$U_x = \begin{cases} U_0 & \forall S \geq 0 \wedge F_x = 0, U_z = 0; \\ -U_0 & \forall S \geq 0 \wedge F_x \neq 0, U_z = 0; \\ 0 & \forall U_z \neq 0; \end{cases} : \Delta x \leq \frac{\delta_\Gamma}{2};$$

$$U_z = \begin{cases} U_0 = \Delta x \cdot \operatorname{tg} \varphi & \forall S > 0 \wedge F_z = 0; U_x = 0; \\ U_g & \forall S = 0 \wedge F_z \neq 0, U_x = 0; \\ 0 & \forall S \geq 0 \wedge F_z = 0, U_x \neq 0, \end{cases}$$

где  $\delta_\Gamma$  – гарантированный зазор;  $\varphi$  – угол наклона фаски.

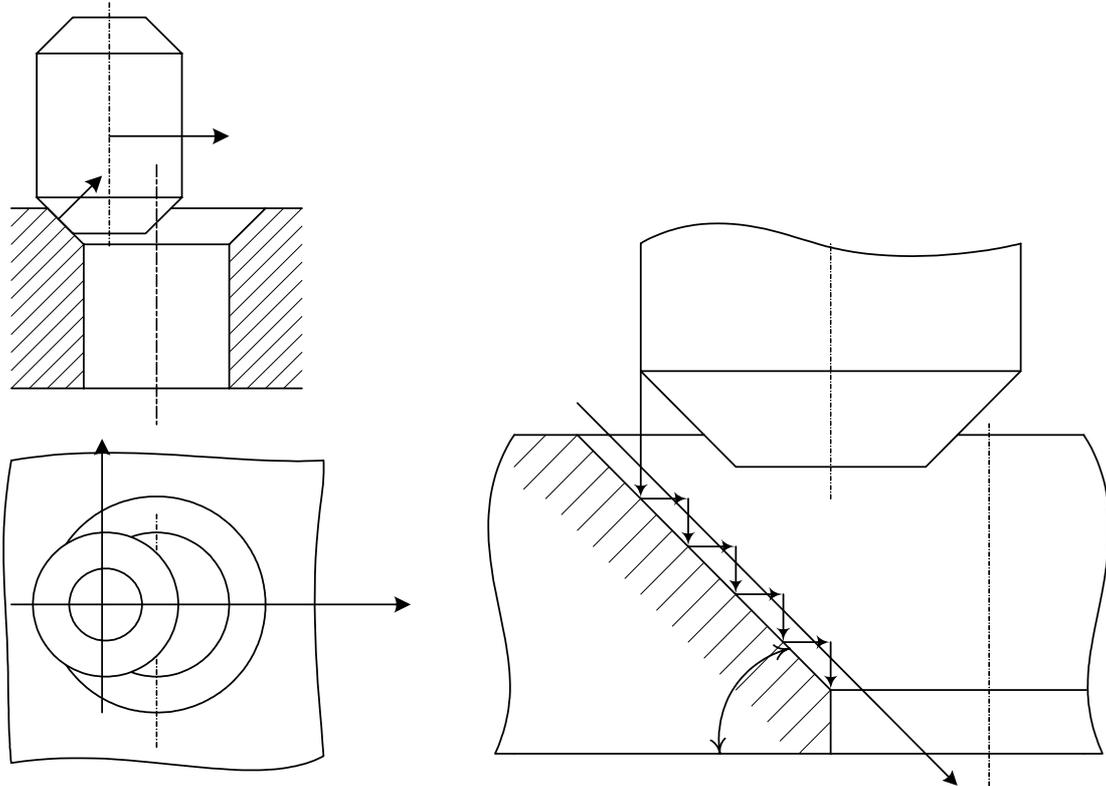


Рис. 3.12. Схема сопряжения объектов вдоль идентифицированной фаски

Если центры сопрягаемых объектов с направляющей фаской не совпадают по обеим осям, то после определения направления движения в результате пробного наклона производят сопряжение объектов согласно алгоритму, аналогичному представленному на рис. 3.13, при условии двухрежимного управления приводами горизонтального перемещения.

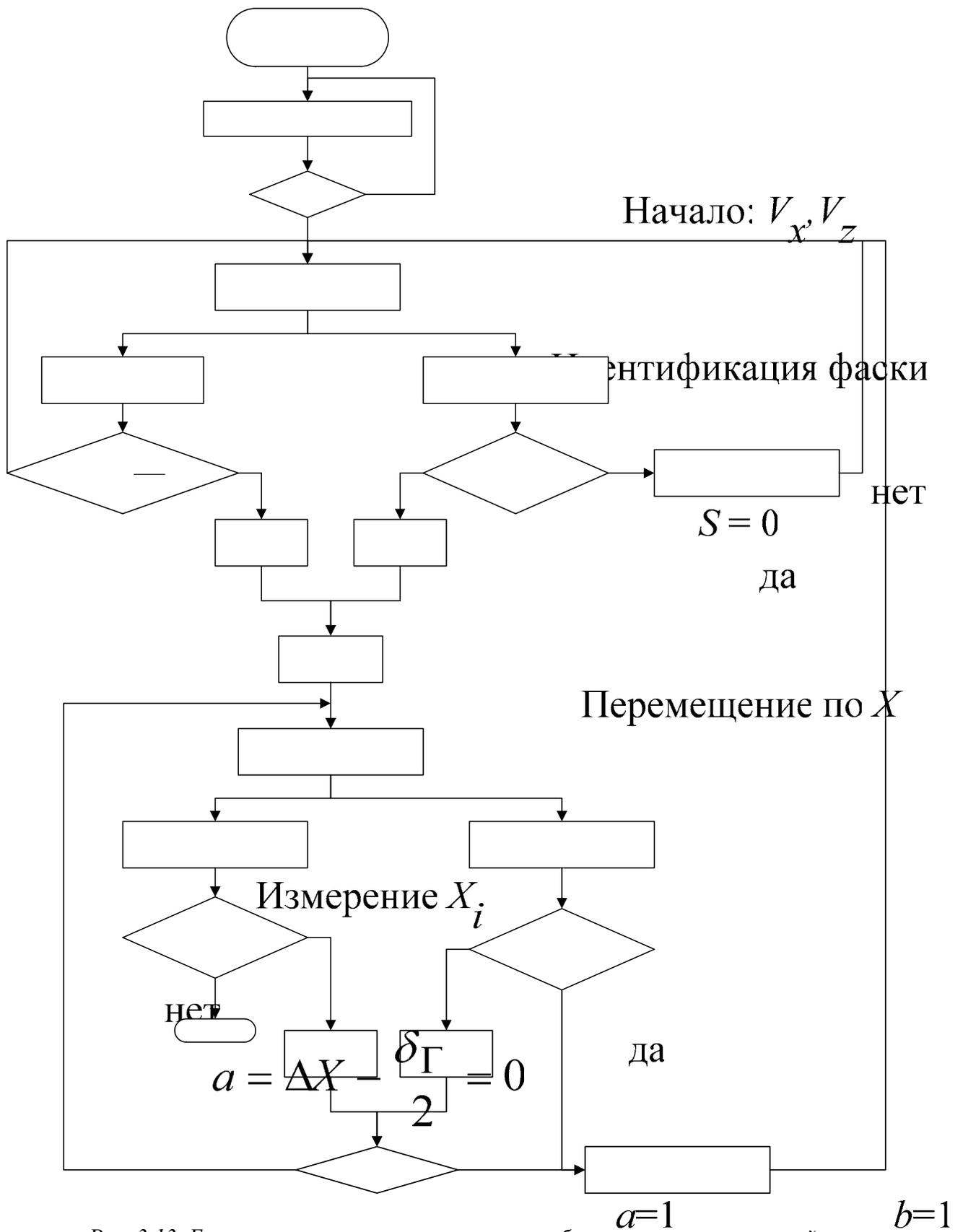


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритма сопряжения объектов с интерполяцией вдоль идентифицированной фаски

Управление приводами горизонтального перемещений формируется по следующим законам:

$$U_x = \begin{cases} U_0 & \forall S < 0 \wedge F_x = 0; \\ -U_0 & \forall S < 0 \wedge F_x \neq 0; \\ F_g & \forall S > 0 \wedge F_x = 0; \\ -F_g & \forall S > 0 \wedge F_x \neq 0; \end{cases} \vee 0 \forall S < 0;$$

$$U_y = \begin{cases} U_0 & \forall S > 0 \wedge F_y = 0; \\ -U_0 & \forall S > 0 \wedge F_y \neq 0; \\ F_g & \forall S < 0 \wedge F_y = 0; \\ -F_g & \forall S < 0 \wedge F_y \neq 0; \end{cases} \vee 0 \forall S > 0.$$

Привод вертикального перемещения осуществляет движение, создавая вдоль оси  $Z$  постоянную силу.

Если для реализации алгоритма контурного управления применяются позиционные или скоростные ЭП, то они должны обладать регулируемой податливостью или иметь возможность динамической коррекции (адаптации) позиционного управляющего сигнала в функции реакций связи на основе применения устройства идентификации связей или эталонных моделей. Возможно применение ЭП с одновременной адаптацией податливости и позиционного управляющего сигнала. В качестве ЭП вертикальных перемещений, а иногда и приводов горизонтальных перемещений применяются позиционно-скоростные или позиционно-силовые приводы.

Избежать необходимости применения устройств точных перемещений при реализации алгоритма сборки по методу усреднения и усложнения приводов при реализации алгоритмов контурного управления с использованием информации о реакциях связи позволяет алгоритм управления процессом сборки на основе информации только о знаке проекций вектора силы [30].

Предположим, что расположение объектов перед началом поиска соответствует положению, достигнутому с помощью системы позиционного управления ПР путем перевода движения ЭП вертикальной координаты  $Z$  с транспортной скорости на скорость установочных перемещений до сопри-

косновения собираемых объектов. В момент, когда вертикальная сила  $F_z$  достигает требуемой (дозированной) величины  $F_{3z}$ , движение прекращается и ЭП вертикального перемещения обеспечивает давление одного объекта на другой с постоянной силой  $F_k$ . Начиная с этого момента времени ЭП горизонтальных координат ПР осуществляют произвольное перемещение в направлении свободного хода с одновременным движением вдоль оси  $Z$  с величиной допустимой силы  $F_g$  сборки.

При фиксации останова ЭП одной из координат  $X, Y$ , который происходит при достижении силой на соответствующих осях  $F_x, F_y$  значения большего чем  $F_g$ , осуществляется реверс данного привода. ЭП другой координаты при этом продолжает перемещение. При останове второго ЭП горизонтальных перемещений произойдет его реверс, а первый ЭП продолжает перемещение и т.д., т.е. ЭП координат  $X$  и  $Y$  независимо друг от друга совершают возвратно-поступательные движения с постоянными, в общем случае, неравными 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 полное сопряжение объектов.

Существуют системы управления, позволяющие выполнять сопряжение деталей без точных вычислений сил и моментов. В этих системах преднамеренно формируются периодические движения по всем осям, кроме подающей, вызывающие освобождение сопрягаемых объектов от связей. Формирование законов движения степеней подвижности манипулятора осуществляется по специальной программе. Функциональная схема системы управления, реализующей предложенный метод, представлена на рис. 3.14.

Система помимо основного блока задания программы (БЗП) содержит генератор импульсов  $G$ , элемент И, блок сравнения БС и  $RS$ -триггер, а в составе каждой из управляемых координат  $A...N$  делители частоты  $dF$  и напряжения  $dU$ , ключи  $K1...K3$ , пороговые элементы ПЭ и инверторы НЕ.

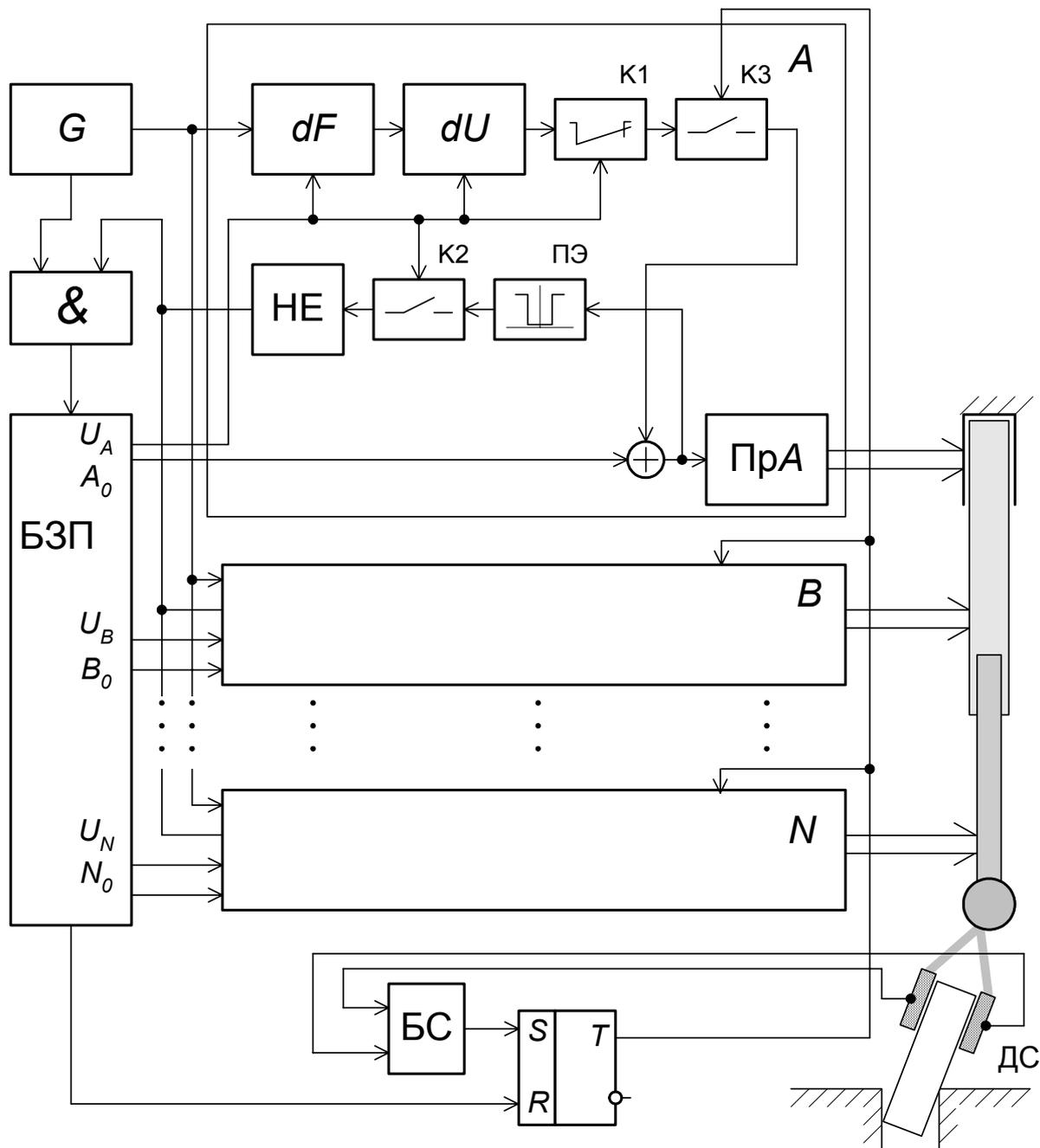


Рис. 3.14. Функциональная схема системы управления процессом установки

Устройство работает следующим образом. Перед началом работы БЗП настраивает делители  $dF$  и  $dU$  на требуемые частоту и амплитуду, причём частота выбирается в пределах полосы пропускания системы и тем выше, чем дальше управляемые координаты расположены от опоры манипулятора. Амплитуда должна превышать сумму кинематических неточностей данного движения и величину зазора между сопрягаемыми деталями.

Одна из координат  $A...N$  используется в качестве подающей. Критерием выбора служит минимальный угол между вектором скорости, которую сообщает данное движение объекту, и вектором сопряжения. Выбор заканчивается переключением ключей  $K1$  и  $K2$ . При этом для выбранного подающего движения разрывается цепь сигнала, вызывающего колебательные движения, а на второй вход элемента  $И$  подаётся сигнал с выхода элемента  $НЕ$ . Сопряжение деталей происходит по заданной БЗП программной траектории. Приводы  $A...N$  содержат в своём составе датчики положения координат и датчики силы. Ошибки малы, и пороговый элемент ПЭ вместе с элементом  $НЕ$  обеспечивают подачу на вход элемента  $И$  логической единицы, благодаря чему импульсы с задающего генератора  $G$  проходят на вход БЗП, обеспечивая его работу в требуемом темпе.

В момент касания сопрягаемых объектов возникает разность сигналов с датчиков силы  $ДС$ , расположенных на правой и левой губках схвата. На выходе блока сравнения  $БС$  появляется сигнал, вызывающий переход  $RS$ -триггера в единичное состояние, которое в свою очередь замыкает ключ  $K3$ , обеспечивая тем самым пространственные колебательные движения всех координат, кроме подающей.

Величина реального перемещения каждого движения оказывается меньше амплитуды, задаваемой  $dU$ , поэтому при достижении крайних положений следящие приводы ограничивают величину развиваемого момента и тем самым обеспечивают защиту устанавливаемого стержня от разрушения. Одновременно, по мере отработки программного перемещения начинает расти ошибка следящего привода подающего движения, а при достижении её величины, соответствующей выходу привода на ограничение момента, срабатывает ПЭ и на выходе элемента  $НЕ$  формируется логический нуль. Работа БЗП приостанавливается, и на входах сумматоров всех движений фиксируются сигналы, соответствующие моменту перегрузки. При этом подающий привод развивает момент, соответствующий уставке для данного движения, а в результате колебательных движений остальных приводов подвижный сопрягаемый объект, зажатый в схвате, покачивается относительно контейнера, поочерёдно меняя фазу взаимного перекося. В моменты времени, соответствующие крайним положениям в движении

объекта, т. е. в положении упора одного объекта в другой, взаимное перемещение ввиду заклинивания невозможно. При смене фазы упора подвижный объект проходит положение, соответствующее промежутку между двумя упорами, и тем самым оказывается свободным от силовых связей, налагаемых неподвижным объектом. В течение времени, соответствующего движению между двумя упорами подающего движения, производится аксиальное перемещение сопрягаемых деталей, ошибка следящего привода подающего движения уменьшается, пороговый элемент ПЭ возвращается в исходное состояние и на выходе элемента И снова появляются импульсы, вызывающие продолжение работы БЗП до тех пор, пока ошибка опять не превысит пороговое значение. Затем процесс повторяется до окончания процесса сопряжения и БЗП сбрасывает  $RS$ -триггер в исходное состояние. Предлагаемый алгоритм позволяет осуществлять сборочный процесс при достаточно больших отклонениях во взаимном расположении деталей и существенно снизить требования к точности и чувствительности информационных устройств робота.

Использование предложенного алгоритма для робота, работающего в декартовой системе координат, упрощает задачу. В этом случае подающей координатой является привод по оси  $Z$ , а приводы по горизонтальным осям  $X$  и  $Y$  в позиционно-силовом режиме формируют периодические движения с ограничением развиваемых сил. Функции управления движением  $g_Z$  и  $g_X$  принимают вид:

$$g_Z^* = \begin{cases} z_0 \wedge \Phi_{G_Z}(p) \vee P_Z = G_C; \\ k_{pp} P_{Z1} \wedge \Phi_{P_Z}(p) \vee G_C > P_Z; \end{cases}$$

$$g_X^* = \begin{cases} 0 \vee P_Z = G_C \vee z = z_0; \\ A_X(z, P_X) \sin \omega_X(z)t \wedge \Phi_{P_X}(p) \vee G_C > P_Z \wedge z < z_0, \end{cases}$$

где  $A_X(z, P_X)$  и  $\omega_X(z)$  – соответственно амплитуда и частота периодического движения по горизонтальной оси.

Параметры накладываемых периодических движений определяются как геометрией сопрягаемых объектов, так и их механическими свойствами и в общем случае имеют достаточно сложную зависимость от положе-

ния объектов и сил, возникающих при этом. Так, величина амплитуды колебательного движения обратно пропорциональна развиваемым при взаимодействии силам и тем меньше, чем больше глубина погружения стержня в ячейку контейнера:

$$A_X(z, P_X) = A_0 k_A \frac{z_0 - z}{1 + k_{AX} P_X},$$

где  $A_0$  – максимальная амплитуда колебаний детали типа «вал», определяемая по геометрическим характеристикам этой детали и втулки;  $k_A$ ,  $k_{AX}$  – коэффициенты пропорциональности по амплитуде и силе.

Частота накладываемых колебаний пропорциональна части длины вала, находящегося во втулке, и ограничена только полосой пропускания привода горизонтального перемещения.

$$\omega_X(z) = \frac{\omega_0 k_\omega}{1 + (z_0 - z)},$$

где  $\omega_0$  – максимальная частота периодических движений, определяется добротностью по скорости привода по горизонтальной оси;  $k_\omega$  – коэффициент пропорциональности по частоте.

Аналогичным образом определяются параметры колебаний для функций управления по оси  $Y$  ( $g_Y$ ) и, если это необходимо, для управления приводом поворота схвата робота с валом вокруг своей оси ( $g_\alpha$ ). Алгоритм работы системы при выполнении второго этапа сопряжения с наложением периодических движений представлен на рис. 3.15, а функциональная схема системы, реализующей предложенный алгоритм, – на рис. 3.16. Здесь пороговый элемент ПЭ1 определяет зону нечувствительности по уровню сигнала переключения работы приводов: по оси  $Z$  – в режим дозирования силы, по осям  $X$  и  $Y$  (и поворота  $\alpha$ ) – в позиционно-силовой режим формирования периодических движений.

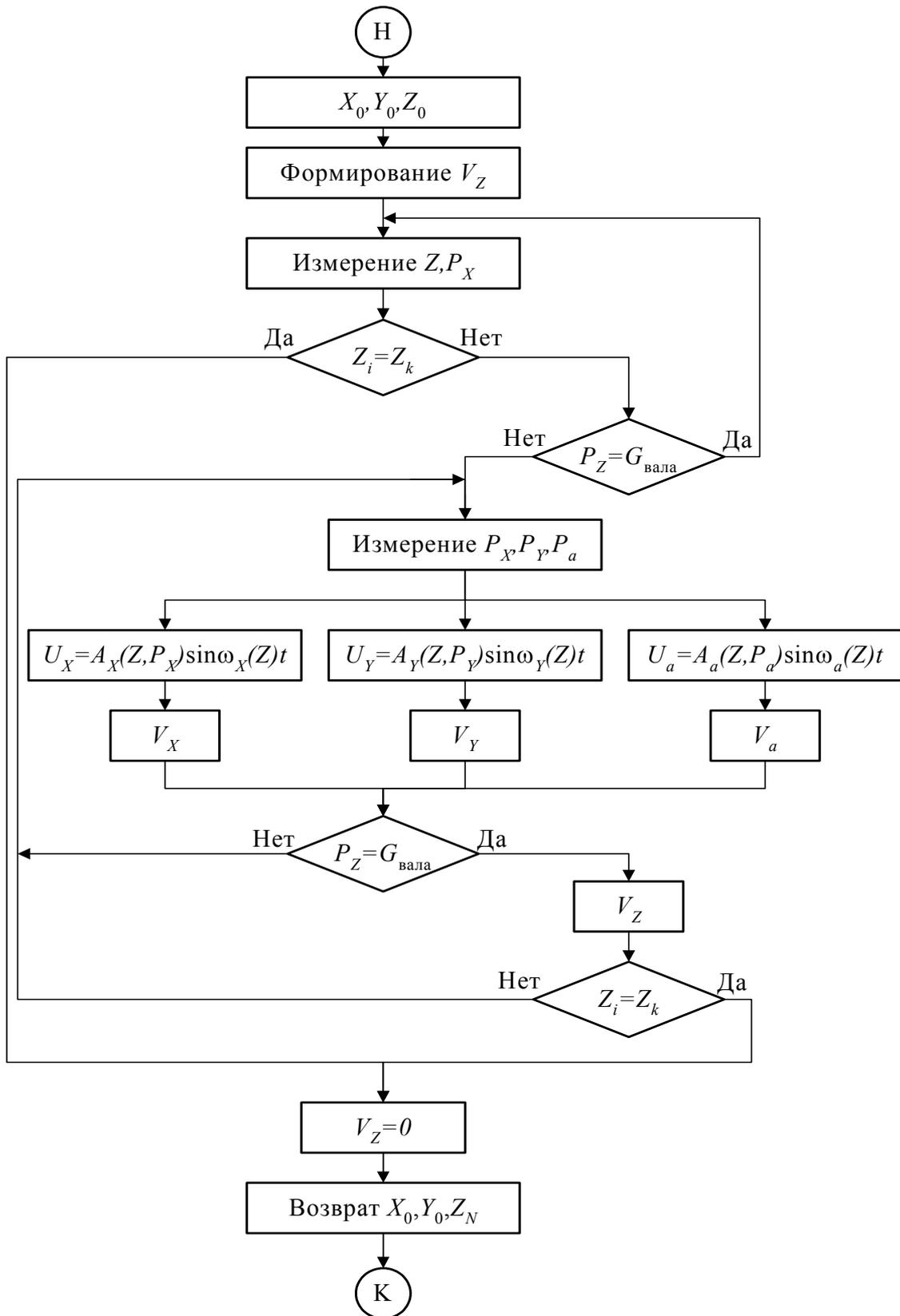


Рис. 3.15. Алгоритм управления сопряжением «вал – втулка» с наложением периодических движений

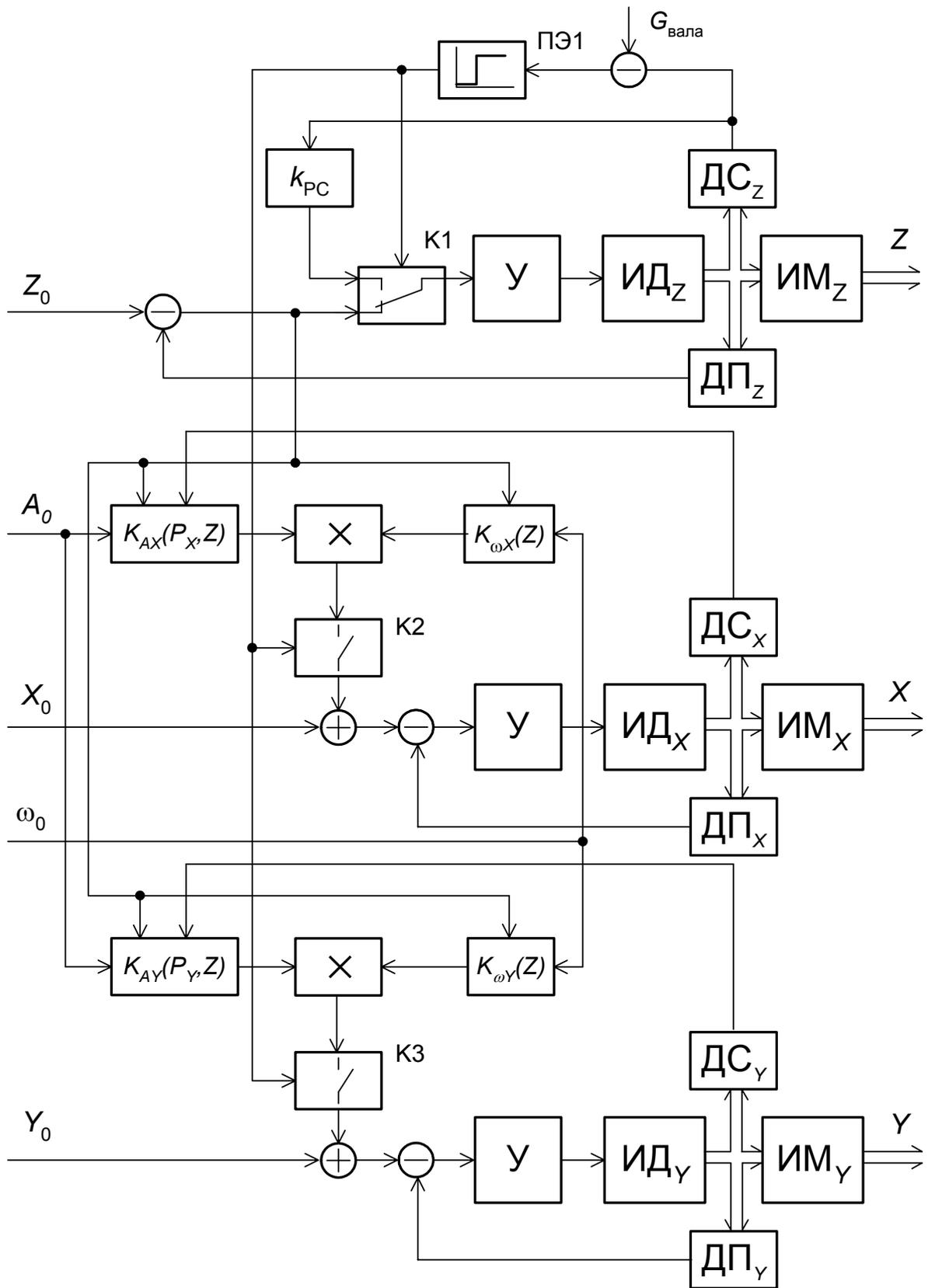


Рис. 3.16. Функциональная схема системы управления установкой вала

### 3.3. АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СБОРКОЙ В УСЛОВИЯХ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

При выполнении этапа точного позиционирования и ориентации может возникнуть одна из сборочных ситуаций, представленных на рис. 2.22 и 2.27. После распознавания первоначальной сборочной ситуации необходимо организовать такое управление, которое обеспечивало бы выход из каждой сборочной ситуации в направлении, указанном на графах. Например, при создавшейся первоначальной сборочной ситуации (см. рис. 2.22, 2), учитывая граф прохождения контактных ситуаций, очевидно, что необходимо обеспечить движение детали по ветвям через точку 5 и далее 7 (конец сборки). Движение по ветвям 2-3-4-7 или 2-3-5-6-7 будет нерациональным.

Алгоритмы управления разрабатываются на основе информации о состоянии объекта сборки. Эта информация поступает с измерительной системы. Формируемое управление подается на приводы по координатам  $X$ ,  $Z$  и  $v$ . Как говорилось выше, приводы должны быть переменной структуры (моментно-позиционными). Необходимо сделать следующее допущение: приводы должны иметь апериодический переходный процесс. Алгоритм управления разрабатывается для каждой контактной ситуации. В исходном состоянии базовая деталь расположена на сборочном столе. Вторая деталь находится в схвате робота. Робот выводит деталь на позицию сборки и приводу по координате вертикального перемещения  $Z$  задается управление по усилию с уставкой  $F_{Z\text{зад}}$ . Деталь перемещается вниз до контакта со второй деталью. При достижении  $F_Z = F_{Z\text{зад}}$  привод останавливается.

Предположим, что из-за погрешностей позиционирования и базирования возникла первая сборочная ситуация (см. рис. 2.22, 1). Далее определяется знак момента  $M_c$  относительно центра вала. Очевидно, если  $M_c < 0$ , то необходимо организовать движение по координате  $X$  с постоянной скоростью  $-V_x$ , а если  $M_c > 0$ , то со скоростью  $+V_x$ . Одновременно осуществляется контроль скорости движения по координате  $Z$ . Если скорость  $V_z = 0$ , то детали находятся в первой контактной ситуации. При выходе из ситуации 1 из-за действия по координате  $Z$  управления  $F_{Z\text{зад}}$  появляется скорость  $V_z$ . Это является информацией о том, что детали перешли в контактную ситуацию 4. В этот момент необходимо выключить привод по коор-

динате  $X$ . Таким образом, алгоритм управления для первой контактной ситуации имеет вид, представленный на рис. 3.17, и описывается уравнениями:

$$V_{3x}(1) = \begin{cases} +V_x \forall M_c > 0 \wedge V_z = 0, \\ -V_x \forall M_c < 0 \wedge V_z = 0, \\ 0 \forall V_z \neq 0; \end{cases}$$

$$V_{3z}(1) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(1) = 0.$$

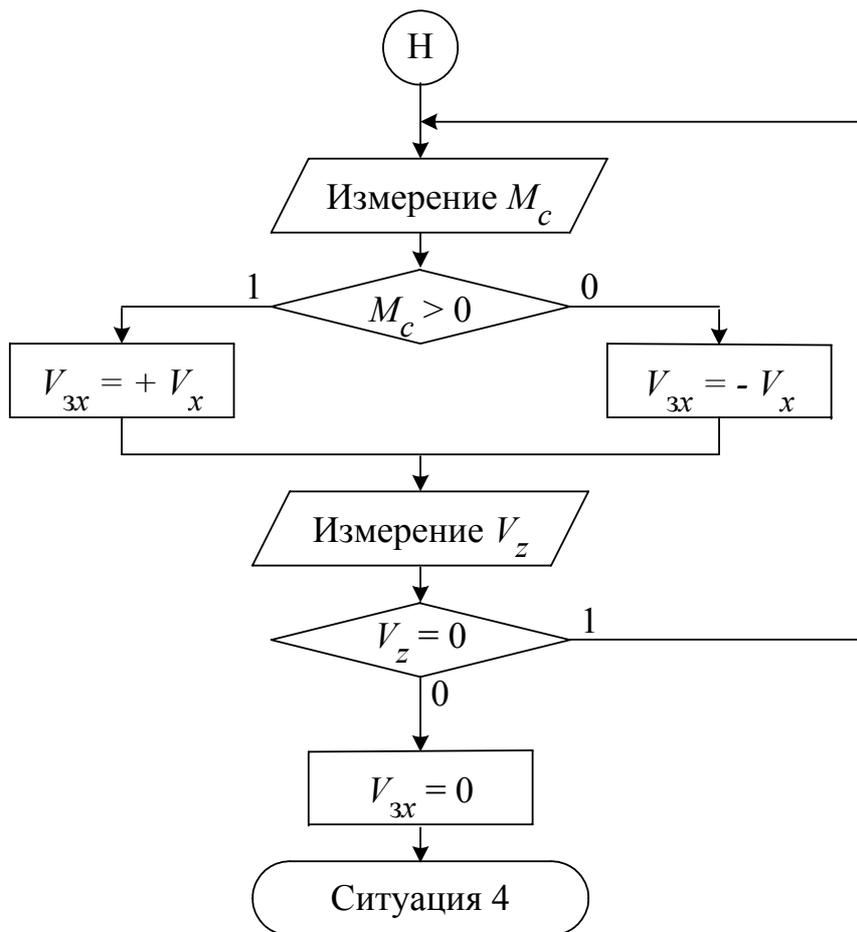


Рис. 3.17. Алгоритм управления для первой сборочной ситуации

Для второй сборочной ситуации необходимо обеспечить управление приводами таким образом, чтобы процесс сборки протекал по ветвям 5-7 графов. Однако в этом случае возможно также возникновение третьей контактной ситуации. Приводу вертикального перемещения по координате  $Z$  задается управление по усилию  $F_{Z\text{зад}}$ . Для выхода из создавшейся ситуации предлагается организовать управление приводом по координате гори-

горизонтального перемещения  $X$  в функции силы. При этом необходимо контролировать координату перемещения  $Z$ , которая информирует о том, произошло ли введение вала в отверстие или возникла ситуация, представленная на рис. 2.22, 3. Алгоритм управления для второй сборочной ситуации представлен на рис. 3.18 и описывается уравнениями:

$$V_{3x}(2) = \begin{cases} -k(F_{3x} - F_x) \forall M_c > 0 \wedge V_x \neq 0 \wedge Z \geq H, \\ +k(F_{3x} - F_x) \forall M_c < 0 \wedge V_x \neq 0 \wedge Z \geq H, \\ 0 \forall Z \geq H \wedge V_x = 0 \vee Z < H; \end{cases}$$

$$V_{3z}(2) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(2) = 0.$$

Аналогично получены алгоритмы управления приводами для сборочных ситуаций 3...6, обеспечивающие завершение сборочного процесса.

Третья сборочная ситуация:

$$V_{3x}(3) = 0;$$

$$V_{3z}(3) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(3) = \begin{cases} +k(M_{3v} - M_v) \forall F_x > 0 \wedge M_c < M_{cn}, \\ -k(M_{3v} - M_v) \forall F_x < 0 \wedge M_c > -M_{cn}, \\ 0 \forall M_c \geq M_{cn} \vee M_c \leq -M_{cn}. \end{cases}$$

Четвертая сборочная ситуация:

$$V_{3x}(4) = \begin{cases} -k(F_{3x} - F_x) \forall M_c > 0 \wedge V_x \neq 0 \wedge Z \neq 0, \\ +k(F_{3x} - F_x) \forall M_c < 0 \wedge V_x \neq 0 \wedge Z \neq 0, \\ 0 \forall Z < H \wedge V_x = 0 \vee Z = 0; \end{cases}$$

$$V_{3z}(4) = \begin{cases} k(F_{3z} - F_z) \forall Z \neq 0, \\ 0 \forall Z = 0; \end{cases}$$

$$\omega_{3v}(4) = 0.$$

Пятая сборочная ситуация:

$$V_{3x}(5) = \begin{cases} -k(F_{3x} - F_x) \forall M_c > 0 \wedge V_z \neq 0 \wedge Z \neq 0, \\ +k(F_{3x} - F_x) \forall M_c < 0 \wedge V_z \neq 0 \wedge Z \neq 0, \\ 0 \forall Z < H \wedge V_z = 0 \vee Z = 0; \end{cases}$$

$$V_{3z}(5) = \begin{cases} k(F_{3z} - F_z) \forall Z \neq 0, \\ 0 \forall Z = 0; \end{cases}$$

$$\omega_{3v}(5) = 0.$$

Шестая сборочная ситуация:

$$V_{3x}(6) = \begin{cases} -k(F_{3x} - F_x) \forall F_x > 0 \wedge Z \neq 0, \\ +k(F_{3x} - F_x) \forall F_x < 0 \wedge Z \neq 0, \\ 0 \forall Z = 0; \end{cases}$$

$$V_{3z}(6) = \begin{cases} k(F_{3z} - F_z) \forall Z \neq 0, \\ 0 \forall Z = 0; \end{cases}$$

$$\omega_{3v}(6) = \begin{cases} -k(M_{3v} - M_v) \forall F_x > 0 \wedge Z \neq 0, \\ +k(M_{3v} - M_v) \forall F_x < 0 \wedge Z \neq 0, \\ 0 \forall Z = 0. \end{cases}$$

Блок-схемы алгоритмов управления представлены на рис. 3.19 – 3.22.

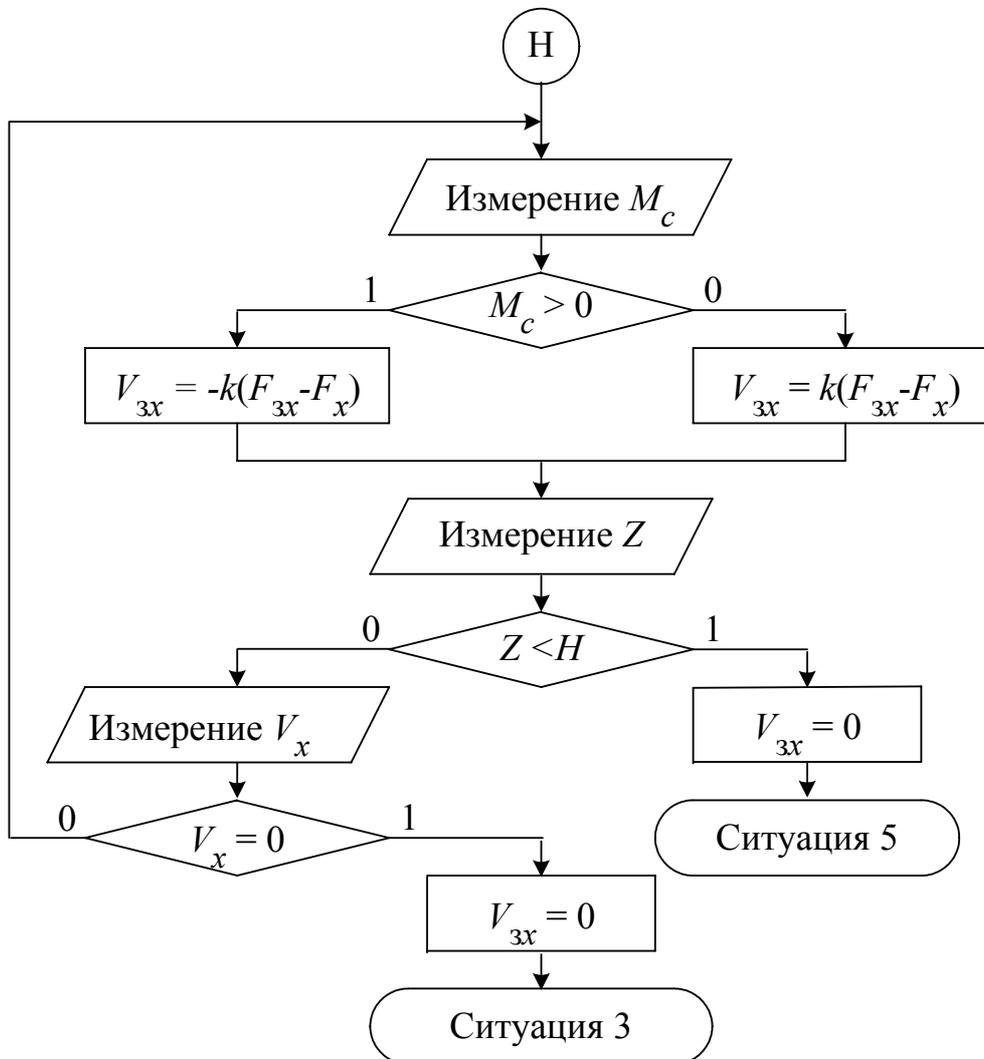


Рис. 3.18. Алгоритм управления для второй сборочной ситуации

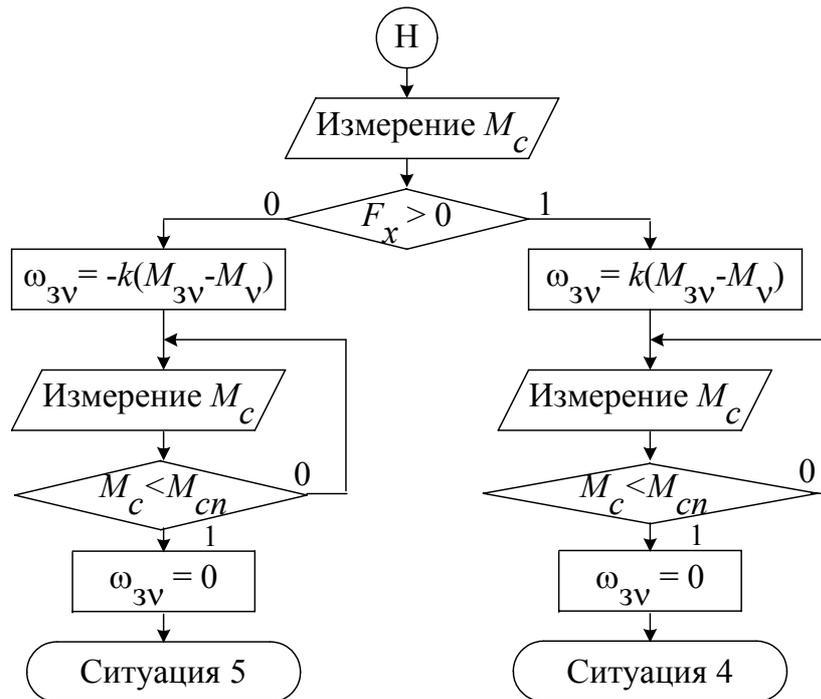


Рис. 3.19. Алгоритм управления для третьей сборочной ситуации

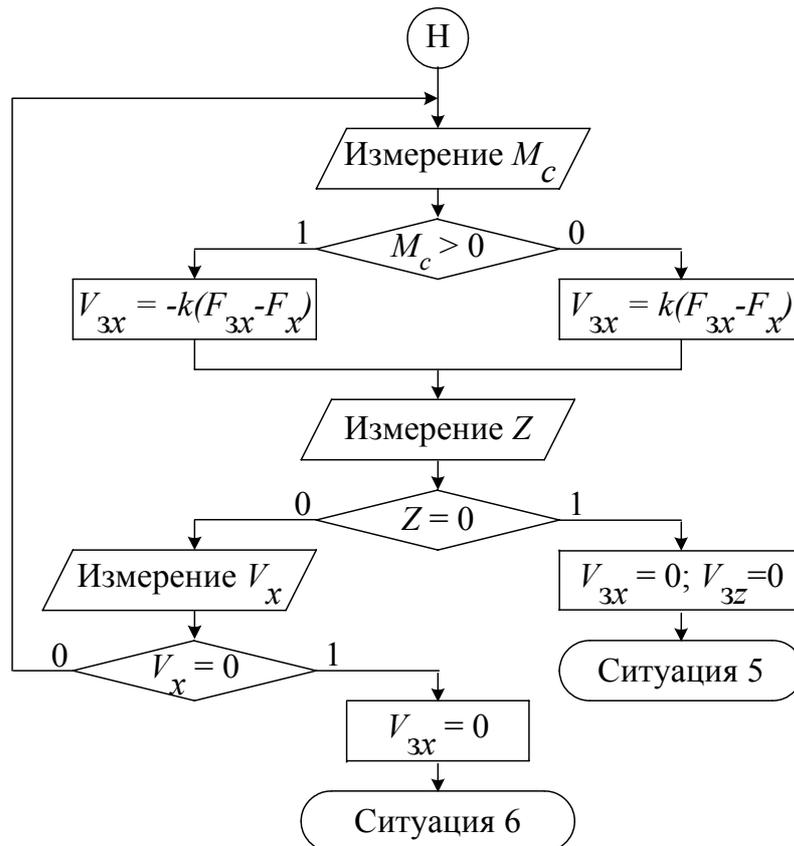


Рис. 3.20. Алгоритм управления для четвертой сборочной ситуации

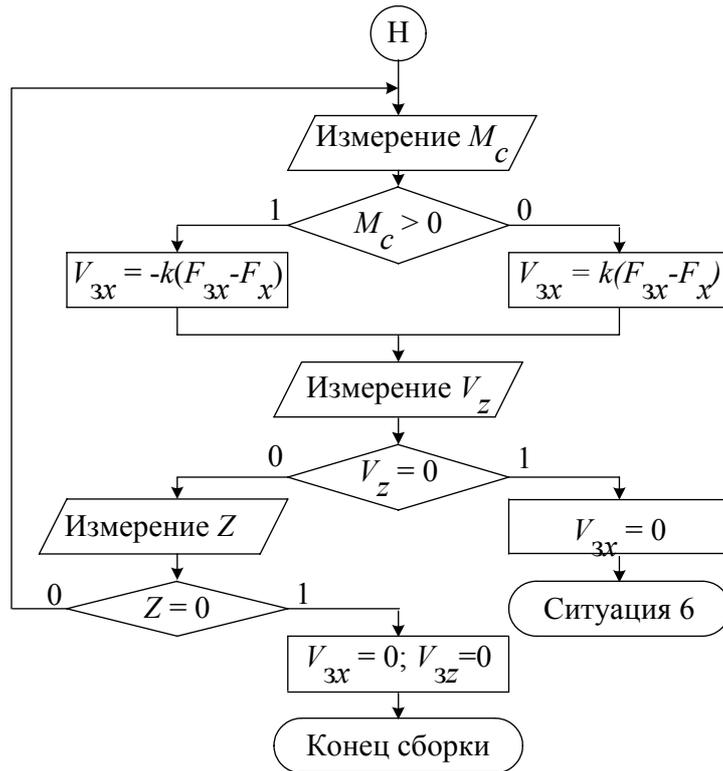


Рис. 3.21. Алгоритм управления для пятой сборочной ситуации

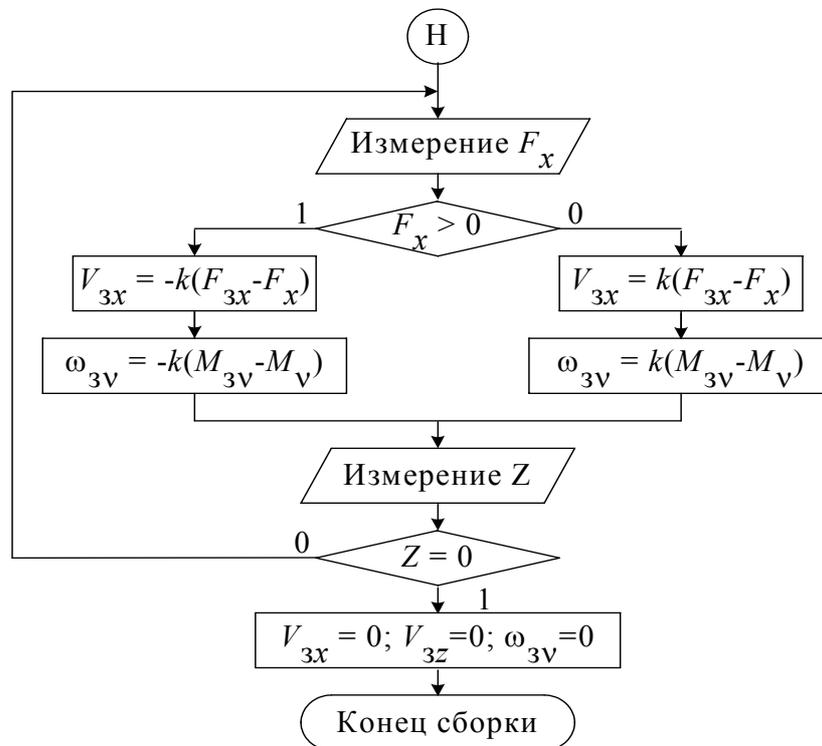


Рис. 3.22. Алгоритм управления для шестой сборочной ситуации

Как было рассмотрено выше, введение технологических фасок на собираемых деталях позволяет исключить наиболее опасную третью сборочную ситуацию (см. рис. 2.22, 3), в которой возможно заклинивание деталей. Но при этом появляются дополнительные сборочные ситуации 1а и 2а (см. рис. 2.27). Алгоритмы управления для деталей с фасками для 4, 5, 6 сборочных ситуаций являются аналогичными алгоритмам для деталей без фасок, а для сборочных ситуаций 1, 1а, 2, 2а записываются в виде:

Сборочная ситуация 1:

$$V_{3x}(1) = \begin{cases} +V_x \forall M_c > 0 \wedge V_z = 0, \\ -V_x \forall M_c < 0 \wedge V_z = 0, \\ 0 \forall V_z \neq 0; \end{cases}$$

$$V_{3z}(1) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(1) = 0.$$

Сборочная ситуация 1а:

$$V_{3x}(1a) = \begin{cases} -k(F_{3x} - F_x) \forall M_c > 0 \wedge Z > H, \\ +k(F_{3x} - F_x) \forall M_c < 0 \wedge Z < H, \\ 0 \forall Z \leq H; \end{cases}$$

$$V_{3z}(1a) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(1a) = 0.$$

Сборочная ситуация 2:

$$V_{3x}(2) = \begin{cases} -V_x \forall M_c > 0 \wedge Z > H - h_\phi, \\ +V_x \forall M_c < 0 \wedge Z > H - h_\phi, \\ 0 \forall Z \leq H - h_\phi; \end{cases}$$

$$V_{3z}(2) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(2) = 0.$$

Сборочная ситуация 2а:

$$V_{3x}(2a) = \begin{cases} +V_x \forall M_c > 0 \wedge Z > H - h_\phi, \\ -V_x \forall M_c < 0 \wedge Z > H - h_\phi, \\ 0 \forall Z \leq H - h_\phi; \end{cases}$$

$$V_{3z}(2a) = k(F_{3z} - F_z);$$

$$\omega_{3v}(2a) = 0.$$

Блок-схемы алгоритмов управления представлены на рис. 3.23 – 3.26.

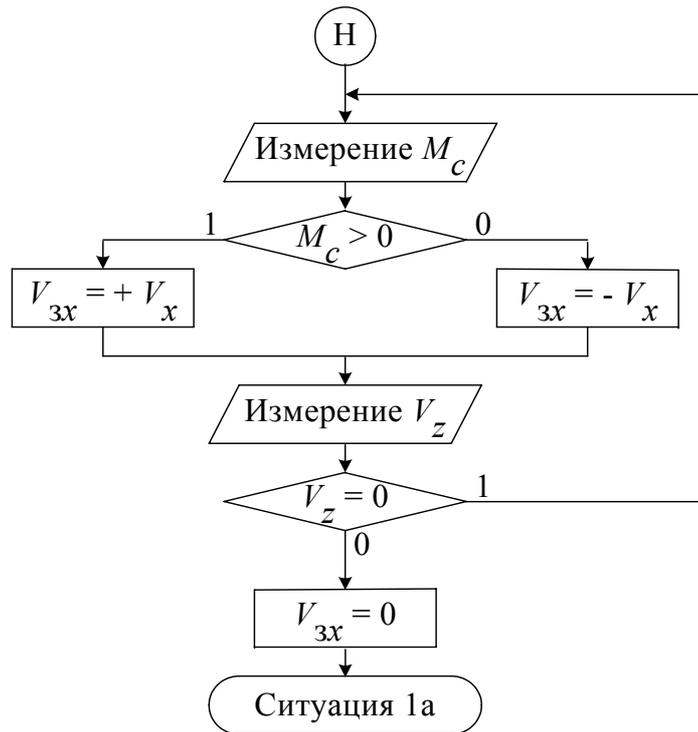


Рис. 3.23. Алгоритм управления для сборочной ситуации 1  
(детали с технологическими фасками)

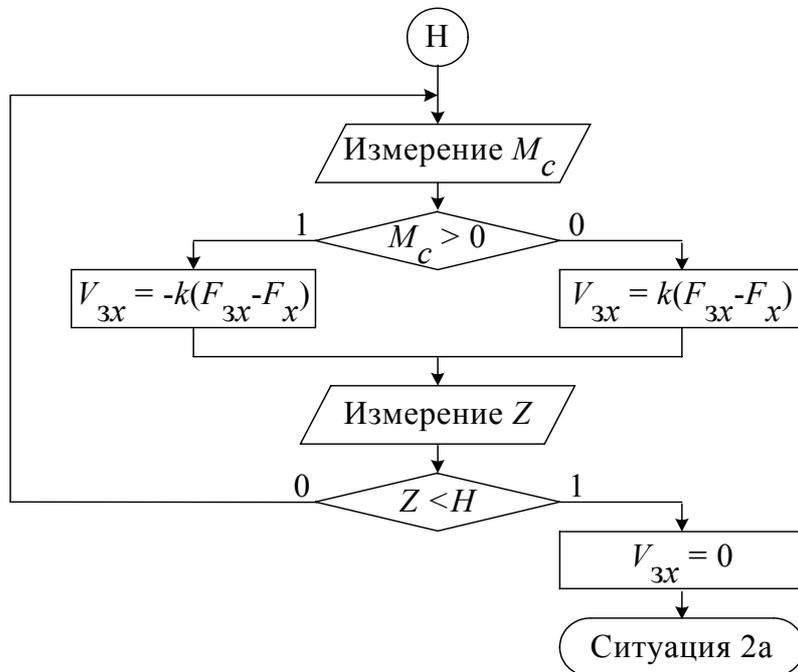


Рис. 3.24. Алгоритм управления для сборочной ситуации 1a  
(детали с технологическими фасками)

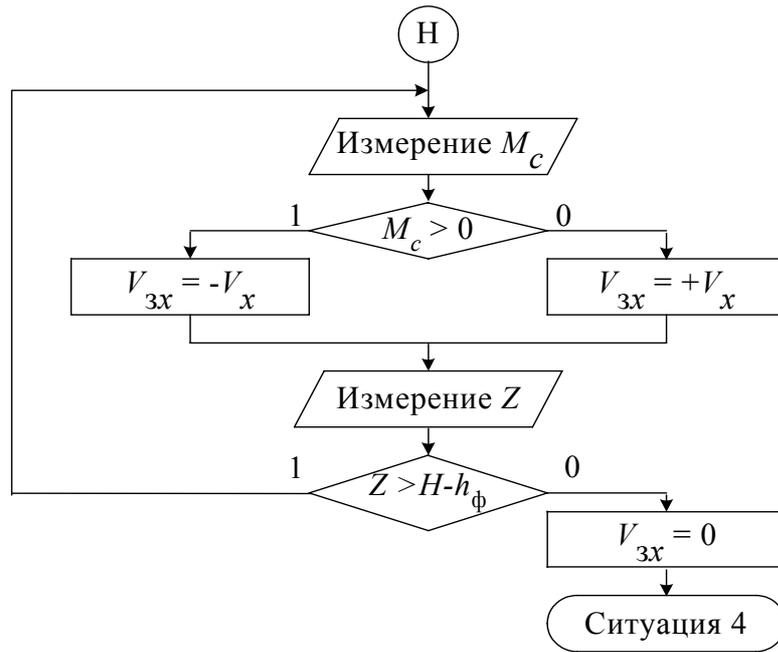


Рис. 3.25. Алгоритм управления для сборочной ситуации 2 (детали с технологическими фасками)

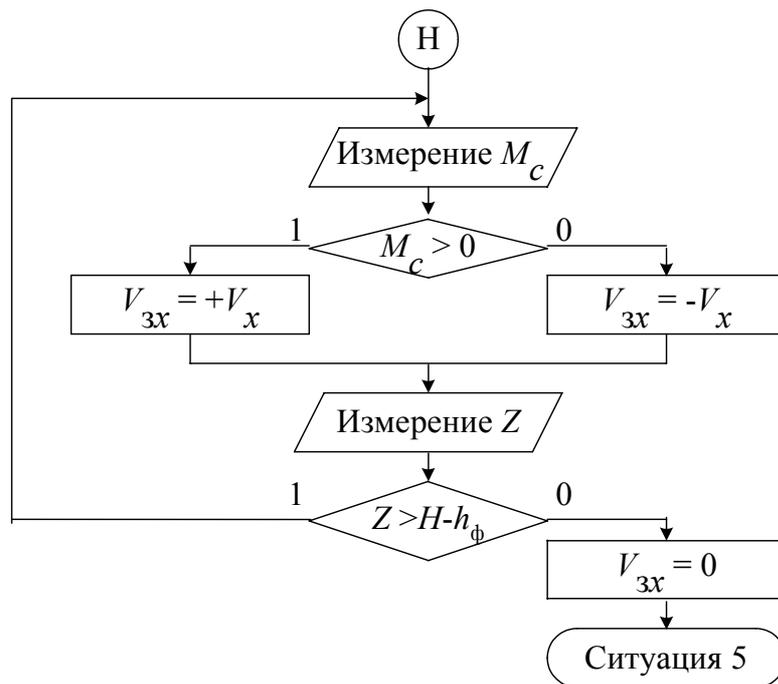


Рис. 3.26. Алгоритм управления для сборочной ситуации 2а (детали с технологическими фасками)

Разработанные алгоритмы управления обеспечивают выход из создавшейся сборочной ситуации и нормальное протекание процесса сопряжения.

### 3.4. АЛГОРИТМЫ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ УСТАНОВКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК В ЯЧЕЙКИ КОНТЕЙНЕРА

Установка ТВС в ячейку контейнера является последней операцией технологического процесса инспекции состояния тепловыделяющей сборки. Приёмником проверенных ТВС служат два контейнера – для аттестованныхборок и для отработанных. Координаты всех ячеек в обоих контейнерах для текущего их размещения на дне бассейна определены и рассчитаны в соответствии с алгоритмами. Система «ТВС – ячейка» в данном случае также не является детерминированной. Эта неопределённость обусловлена, с одной стороны, погрешностями позиционирования робота над ячейкой контейнера, наличием накапливающейся кинематической погрешности, люфтов в механических передачах и т.п., а с другой стороны, искажённой формой и изменённой геометрией объекта манипулирования. В идеальном случае операция установки является простой задачей позиционирования в заданную точку  $Z_0$  при условии фиксации координат  $X_0$  и  $Y_0$ . Нестационарность динамической системы «ТВС – ячейка» предполагает использование адаптивных устройств с переменной структурой. Информацией о ходе выполнения операции являются сигналы с координатных датчиков положения, датчиков скорости, а также величина и направление вектора силы, возникающей при контакте ТВС с ячейкой контейнера. Управление вдоль оси  $Z$  реализуется приводом вертикального перемещения по координате  $Z$ , а приводы  $X$  и  $Y$  горизонтальных осей используются для формирования режима активной податливости (по необходимости задаются величины скоростей  $V_X$  и  $V_Y$ ).

Операцию установки ТВС будем рассматривать при следующих условиях:

- в начале технологической цепочки инспекции ТВС находился в ячейке и обязательно должен в неё установиться;
- до начала операции система управления обеспечила совмещение оси схвата робота с ТВС и центра ячейки контейнера;
- приводы робота по всем координатам являются позиционно-силовыми (с ограничением развиваемых сил) и имеют апериодический переходный процесс по управляющему и возмущающему воздействиям;

- силомоментное очувствление позволяет определить вектор силы при касании объектов, его проекции на горизонтальные и вертикальную оси, а также величину момента сопротивления относительно центра схвата;
- схват с ТВС находится на тросовой подвеске, и вертикальные силы, возникающие при сопряжении, не превышают величины силы тяжести стержня.

В исходном состоянии ТВС установлен в захватном устройстве, и выведен приводами робота в начальную точку  $T_{кн}(x_0, y_0, z_n)$ . Процесс установки выполняется в два этапа.

*I этап:* «попадание» свободным концом стержня в отверстие ячейки; этап считается выполненным, если приращение положения стержня  $\Delta Z \geq l_\phi$  глубины фаски ячейки.

*II этап:* «установка» ТВС в ячейку; завершение процесса определяется достижением по оси  $Z$  заданной координаты.

Определим общий вектор управления системой  $\vec{U} \in \{g_Z, g_X, g_Y\}$  через переключательные функции  $g_Z, g_X, g_Y$ . Сделаем следующее допущение: при анализе будем рассматривать двумерную модель процесса с управлением  $\vec{U} \in \{g_Z, g_X\}$ , считая приводы  $X$  и  $Y$  по горизонтальным осям идентичными. Определения переключательной функции  $g_Y$  могут быть легко получены из  $g_X$  подстановкой соответствующих значений проекций сил и коэффициентов. Рассмотрим алгоритм управления роботом на первом этапе сопряжения.

Процесс начинается с введения задания на позиционное перемещение приводу  $Z$  вертикального перемещения. ТВС начинает опускаться вниз, датчик силы по оси  $Z$  фиксирует равенство  $P_Z = G_C$  силе тяжести стержня. В силу вышеназванных причин торец стержня может не попасть в отверстие ячейки, при контакте с контейнером величина силы  $P_Z < G_C$ . Все возможные случаи можно свести к трём вариантам взаимного расположения стержня и ячейки, представленными как  $A, B$  и  $C$  на рис. 3.27, где обозначены:  $z_n$  – начальное положение ТВС перед установкой;  $z_k$  – положение поверхности контейнера,  $z_{кф}$  – координата глубины фаски ячейки,  $z_0$  – конечное положение ТВС после установки.

Очевидно, что хотя оси схвата и ячейки совмещены, необходимо обеспечить движение стержня по оси  $X$  в направлении к центру ячейки по знаку и величине проекции вектора силы  $P_X$  и момента  $M_T$ . Анализ положения  $z_i$  стержня и величины силы  $P_Z$  позволяет выявить момент контакта и вариант  $A, B$  или  $C$  расположения объектов.

Определим значение функции управления движением  $g_Z$  по оси  $Z$ , а также функций управления  $g_{X_A}, g_{X_B}, g_{X_C}$  по оси  $X$  для каждого из рассматриваемых вариантов, считая их равновероятными, но находящимися в жёсткой последовательности  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .

Запишем управление  $g_Z(z_0, P_Z)$ , имеющее место при любом варианте  $A...C$ , через систему уравнений с логическими условиями:

$$g_Z = \begin{cases} z_0 \wedge \Phi_{G_Z}(p) & \forall P_Z = G_C; \\ U_Z k_{PCk}(G_C - P_Z) \wedge \Phi_{V_Z}(p) & \forall (G_C - P_Z) < P_{Z0}; \\ k_{PC} P_{Z0} \wedge \Phi_{P_Z}(p) & \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\Phi_{G_Z}(p), \Phi_{V_Z}(p), \Phi_{P_Z}(p)$  – операторные уравнения привода  $Z$ , замкнутого по положению, по скорости и по силе соответственно;  $U_Z$  – сигнал задания по скорости установки стержня;  $P_{Z0}$  – порог уменьшения  $P_Z$ , условие переключения;  $k_{PCk}$  и  $k_{PC}$  – коэффициенты передачи регуляторов скорости и силы привода  $Z$ .

Управление по  $Z$  при выходе в исходное положение осуществляется в позиционном режиме; при контакте с контейнером при  $(G_C - P_Z) < P_{Z0}$  – в позиционно-силовом; при  $(G_C - P_Z) \geq P_{Z0}$  дозирование развиваемой силы происходит под действием собственного веса ТВС. В наихудшем случае система «ТВС – ячейка» может оказаться в варианте  $A$ . Очевидно, что

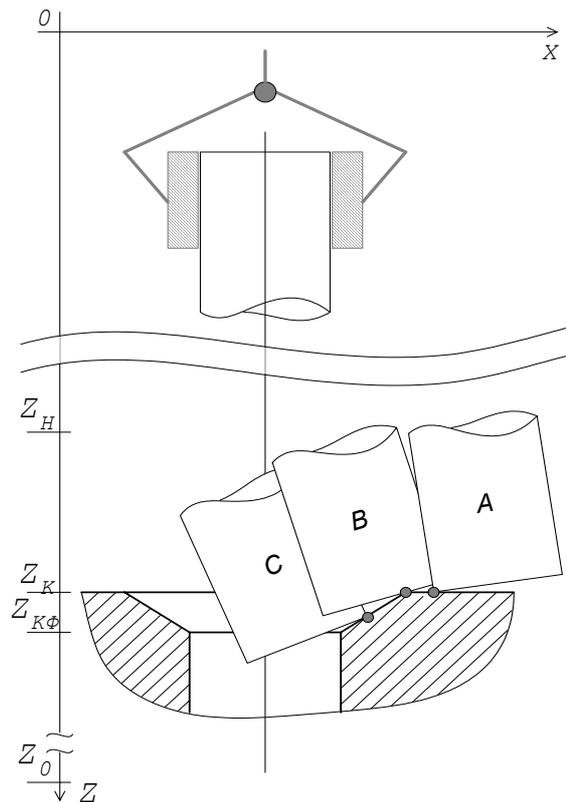


Рис. 3.27. Взаимное положение ТВС и ячейки контейнера на первом этапе процесса установки

необходимо организовать движение по координате  $X$  в зависимости от знака момента  $M_T$  с одновременным контролем приращения по оси  $Z$  или появления скорости движения  $V_Z$  по этой же оси под действием веса стержня, появление которых будет свидетельствовать о переходе процесса к варианту  $B$ . Управление движением  $g_{X_A}(z, P_Z, M_T)$  по оси  $X$  будет иметь вид:

$$g_{X_A} = \begin{cases} +U_X \wedge \Phi_{V_X}(p) & \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T > 0; \\ -U_X \wedge \Phi_{V_X}(p) & \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T < 0; \\ 0 & \forall (G_C - P_Z) < P_{Z0}, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $\Phi_{V_X}(p)$  – операторное уравнение привода  $X$ , замкнутого по скорости;  $U_X$  – сигнал задания по скорости смещения;  $M_T$  – рассчитанный момент относительно центра схвата робота.

В варианте  $B$  есть смещение стержня по оси  $Z$  под действием его веса, поэтому управление смещением по оси  $X$  целесообразно организовать в функции от проекции вектора силы  $\vec{P}$  на эту ось; условие  $z \geq z_K$  является достаточным для определения перехода к варианту  $C$ . Управление  $g_{X_B}(z, z_K, P_Z, P_X, M_T)$  примет вид:

$$g_{X_B} = \begin{cases} +U_X k_X(P_X) \wedge \Phi_{P_X}(p) & \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T > 0 \wedge z < z_K; \\ -U_X k_X(P_X) \wedge \Phi_{P_X}(p) & \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T < 0 \wedge z < z_K; \\ 0 & \forall z = z_K \wedge (G_C - P_Z) < P_{Z0}, \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $\Phi_{P_X}(p)$  – операторное уравнение привода  $X$ , замкнутого по силе;  $k_X(P_X)$  – коэффициент скорости смещения.

Вариант  $C$  движения по фаске ячейки описывается управлением  $g_{X_C}(z, z_{KФ}, P_Z, P_X, M_T)$  в виде

$$g_{X_C} = \begin{cases} +U_X k_X(P_X) k_Z(z_{KФ} - z) \wedge \Phi_{P_X}(p) \forall \\ \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T > 0 \wedge z < z_{KФ}; \\ -U_X k_X(P_X) k_Z(z_{KФ} - z) \wedge \Phi_{P_X}(p) \forall \\ \forall (G_C - P_Z) \geq P_{Z0} \wedge M_T < 0 \wedge z < z_{KФ}; \\ 0 & \forall z = z_{KФ} \wedge (G_C - P_Z) < P_{Z0}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $k_Z(z_{KФ} - z)$  – коэффициент уменьшения скорости смещения при приближении к концу фаски, исключающий рывок при сходе ТВС с фаски в

отверстие ячейки. Этап завершается при смещении стержня по вертикальной оси на величину, превышающую координату  $z_{\text{кФ}}$ . Таким образом, определяя управление движением по горизонтальной оси как

$$g_X = g_{X_A} \vee g_{X_B} \vee g_{X_C}, \quad (3.5)$$

можно обеспечить выполнение первого этапа установки ТВС в ячейку при любом исходном варианте начала процесса. Алгоритм управления движением согласно  $\vec{U} \in \{g_Z, g_X\}$  для двумерной модели представлен на рис. 3.28, а функциональная схема системы, реализующей предложенный алгоритм, – на рис. 3.29.

Необходимость анализа состояния системы при контакте стержня с контейнером, измерения сил, возникающих при этом и величины перемещения по оси  $Z$ , а также организация смещения по горизонтальным осям согласно (3.1) – (3.5) приводят к появлению в структуре системы блока управления движением (БУД) по вертикальной оси и блока коррекции смещения (БКС) по горизонтальным осям. Данные блоки фактически объединяют в своём составе модель процесса сопряжения «ТВС – ячейка» и логическое переключающее устройство управления приводами координат по сигналам модели.

Использование транспортного кессона как ориентирующего и направляющего устройства позволяет существенно упростить задачу первого этапа: при выдвигании ТВС из кессона в ячейку исключаются варианты  $A$  и  $B$  (см. рис. 3.27) процесса установки; движение торца ТВС по фаске происходит под действием его собственного веса; управление активной податливостью по горизонтальным осям осуществляется по знаку соответствующей проекции силы, а не её величине. В этом случае закон управления движением выглядит так:

$$g_Z = \begin{cases} z_{\text{кФ}} \wedge \Phi_{G_Z}(p) & \forall P_Z = G_C; \\ k_{pp} P_{Z0} \wedge \Phi_{P_Z}(p) & \forall P_Z < G_C; \end{cases} \quad g_X = \begin{cases} +U \wedge \Phi_{V_X}(p) & \forall P_Z < G_C \wedge P_X > 0; \\ -U \wedge \Phi_{V_X}(p) & \forall P_Z < G_C \wedge P_X < 0; \\ 0 & \forall P_Z = G_C \vee P_X = 0; \end{cases}$$

$$g_Y = \begin{cases} +U \wedge \Phi_{V_Y}(p) & \forall P_Z < G_C \wedge P_Y > 0; \\ -U \wedge \Phi_{V_Y}(p) & \forall P_Z < G_C \wedge P_Y < 0; \\ 0 & \forall P_Z = G_C \vee P_Y = 0. \end{cases}$$

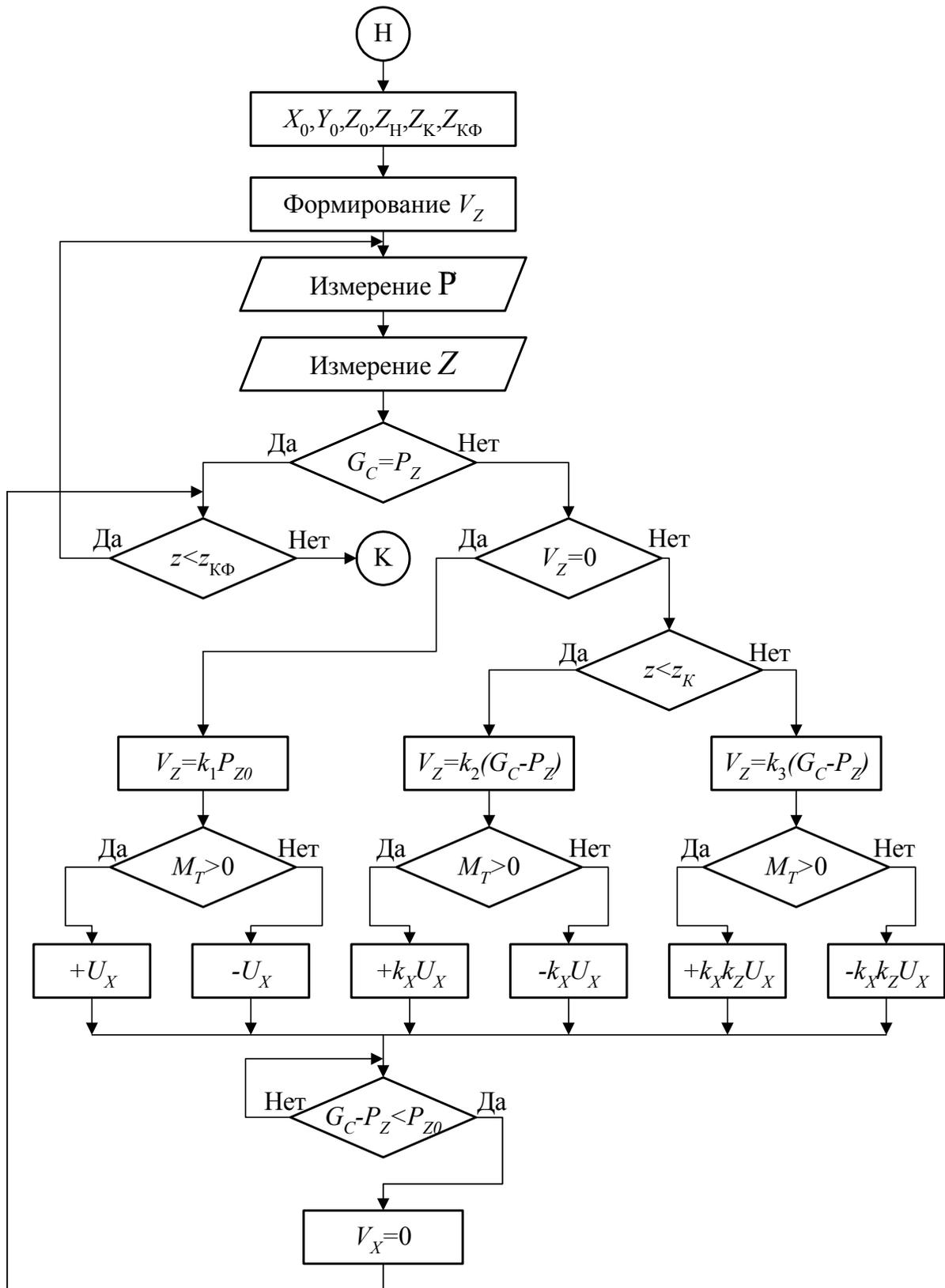


Рис. 3.28. Алгоритм управления системой «ТВС – ячейка» на первом этапе установки

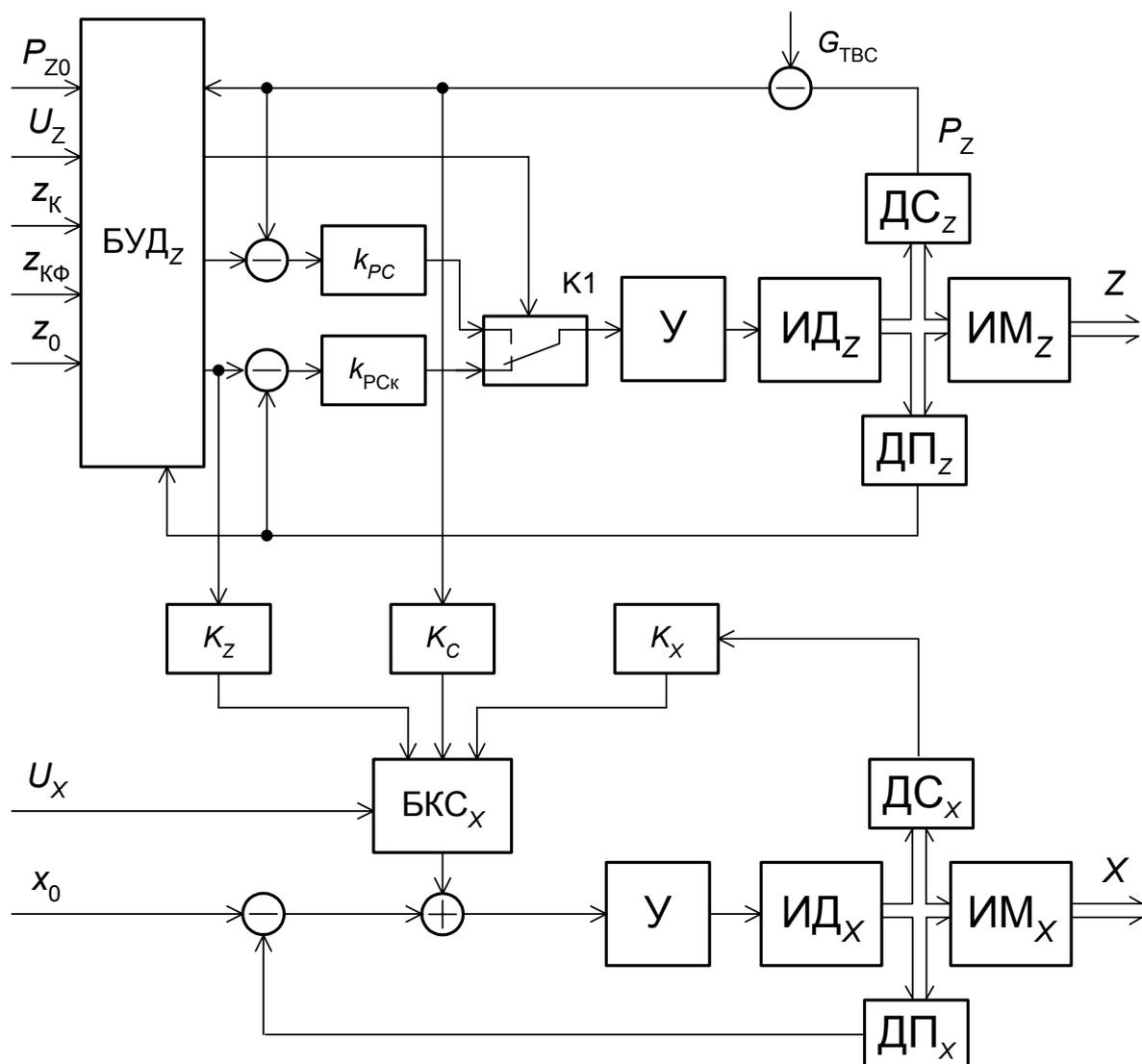


Рис. 3.29. Функциональная схема системы управления установкой ТВС (координаты Z и X)

На рис. 3.30 представлен алгоритм управления движением первого этапа установки с учётом ориентации ТВС в транспортном кессоне. Условием завершения процесса и перехода ко второму этапу является  $P_z = G_c$  и  $z = z_{кф}$ .

Задача управления РТК на втором этапе установки ТВС в ячейку – организация движения схвата по вертикальной оси. При отклонении формы от оси сопряжения возможен контакт стержня со стенками ячейки и появление дополнительных сил сопротивления движению, что приводит, как и на первом этапе, к необходимости смещения схвата с ТВС по горизонтальным осям.

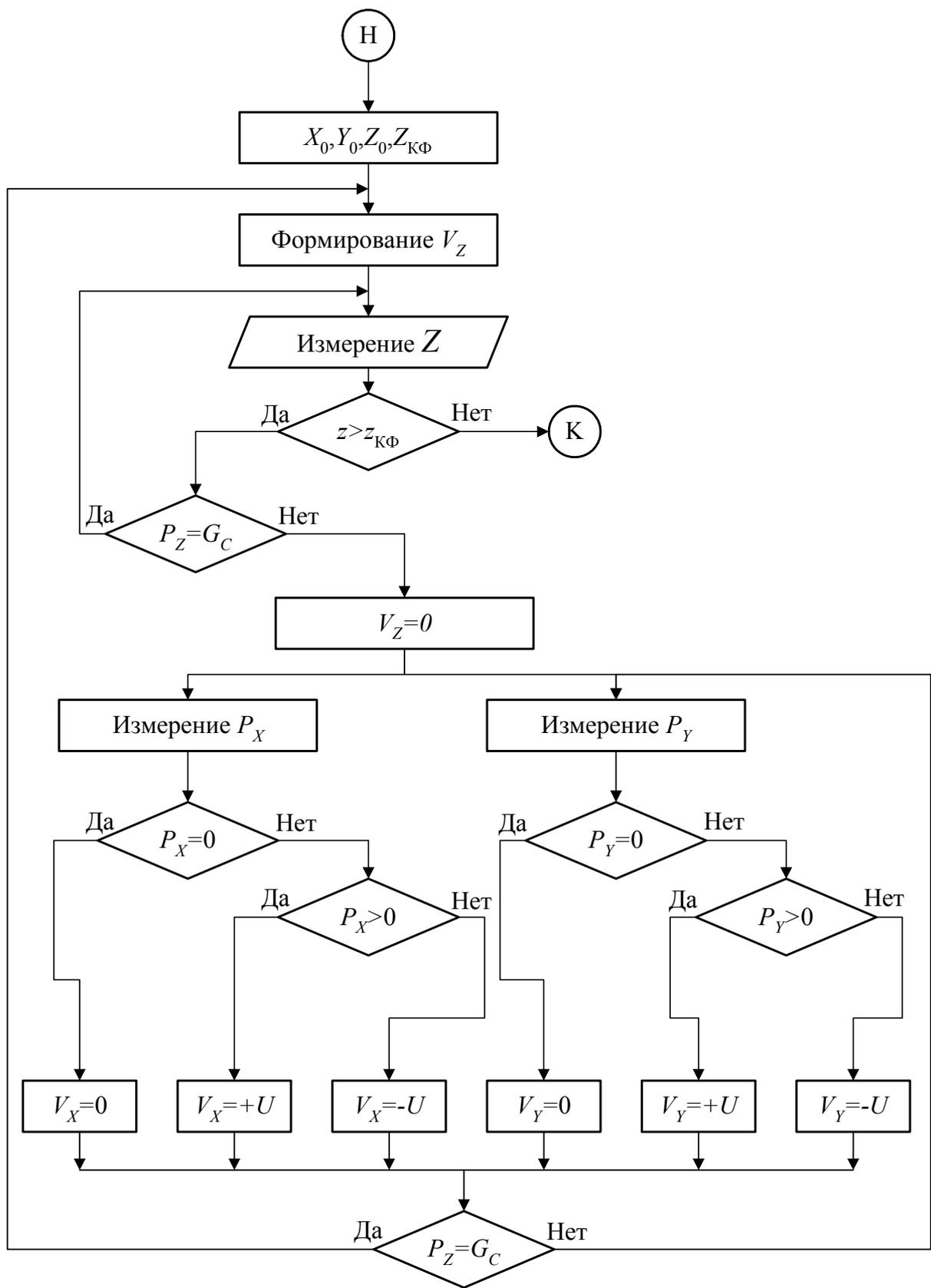


Рис. 3.30. Алгоритм управления движением ТВС с учётом кессона

Если  $P_{Z1}$  – ограничение по силе для привода  $Z$ , то вектор управления  $\vec{U} \in \{g_Z, g_X\}$  для данного режима:

$$g_Z = \begin{cases} z_0 \wedge \Phi_{G_Z}(p) & \forall P_Z = G_C; \\ U_Z k_{PC}(G_C - P_Z) \wedge \Phi_{V_Z}(p) & \forall (G_C - P_Z) \leq P_{Z1}; \\ 0 & \forall (G_C - P_Z) > P_{Z1}; \end{cases}$$

$$g_X = \begin{cases} +U_X k_X(P_X) \wedge \Phi_{P_X}(p) \vee \\ \quad \vee (G_C - P_Z) \geq P_{Z1} \wedge P_X > 0 \wedge V_X \neq 0 \wedge z < z_0; \\ -U_X k_X(P_X) \wedge \Phi_{P_X}(p) \vee \\ \quad \vee (G_C - P_Z) \geq P_{Z1} \wedge P_X < 0 \wedge V_X \neq 0 \wedge z < z_0; \\ 0 & \forall V_X = 0 \vee P_X = 0 \vee z = z_0, \end{cases}$$

где  $V_X$  – скорость движения по оси  $X$ , контролируемый параметр, позволяющий определять возможность выполнения смещения.

При отклонениях в форме ТВС реализация предлагаемого управления не исключает вероятности заклинивания, а неправильная установка порога  $P_{Z1}$  может вызвать неуправляемые колебания в системе; кроме того, необходимость точного определения величин проекций вектора силы увеличивает объём необходимых вычислений.

Алгоритм управления приводом робота по координате  $Z$  и приводом поворота ТВС  $\alpha$  при извлечении их из ячеек контейнера представлен на рис. 3.31. На блок-схеме выделены группы, соответствующие прохождению рассмотренных выше ситуаций извлечения ТВС. В группе «Ситуация 1» формируется позиционное управление, в группе «Ситуация 2» – позиционно-силовое, «Ситуация 3» – силовое. Группа «Ситуация 5» отражает последовательное включение приводов  $Z$  и  $\alpha$ . Алгоритм управления смещением по осям  $X$  и  $Y$  при обработке состояния «Ситуация 4» приведён на рис. 3.32. В случае превышения предельного отклонения  $S > S_{\max}$  система формирует сигнал «Авария» и переходит в телеоператорный режим работы. Функциональная схема системы управления по осям  $Z$  и  $X$ , реализующей предложенный алгоритм работы, представлена на рис. 3.33 (структуры приводов по горизонтальным осям идентичны). Здесь нелинейные элементы ПЭ1...ПЭ3 определяют пороги перехода между ситуациями, ПЭ4 – пороговая сила  $P_{X0}$ , ПЭ5 – ограничение смещения  $x_S$ .

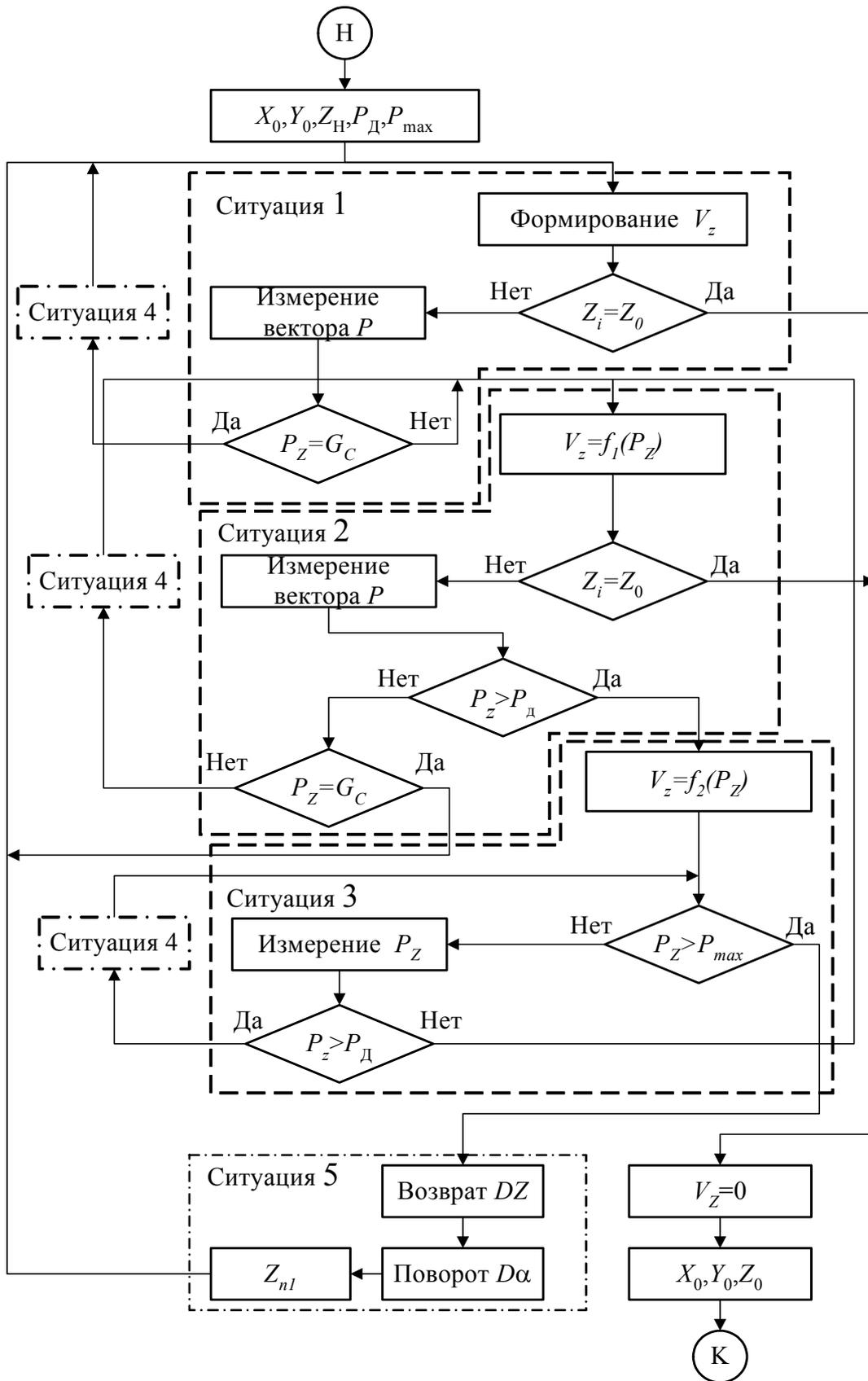


Рис. 3.31. Алгоритм управления приводом по оси Z и приводом поворота  $\alpha$

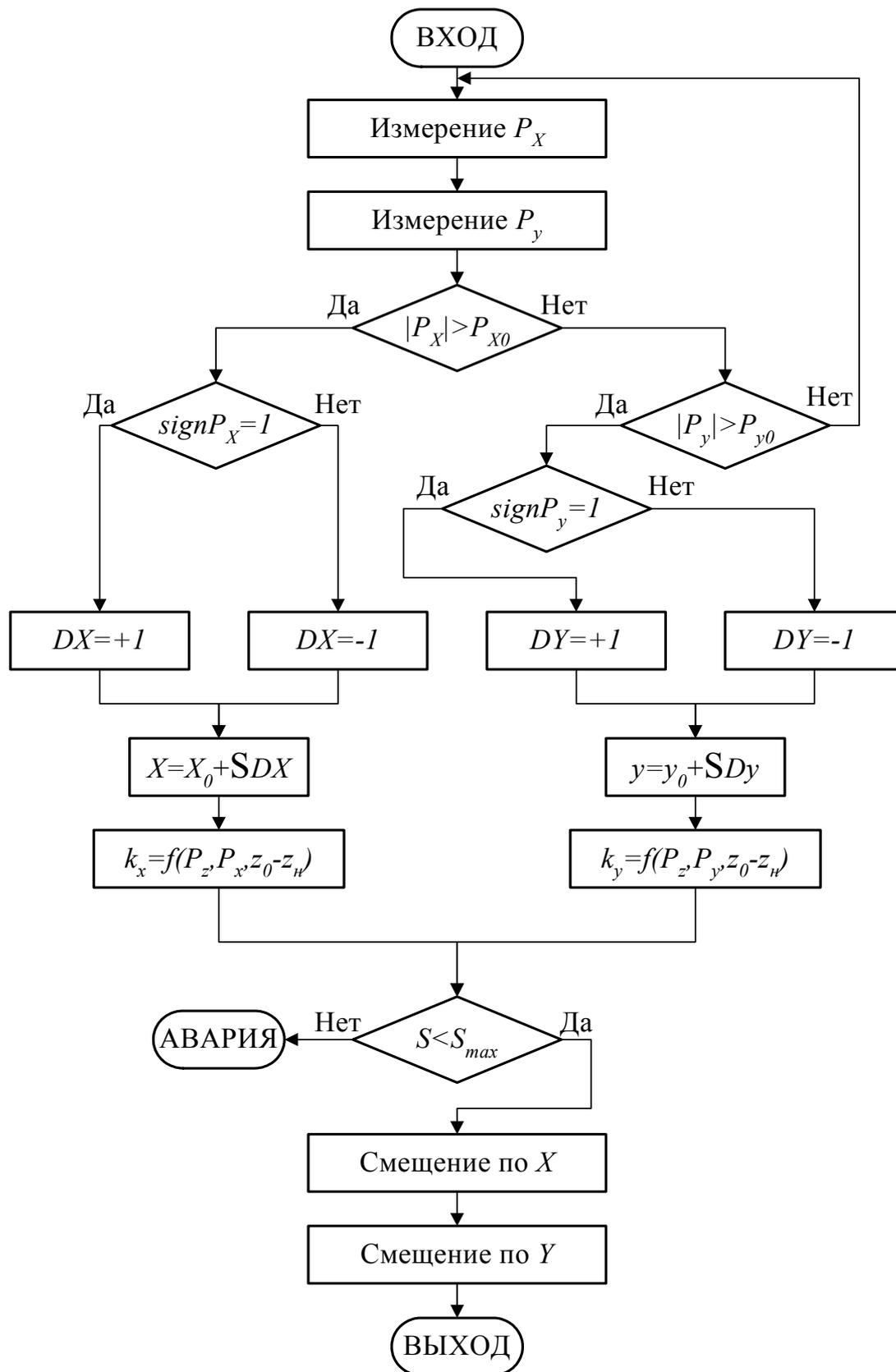


Рис. 3.32. Алгоритм управления приводами X и Y РТК в ситуации 4 при извлечении ТВС из ячейки контейнера

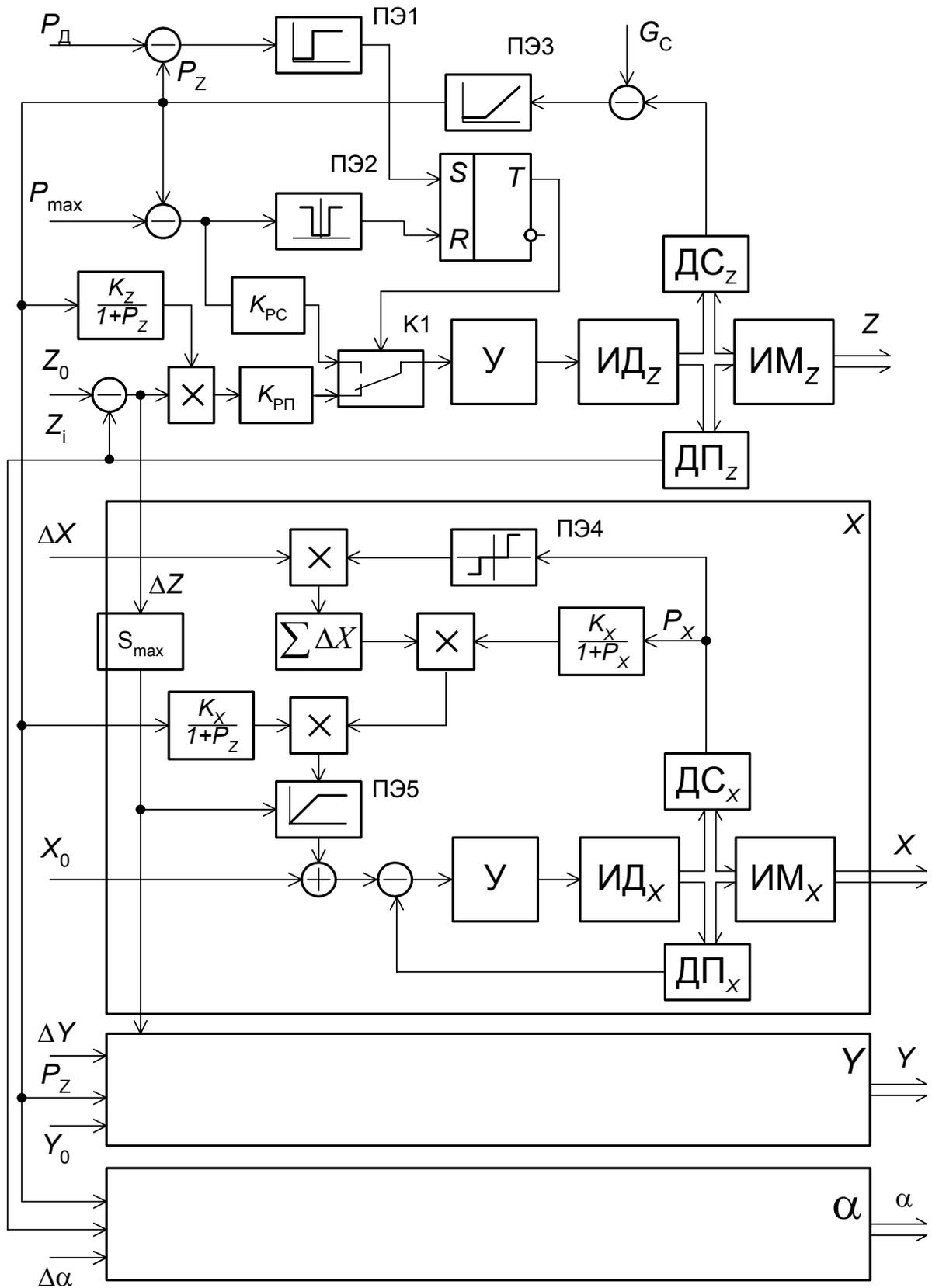


Рис. 3.33. Структура системы управления РТК при извлечении ТВС из ячейки контейнера

## **4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ**

### **4.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Алгоритмы и структуры системы управления многофункциональной РТС по обеспечению выполнения транспортных, измерительных, сборочных и технологических операций предъявляют высокие и достаточно противоречивые требования к исполнительным электроприводам (ЭП) комплекса. Структура приводов должна обеспечивать возможность автономного и координированного (согласованного) [14] регулирования перемещений, сил и моментов при условии обеспечения высокой точности позиционирования при отсутствии перерегулирования, высокого коэффициента форсирования по моменту, максимального быстродействия, плавности перемещения РО при переменных нагрузках и моментах инерции, надёжной фиксации в точках позиционирования, отсутствия переходных режимов при переключении структуры привода, а также минимальность массы и габаритов электромеханических модулей при высокой надёжности всех элементов.

Особые условия эксплуатации комплекса накладывают существенные ограничения на выбор типа двигателя привода. Применение шагового электропривода [26, 38] малоэффективно на мощностях, превышающих десятки ватт, с точки зрения получения высокого быстродействия и перегрузочной способности по моменту. Электроприводы на базе линейных двигателей, наряду с очевидными преимуществами обеспечения линейного перемещения исполнительных устройств без передаточных звеньев, не обеспечивают требуемой точности и быстродействия. Большой интерес представляет собой применение респонсинов, поскольку в данном случае двигатель органически объединяет в себе функции двигателя и редуктора, однако такие машины рассчитаны на малые мощности, обладают низким КПД, нетехнологичны и дороги в изготовлении.

Много работ посвящено разработке электроприводов постоянного тока для роботов [3, 8, 61]. Исследуются существующие и разрабатываются новые электродвигатели постоянного тока, удовлетворяющие многим требованиям, предъявляемым к электромеханическим модулям, совершенствуются способы управления двигателями. Наиболее перспективны коллекторные двигатели с гладким ротором, коллекторные двигатели с дисковым якорем, с полым немагнитным якорем, высокомоментные двигатели с зубцовым якорем.

Получены высокие показатели качества регулирования электроприводов постоянного тока: диапазон регулирования скорости от 1 : 30000 до 1 : 100000, полоса пропускания до 100...250 Гц, перегрузочная способность по моменту до 8...10-кратной. Вместе с тем, электроприводы постоянного тока имеют один существенный недостаток – наличие щётчного коллектора. Большой объём планово-предупредительных работ по обслуживанию и контролю двигателей даже в помещениях с нормальной средой, а особенно в увлажнённых, запылённых и тем более при наличии жёстких излучений приводит к снижению экономического эффекта при роботизации производства из-за существенного возрастания затрат на ремонт и замену электродвигателей. В большей степени требованиям, предъявляемым к электродвигателям роботов, работающим в условиях радиоактивного излучения, удовлетворяют асинхронные двигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором и частотно-токовым управлением [70], а также высокомоментные вентильные двигатели с широтно-импульсным управлением [17, 18, 50]. Такие двигатели обладают высокой надёжностью из-за отсутствия коллектора, имеют высокие массогабаритные и удельные показатели при обеспечении того же момента на валу двигателя, малый момент инерции ротора, большую кратность момента на высокой и низкой скорости, которые не ограничиваются условиями коммутации.

Учитывая изложенное, наиболее целесообразным является применение вентильных и асинхронных приводов. Структуру электроприводов комплекса определяют в зависимости от управляемой координаты и решаемой задачи.

При отработке алгоритмов управления транспортными перемещениями робота в свободной зоне приводы работают в режиме позиционного управления и должны обеспечивать монотонное движение без перерегулирования с заданной динамикой и соответствующими показателями качест-

ва. В этом случае основной задачей является проблема повышения точности позиционирования и увеличение быстродействия. Решение задачи оптимизации производится традиционным путём анализа динамики неизменяемой части системы и синтеза корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые качественные показатели [2, 5, 6, 53, 58].

Если при обработке малых рассогласований оптимальное качество регулирования достигается применением традиционных линейных (ПИ-, ПИД-) регуляторов, то при обработке больших значений сигналов рассогласования, существенно превышающих величину линейной зоны, целесообразно использование нелинейных корректирующих устройств, изменяющих коэффициент передачи прямой цепи привода в зависимости от величины сигнала ошибки [52, 66]. В итоге координатный электропривод имеет переменную структуру с логическим переключающим устройством (ЛПУ), формирующим линейный и нелинейный законы регулирования и работающим под управлением микроЭВМ системы (рис. 4.1).

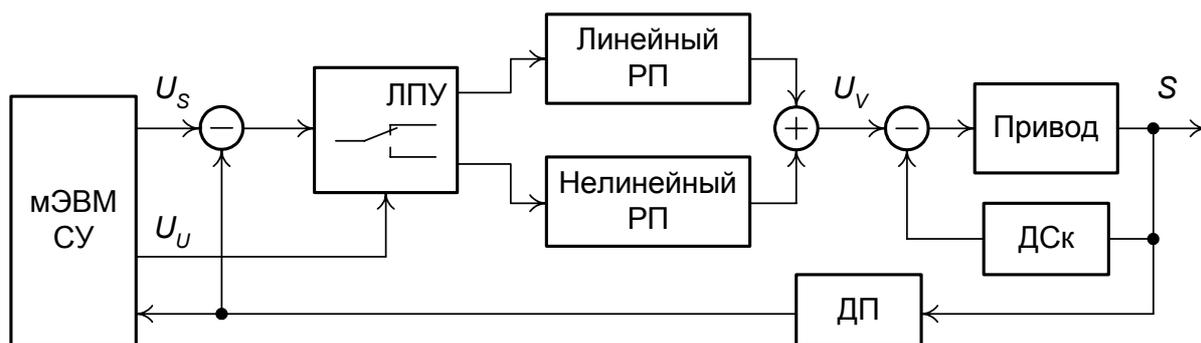


Рис. 4.1. Структура позиционного ЭП с переключением регулятора

Одним из методов достижения оптимального качества регулирования в системах управления, как показано в работе [40], является использование двухканальных структур, работающих по принципу грубого и точного управления, среди которых выделяют прежде всего следующие: итерационные, в которых входным сигналом точного канала является ошибка грубого; с силовым опорным каналом, в котором изменение скорости обеспечивается вычитанием на дифференциале скоростей управляемого и опорного каналов; с использованием отдельных каналов управления в различных режимах работы; с силовыми корректирующими устройствами, сигнал коррекции в которых вводится в следящий привод через силовой механический дифференциал.

Многоканальные системы могут функционировать по различным алгоритмам [41, 60] и различаться по конструктивному исполнению. Так, для разработанной кинематики РТК подачи сборок, ИУ которого представляет собой транспортное устройство (приводы  $X$  и  $Y$ ) с размещённым на нём исполнительным органом (привод  $Z$ ), интерес представляют разработанные принципы управления двухканальными системами с отдельной нагрузкой (рис. 4.2, а), в которых имеются две платформы, подвижные относительно друг друга. Первый, грубый канал, перемещает транспортное устройство, а второй, точный, управляет исполнительным органом.

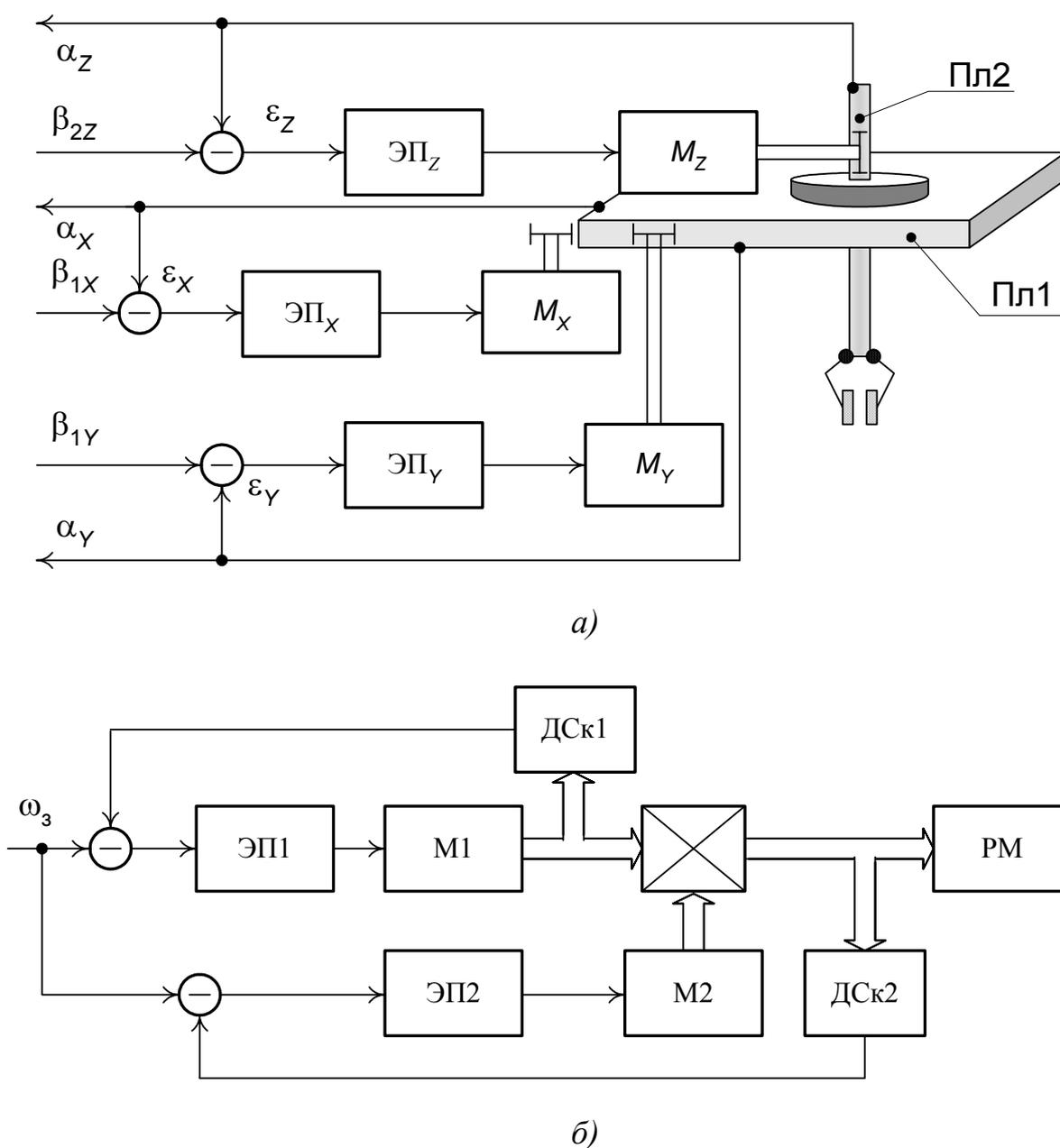


Рис. 4.2. Двухканальные системы управления

Управляющее воздействие для каналов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  вырабатывается программно, с учётом информации о положении каждого из устройств. Возможно также сочетание двух каналов управления, исполнительные механизмы которых соединены с валом нагрузки механическим дифференциалом, причём система грубого управления обрабатывает заданное значение скорости, а система точного управления обрабатывает ошибку двухканальной системы (рис. 4.2, б) [40].

В условиях действия внешних связей, вызванных нестационарностью расположения контейнеров с ТВС, неполнозаданностью координат ячеек в контейнере и нестабильностью формы самого ТВС, позиционное управление по координатам  $X$  и  $Y$  РТК должно быть дополнено силовыми обратными связями с целью регулирования податливости привода. Силовые обратные связи могут быть как электрическими (рис. 4.3, связь *a*) [19, 69], так и электромеханическими (рис. 4.3, связь *b*). Электромеханический способ регулирования податливости подробно рассмотрен в работе [40].

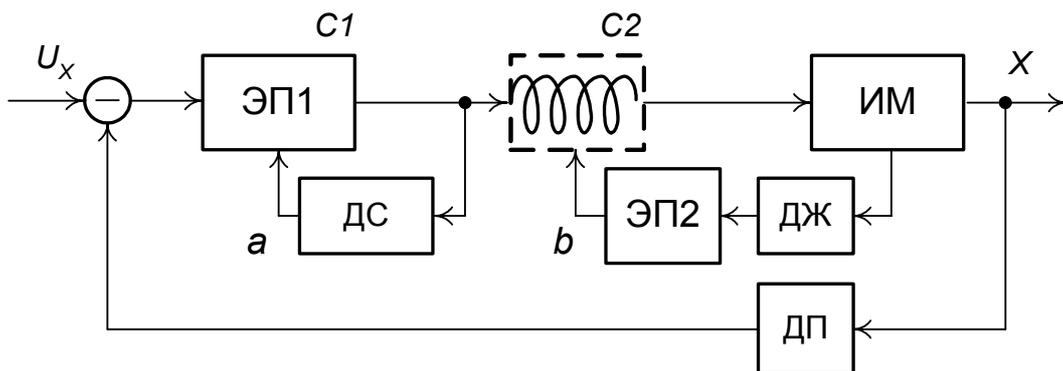


Рис. 4.3. Электропривод с регулируемой податливостью

При электрическом способе регулирования податливости положение схвата при управлении податливостью определяется выражением

$$\bar{X} = \left[ (\bar{X}_0 - \bar{X} - \bar{X}_K) J^{-1} K_P - J^{-1} K_V \dot{\bar{X}} \right] W_{ИУ}^X - \bar{F} C;$$

$$\bar{F} = K_E (\bar{X} - \bar{X}_C), \quad (4.1)$$

где  $J$  – якобиан преобразования координат;  $\bar{X}$ ,  $\dot{\bar{X}}$  – векторы координат и скоростей в трёхмерном пространстве;  $\bar{X}_C$  – координата объекта;  $\bar{F}$  – вектор результирующих контактных сил;  $\bar{X}_0$  – вектор управления перемещением;  $\bar{X}_K$  – вектор сигналов коррекции;  $K_P, K_V, W_{ИУ}^X$  – передаточ-

ные матрицы регуляторов положения, скорости и исполнительного устройства;  $K_E$  – матрица коэффициентов жёсткости всех поверхностей, участвующих в контакте;  $K_F$  – матрица жёсткости;  $C$  – передаточная матрица функции чувствительности.

При управлении демпфированием алгоритм управления определяет вектор изменения скорости

$$\dot{\bar{X}} = \left[ \left( \dot{\bar{X}}_0 - \dot{\bar{X}} - K_F \bar{F} \right) J^{-1} K_V - J^T \bar{F} \right] W_{ИУ}^X. \quad (4.2)$$

Учитывая subtilность ТВС при наличии ограничений движению, необходимо регулировать импеданс – податливость и демпфирование.

Суммарный вектор задания  $\vec{S} = \left[ \bar{X} \dot{\bar{X}} \right]^T$  содержит одновременно две компоненты – положение  $\bar{X}_0$  и скорость  $\dot{\bar{X}}_0$ , включает в себя управление (4.1) и (4.2) и определяется

$$\vec{S} = \left[ \left( \bar{X}_0 - K_F \bar{F} \right) J^{-1} K_P + \left( \dot{\bar{X}}_0 - K'_F \bar{F} \right) J^{-1} K_V \right] + J^T \bar{F}. \quad (4.3)$$

Структура системы с управлением податливостью и демпфированием представлена на рис. 4.4.

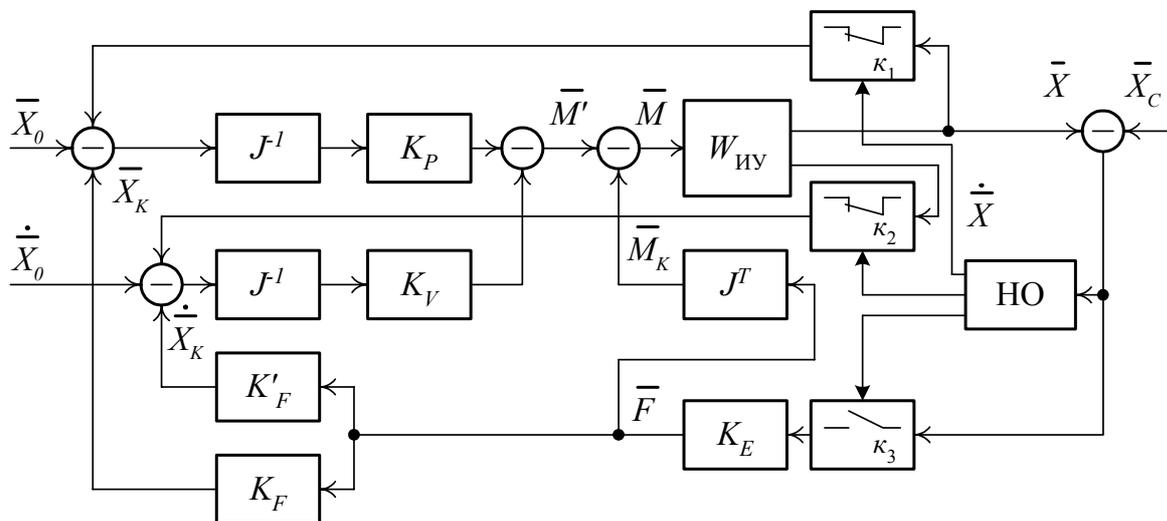


Рис. 4.4. Система с управлением податливостью и демпфированием

Данная система в силу действия внешних связей относится к системам с неявным переключением структуры за счет изменения действия обратных связей. При свободном движении силовая обратная связь отключена, привод является позиционным. При контакте РО с объектом естествен-

ным образом замыкается обратная связь по силе и размыкаются скоростной и позиционный контуры, причем эти процессы необязательно должны совпадать по времени: на первом этапе, когда еще  $\dot{\bar{X}}_0 \neq 0$ , осуществляется управление с позиционным доминированием (действуют позиционная и силовая связи); на втором этапе, при  $\dot{\bar{X}}_0 = 0$ , выполняется чисто силовое управление.

Алгоритмы управления электроприводами роботов с регулированием силы рассмотрены в работах [21, 48, 69]. Классическим типом таких ЭП являются приводы с главной обратной связью по силе. Структура такого привода представлена на рис. 4.5.

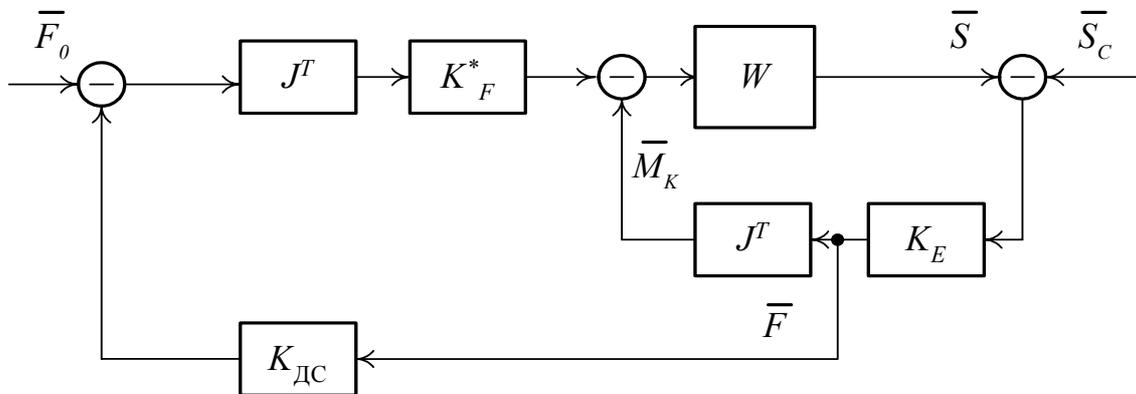


Рис. 4.5. Электропривод с управлением по вектору силы

Здесь обозначено:  $\bar{F}_0$ ,  $\bar{F}$  – требуемое и действительные значения векторов внешних сил и моментов;  $\bar{S}$ ,  $\bar{S}_C$  – векторы положения исполнительного устройства и внешней среды;  $J$  – якобиан преобразования координат;  $K_F^*$ ,  $K_E$ ,  $W$ ,  $K_{ДС}$  – передаточные матрицы коэффициентов регуляторов сил, жёсткости зоны контакта, исполнительного привода и коэффициентов устройства определения сил соответственно.

Совершенно очевидно, что исполнительные ЭП должны быть реализованы в классе систем с переменной структурой. Возможно построение ЭП со структурой, переключаемой на основе информации о состоянии взаимодействия РО с ОР или (и) со структурой, переключаемой программным путём. В первом случае, например при использовании датчика контакта, переход в режим управления силой выполняется в зависимости от наличия контакта ТВС с ячейкой.

Функциональная схема привода с датчиком контакта представлена на рис. 4.6, где обозначено: РСк, РС – регуляторы скорости и силы; ДП, ДСк, ДС, ДК – датчики положения, скорости, силы, контакта. При подходе к контейнеру система управления переключает привод со скоростного на позиционный режим, а при контакте РО с ОР привод переключается на режим управления силой.

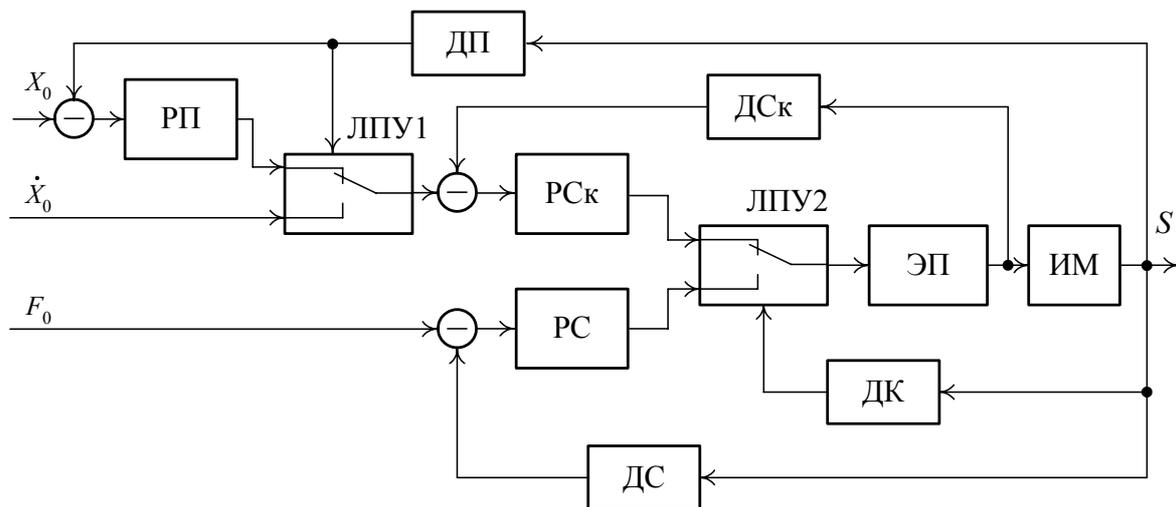


Рис. 4.6. Структурная схема электропривода с датчиком контакта

Другим способом непрограммного управления ЭП является гибридное ПСУ. Как показано в [19, 69], управление в первом случае представляет собой комбинацию моментов, одни из которых обеспечивают силовое управление, а другие – позиционное управление каждой степенью подвижности манипулятора:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^M \{F_{ij}[s_j \Delta F_j] + P_{ij}[(1 - s_j) \Delta x_j]\}, \quad (4.4)$$

где  $F_{ij}$  и  $P_{ij}$  – силовые и позиционные функциональные компенсаторные преобразователи относительно  $j$ -го входа  $i$ -го выхода;  $s_j$  – компонента селективного вектора податливости;  $\tau_i$  – управляющие моменты для приводов;  $\Delta F_j$  – ошибка по силе каждого звена;  $\Delta x_j$  – ошибка по положению каждого звена.

Во втором случае необходимо использование двухканального управления с программным переключением каналов на основании информации о характере взаимодействия объектов работ. При чисто силовом управлении ЭП в системе отсутствует информация о координатном перемещении.

Кроме того, в моменты переключения структур с позиционной на силовую и обратно возможны динамические переходные процессы из-за несогласованности величин сигналов управления, что недопустимо по условиям работы с субтильными объектами. При выполнении траекторных перемещений с одновременной возможностью силового взаимодействия разделение направлений, по которым производится управление ЭП робота, происходит в рабочем пространстве. Структура двухканальной системы с программным управлением приведена на рис. 4.7, где через ИЛПУ (интеллектуальное ЛПУ) обозначено устройство выбора каналов управления положением  $S$  или силой  $F$  с помощью переключения корректирующих перекрёстных связей либо изменения значения матриц селективности. Входным сигналом для такого устройства, помимо программного управления, является вся доступная информация о внешней среде не только от датчиков управляемой координаты ( $Z$ ), но и от информационных систем приводов  $X$  и  $Y$ .

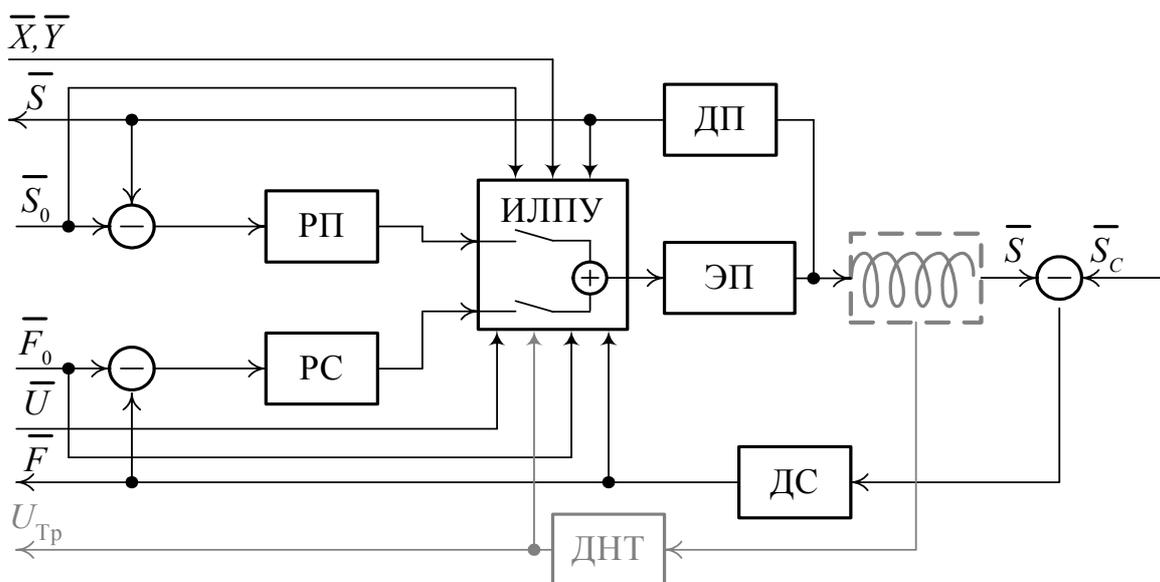


Рис. 4.7. Двухканальная система управления электроприводом

Определим структуру привода по управляемой координате вертикального перемещения  $Z$ . Особенностью его является наличие тросовой подвески, что дополняет структуру (рис. 4.7) датчиком натяжения троса (ДНТ). Это упругость второго рода [15], существенно ухудшающая показатели устойчивости работы привода.

Согласно рассмотренным в гл. 3 алгоритмам управления, ЭП по оси  $Z$  – позиционный при транспортных перемещениях схвата с ТВС, синтез динамики которого необходимо проводить с учётом сделанного замечания. При реализации алгоритмов установки и извлечения ТВС из ячейки привод должен работать в режимах стабилизации или дозирования силы взаимодействия исходя из условия абсолютной неразрушаемости ТВС, как субтильного объекта регулирования. Следовательно, это должен быть ЭП с силовым или позиционно-силовым управлением.

Структура асинхронного ЭП поворота ТВС по координате  $\alpha$  – позиционная, с линейным регулятором, аналогично представленной на рис. 4.1.

К приводу предъявляются требования максимального быстродействия при вращении ТВС перед коллиматором. Кроме того, при выполнении операции извлечения ТВС из ячейки структура ЭП должна быть дополнена устройствами ограничения развиваемого момента. Синтез оптимальных показателей качества можно провести по методике, изложенной в [33].

Таким образом, очевидно, что все координатные приводы степеней подвижности многофункциональной РТС относятся к классу двухканальных систем позиционно-силового управления с переменной структурой, алгоритмы переключения которой формируются как программным путём, так и в процессе работы самих приводов по каждой управляемой координате на основе информации о состоянии собственно системы или взаимодействия рабочего органа робота с объектом управления. Базовая структура сепаратной системы представлена на рис. 4.8.

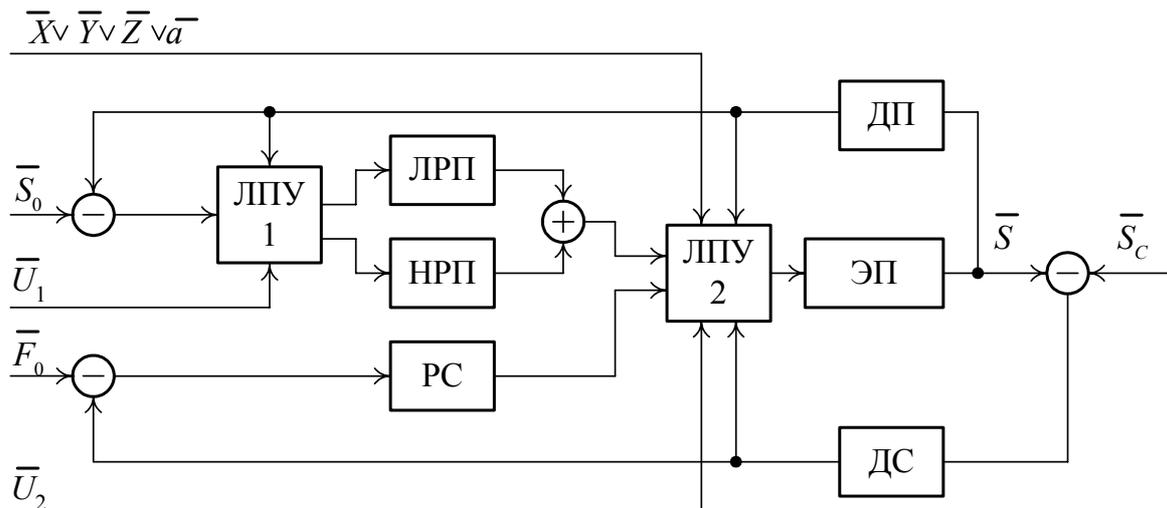


Рис. 4.8. Базовая структура сепаратной системы с переменной структурой

Для разработанной кинематической структуры, общей структуры многофункциональной РТС, базовой структуры координатного привода и разработанных в главе 3 алгоритмов управления функциональная схема системы приводов может быть представлена в виде, показанном на рис. 4.9. Приводы по координатам содержат блоки управления структурой БУС (логические переключающие устройства ЛПУ и регуляторы по контурам РК), силовые преобразователи  $СП_i$ , электродвигатели ВЭД и АД, самотормозящиеся механические передачи СМП (плюс упругий элемент – трос в приводе  $Z$ ), а также датчики скорости, положения, сил и моментов.

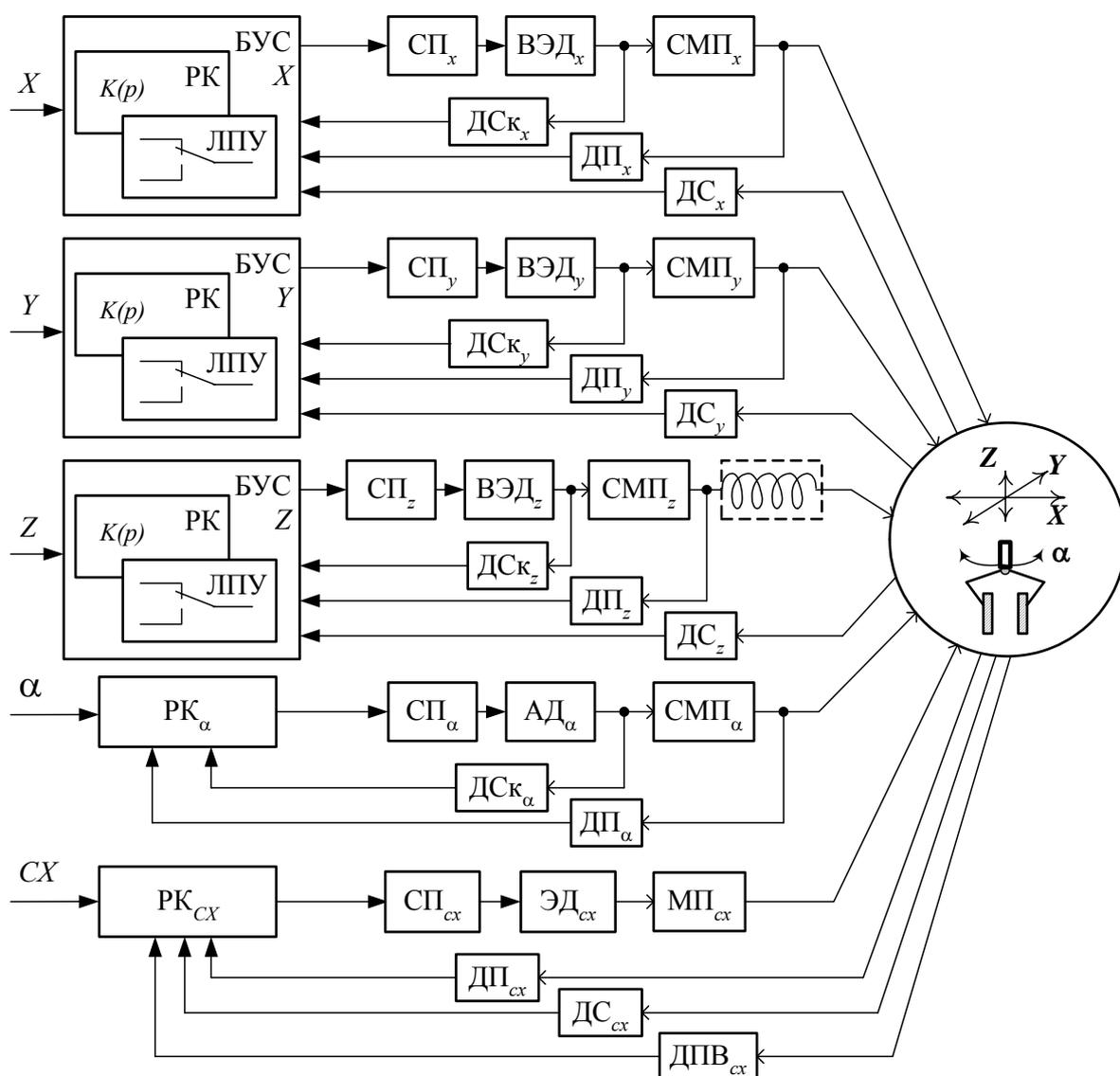


Рис. 4.9. Функциональная схема системы приводов РТС

## 4.2. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В РЕЖИМЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

По результатам исследований базовой структуры привода с линейным регулятором при решении задач управления положением установлено, что при обработке программно-заданной величины по положению хотя и нет абсолютного перерегулирования относительно заданного значения угла, но характер подхода к этому положению колебательный, что недопустимо при работе с субтильным ОР типа ТВС. При выполнении транспортных перемещений РТК в свободной зоне к установочным позициям схвата над контейнером с ТВС необходимо обеспечивать аperiodические переходные процессы снижения скорости и позиционирования без перерегулирования при максимальном быстродействии. В настоящее время в следящих приводах роботов в качестве регулятора положения используется, как правило, пропорциональное звено [43], однако более эффективным является использование систем с изменяющимся коэффициентом передачи [66]. Рассмотрим повышение качества позиционирования введением дополнительного нелинейного регулятора положения (НРП) в определённом месте структурной схемы привода.

Для получения требуемого закона изменения выходной координаты  $X^*(t)$  необходимо обеспечить управление

$$g^*(t) = L^{-1} x^*(p). \quad (4.5)$$

Изображение по Лапласу желаемой выходной координаты определяется

$$x^*(p) = \frac{W(p)}{1+W(p)} g^*(p) - \frac{V(p)}{1+W(p)} f(p) + \frac{M(p)}{1+W(p)}, \quad (4.6)$$

где  $p = d/dt$  – оператор Лапласа;

$W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$  – передаточная функция разомкнутой системы по

управляющему воздействию;

$A(p), B(p)$  – полиномы от  $p$  соответственно степени  $m$  и  $n$ ,  $m > n$ ;

$V(p) = \frac{C(p)}{D(p)}$  – передаточная функция разомкнутой системы по воз-

мущающему воздействию;

$C(p), D(p)$  – полиномы от  $p$  соответственно степени  $k$  и  $l$ ,  $l > k$ ;

$M(p)$  – полином от  $p$ , учитывающий начальные условия.

Для получения требуемой функции на выходе  $X^*(t)$  при скачкообразном входном воздействии  $g(t) = g_m 1(t)$  на вход системы следует подать управление вида  $g^*(t)$ . В соответствии с (4.6) оно определяется как

$$g^*(p) = \frac{1+W(p)}{W(p)} x^*(p) + \frac{V(p)}{W(p)} f(p) - \frac{M(p)}{W(p)} \quad (4.7)$$

или в полиномиальной форме

$$G^*(p) = G_n^* p^n + G_{n-1}^* p^{n-1} + G_{n-2}^* p^{n-2} + \dots + G_1^* p + G_0^*. \quad (4.8)$$

В зависимости от места приложения сигнала  $g^*(t)$  можно выделить четыре структуры (рис. 4.10, а). В них корректирующие нелинейные регуляторы  $E_i(p)$  включаются только при отработке ступенчатого входного воздействия. Рассмотрим особенности их построения.

*Структура 1.* Для формирования  $g^*(t)$  вводится последовательное звено, устанавливаемое на входе замкнутого привода (рис. 4.10, а). Оно располагается вне контура привода и, следовательно, не влияет на собственные свойства. Передаточная функция регулятора определяется из выражения (4.7) в виде

$$E_0(p) = \frac{g^*(p)}{g(p)} = \frac{\frac{1+W(p)}{W(p)} x^*(p) + \frac{V(p)}{W(p)} f(p) - \frac{M(p)}{W(p)}}{g(p)}. \quad (4.9)$$

Это выражение, в свою очередь, определяет и вид требуемого эквивалентного управляющего воздействия. Во временной области оно определяется

$$g^*(t) = L^{-1}(g^*(p)) = L^{-1}(E_0(p)). \quad (4.10)$$

*Структура 2.* Для получения требуемой переходной характеристики  $X^*(t)$  корректирующий нелинейный регулятор положения с передаточной функцией  $E_1(p)$  вводится в прямой тракт ошибки привода последовательно (рис. 4.10, б).

Изображение желаемой ошибки определяется в виде

$$\delta^*(p) = \frac{1}{1+E_1(p)W(p)} g(p) + \frac{V(p)}{1+E_1(p)W(p)} f(p) + \frac{M(p)}{1+E_1(p)W(p)}. \quad (4.11)$$

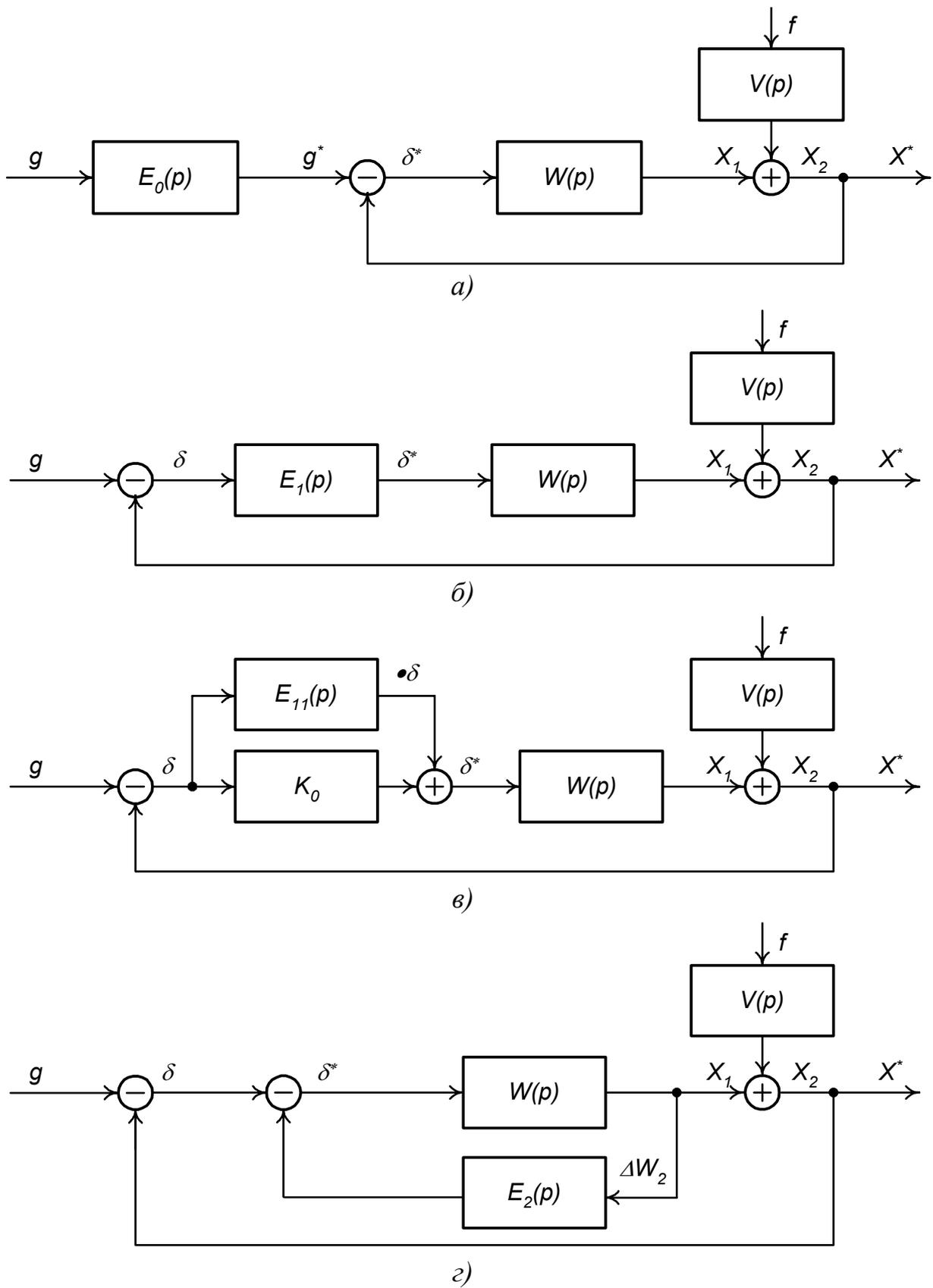


Рис. 4.10. Структурные схемы систем с дополнительным нелинейным регулятором

При нулевых начальных условиях, разрешая (4.11) относительно  $E_1(p)$ , получим

$$E_1(p) = \left[ \frac{g(p)}{\delta^*(p)} + \frac{V(p)f(p)}{\delta^*(p)} - 1 \right] / W(p).$$

Для рассматриваемого режима  $g(t) = g_m 1(t)$  звено  $E_1(p)$  можно определить через исходные полиномы в виде

$$E_1(p) = \frac{B(p) \left[ g_m + C(p)f(p) - G^*(p) \right]}{A(p)D(p)R(p)}. \quad (4.12)$$

Звено  $E_1(p)$  в случае известной взаимосвязи возмущения  $f(p)$  с управляющим воздействием и при его полной физической реализации обеспечивает требуемую переходную характеристику. Когда возмущение равно нулю или не учитывается, то выражение (4.12) упрощается и принимает вид

$$E_1(p) = \left[ \frac{g(p)}{\delta^*(p)} - 1 \right] / W(p) \quad (4.13)$$

или определяется через исходные полиномы

$$E_1(p) = \frac{B(p) \left[ g_m + E(p) \right]}{A(p)R(p)}. \quad (4.14)$$

Из анализа зависимостей семейства (4.11) ... (4.14) вытекает предположение о возможной реализации их, используя в качестве  $E_1(p)$  эквивалентный нелинейный функционал.

Однако идеальное обеспечение указанных соотношений трудно достижимо в силу сложности их физической реализуемости. При обработке скачкообразного входного воздействия оно и нежелательно, так как на объект управления будет действовать воздействие типа удар с импульсом силы  $F/\Delta t \forall \Delta t \rightarrow 0$ . Требуемую функцию  $X^*(t)$  с некоторой погрешностью можно получить путём введения нелинейного регулятора положения в прямой тракт и синтеза его характеристики на основе уравнений (4.7), (4.11).

Нелинейный регулятор можно рассматривать как корректирующее устройство, обеспечивающее  $X^*(t)$  при  $g(t) = g_m 1(t)$  и неизменяемой функции  $W(p)$ . Отметим, что при  $E_1(p) = K_0$  и  $W(p) = K_0 W_0(p)$  система

должна быть предварительно синтезирована на обеспечение показателей качества, соответствующих характеру выполняемого технологического процесса (транспортные перемещения ТВС в водной среде) : как правило,  $n = 1$ ;  $\sigma = 0 \dots 5 \%$ ;  $t_{п.п.} = (4 \dots 5) \pi / \omega_c$ .

*Структура 3.* Она представляет вариант параллельной коррекции нелинейным функционалом  $E_{11}(p)$  в тракте ошибки (рис. 4.10, в). Ошибка здесь определяется в виде

$$\delta^*(p) = \frac{1}{1 + [K_0 + E_{11}(p)]W(p)} g(p) + \frac{V(p)}{1 + [K_0 + E_{11}(p)]W(p)} f(p). \quad (4.15)$$

Для рассматриваемого режима  $g(t) = g_m 1(t)$  передаточная функция звена  $E_1(p)$  определяется

$$E_{11}(p) = \frac{g_m}{\delta^*(p)W(p)} + \frac{V(p)}{\delta^*(p)W(p)} f(p) - \delta^*(p)[1 + K_0W(p)]. \quad (4.16)$$

Для полной независимости исходного привода целесообразно принять  $K_0 = 1$ , отнеся требуемое его значение во внутренний контур. Тогда

$$E_{11}(p) = \frac{g_m}{\delta^*(p)W(p)} + \frac{V(p)}{\delta^*(p)W(p)} f(p) - \delta^*(p)[1 + W(p)]. \quad (4.17)$$

При необходимости могут быть учтены начальные условия.

*Структура 4.* Представляет введение нелинейного функционала  $E_2(p)$  во внутренние контуры. С позиций простоты реализации их целесообразно вводить параллельно коэффициенту передачи этого контура или параллельно сигналам обратных связей (рис. 4.10, г). Тогда выбор параметров звена  $E_2(p)$  можно вести с помощью стандартных уравнений [60]. Исходным уравнением в этом случае будет

$$Hed(p)x(p) = Ad(p)g^*(p) + C(p)f(p) + M(p), \quad (4.18)$$

где  $Hed(p) = [H(p) + E_2(p)]D(p)$ .

Члены при соответствующих степенях  $p$  в характеристическом полиноме  $Hed(p)$  представлены совокупностью

$$h_i = a_i + b_{i0} + b_{i00} + e_i(g^*),$$

где  $b_{i0}$  – коэффициент уравнения для исходной системы;

$b_{i00}$  – коэффициент уравнения для цепи обратной связи;

$e_i(g^*)$  – нелинейная составляющая в цепи обратной связи.

Нелинейные составляющие определяются при решении условий (4.18) во временной области.

В результате проведенного анализа структур можно сделать следующие выводы:

1. Имеется принципиальная возможность повышения качества переходных процессов при отработке скачкообразного входного воздействия введением дополнительного функционала (нелинейного корректирующего звена) во внутренний контур системы.

2. Желаемую переходную характеристику наиболее просто можно получить введением корректирующего нелинейного регулятора в прямой тракт.

Для определения характеристики нелинейного регулятора выполним следующую последовательность процедур [57]:

1. Формируется требуемая функция  $g^*(t)$  в виде

$$g^*(t) = g_m(1 - e^{-\alpha_1 \Delta t_1}) + g_m(1 - a_1)e^{-\alpha_2 \Delta t_2} + g_m(1 - a_1 - a_2)e^{-\alpha_3 \Delta t_3} + \dots \\ \dots + g_m(1 - \sum_{i=1}^{n-1} a_i)e^{-\alpha_n \Delta t_n}. \quad (4.19)$$

Функция (4.19) представляет собой совокупность нарастающих экспонент, формируемых на выходе системы во временные интервалы  $\Delta t_i$  в предположении, что система идентифицирована уравнением второго порядка. На каждом интервале  $\Delta t_i$  она имеет «свой» коэффициент усиления  $K_i$ , которому соответствует «свой» коэффициент относительного затухания и доминирующий корень характеристического уравнения  $\alpha_i$ . На коэффициенты ряда (4.19) наложим ограничения, которые обусловлены параметрами  $W(p)$  и вопросами реализации требуемой характеристики [57]:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1; a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_n; a_1 \approx 0,5; a_2 \approx 0,5 a_1; \dots a_i \approx 0,5 a_{i-1}; n = 4 \dots 6.$$

2. Определяется  $X^*(p) = LX^*(t)$  и далее  $g^*(p)$  согласно (4.7).

3. Определяются ошибки  $\delta(p)$  и  $\delta^*(p)$  согласно (4.15) для  $g(p)$   $g^*(p)$  соответственно.

4. Определяются  $\delta(t) = L^{-1}\delta(p)$  и  $\delta^*(t) = L^{-1}\delta^*(p)$ .

5. На основании  $\delta(t)$  и  $\delta^*(t)$  строится зависимость  $\delta^* = f(\delta)$ , для чего берутся значения  $\delta$  и  $\delta^*$  для одинаковых моментов времени. Эта функция и является искомой характеристикой нелинейного регулятора  $E = f(\delta)$ .

Выкладки по п.п. 2...4 трудоёмки. Для построения характеристики  $\delta^*(t)$  можно использовать процедуру инверсии обобщённого алгоритма численного метода последовательного типа [12] либо воспользоваться методом синтеза, предложенным в [63]. Более простым и наглядным методом является математическое моделирование на ПЭВМ на основе численных методов интегрирования Рунге – Кутты, Фельберга – Мерсона и др.

Реальные системы имеют элементы с насыщением в прямом тракте – усилители напряжения и мощности, исполнительные двигатели. Линейная зона усилителя  $\delta_{\text{л}}$  определяет максимальную скорость двигателя и привода с учётом механической передачи. При анализе процесса отработки скачкообразного входного воздействия  $g(t) = g_m 1(t)$  можно выделить два случая зависимости его от амплитуды:

- 1)  $g_m \leq \delta_{\text{л}} \forall \Omega_y \leq \Omega_m, \delta_y \leq \varepsilon_m$ ;
- 2)  $g_m > \delta_{\text{л}} \forall \Omega_y = \Omega_m, \varepsilon_y = (\varepsilon_m \vee 0)$ ,

где  $\Omega_y, \varepsilon_y$  – установившиеся значения скорости и ускорения. Каждый из этих случаев имеет свои особенности.

*Случай 1.*  $g_m \leq \delta_{\text{л}}$ . Для определения требуемой характеристики нелинейного регулятора и анализа динамики системы следует использовать уравнения (4.7), (4.11) с нулевыми начальными условиями; последний член не рассматривается, так как  $M(p) = 0$ . Следует оценивать составляющую переходного процесса по возмущению. Обычно имеет место возмущение с характеристикой типа «сухое трение». Переходная составляющая в этом случае определяется в основном постоянной времени контура тока и, как правило, на порядок меньше эквивалентной электромеханической постоянной времени. При значениях статической ошибки  $\delta_{\text{м}} = M_c / K_{\text{м}}$ , где  $K_{\text{м}}$  – добротность привода по моменту, рекомендуется вводить равную ей или  $0,5\delta_{\text{м}}$  зону нечувствительности. Следует отметить, что характеристика нелинейного регулятора  $\delta^* = f(\delta)$  деформируется здесь пропорционально

$g_m$ , что требует соответствующего изменения и коэффициента относительного затухания. В простейшем случае при реализации требуемого закона  $g^*(t)$  следует принимать  $\delta_{л} = g_m$ .

*Случай 2.*  $g_m > \delta_{л}$ . Он более распространён, поскольку перемещение рабочих органов у роботов и других объектов управления значительно больше линейной зоны  $\delta_{л}$ , т.е.  $\delta_{л} \ll g_m$ . При нормальном законе распределения появления  $g_m$  вероятность этого режима примерно 97 %. Для оценки качества переходного процесса и определения характеристики регулятора следует рассматривать переходный процесс при входе системы в линейную зону при  $\delta_{л} = g_m$  с максимальной скоростью  $\Omega = \Omega_m$ . При однозначном требовании монотонного переходного процесса по известному соотношению  $\delta_{м} = M_c / K_m$  выбирается коэффициент передачи по моменту  $K_m$ . Тогда в силу аддитивности ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям при характеристике момента типа «сухое трение» вторая составляющая в (4.7), (4.11) опускается.

Как известно, требования максимального быстродействия и монотонности характера переходного процесса противоречивы и при постоянном значении коэффициента передачи редко достижимы. Для простоты и наглядности возьмём передаточную функцию разомкнутой системы в виде

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)}, \quad (4.20)$$

которой соответствует передаточная функция замкнутой системы

$$\Phi(p) = \frac{1}{\frac{T}{K}p^2 + \frac{1}{K}p + 1}. \quad (4.21)$$

Граничным условием аperiodического переходного процесса при нулевых начальных условиях является значение  $\xi = 1$ , при котором характеристическое уравнение имеет вещественные корни. Оно выполняется при

$$K \leq \frac{1}{4T}. \quad (4.22)$$

Выражения, определяющие переходный процесс для системы вида (4.11) при входе в линейную зону с начальной скоростью  $\Omega_m$  и значении

$g_m = \delta_{\text{л}}$ , при различных значениях коэффициента усиления относительно критического будут иметь следующий вид:

$$g(t) = \begin{cases} (\delta_{\text{л}} \cos \omega t + \frac{\delta_{\text{л}}/2T + \Omega_m}{\omega} \sin \omega t) e^{-\frac{t}{2T}} \quad \forall K > \frac{1}{4T}; \\ (\delta_{\text{л}} \text{ch} \omega t + \frac{\delta_{\text{л}}/2T + \Omega_m}{\omega} \text{sh} \omega t) e^{-\frac{t}{2T}} \quad \forall K < \frac{1}{4T}; \\ (\delta_{\text{л}} + (\delta_{\text{л}}/2T + \Omega_m) e^{-\frac{t}{2T}}) \quad \forall K = \frac{1}{4T}. \end{cases} \quad (4.23)$$

Проблемным в данном случае является вопрос выбора ширины линейной зоны  $\delta_{\text{л}}$ . Выбор значения  $\delta_{\text{л}}$ , равного контурной ошибке, определяемой как  $\delta_{\text{к}} = \Omega_m / K_{\Omega}$ , здесь неприемлем. Необходимым условием для системы вида (4.23) является

$$\Omega_m < |\alpha| \delta_{\text{л}}. \quad (4.24)$$

где  $\alpha$  – модуль вещественной части кратных корней. Рекомендуется характеристика нелинейного регулятора, состоящая из трёх участков: параболы, участка типа «насыщение» и зоны нечувствительности, определяемой значением критической скорости характеристики «сухое» трение. Наиболее приемлемой характеристикой, обеспечивающей поставленные требования в этом режиме, является характеристика, представленная на рис. 4.11, а и образованная совокупностью двух составляющих – постоянной и переменной:

$$K = K_0 - K(\delta, t) F_1(\delta), \quad (4.25)$$

где  $K(\delta, t) = \Delta K \sin \frac{2\pi}{\delta_{\text{л}} - \delta_1} \delta_2(t)$ ;  $\Delta K = (0, 1 \dots 0, 2) K_0$ ;  $\delta_2(t) = \delta(t) - \delta_1$ ;

$$F_1(\delta) = \begin{cases} 1 \quad \forall \delta_1 |\delta(t)| < \delta_{\text{л}} \\ 0 \quad \forall \delta(t) < \delta_1 \end{cases}.$$

Характерные значения ошибок выбираются в следующих соотношениях:  $\delta_{\text{л}} = (0, 8 \dots 1, 0) \delta_{\text{к}}$ ;  $\delta_1 = (0, 05 \dots 0, 1) \delta_{\text{л}}$ . Положительный эффект даёт и введение зоны нечувствительности  $\delta = (0, 3 \dots 0, 5) \delta_1$ . Практически ана-

логичные результаты можно получить, используя характеристику  $K = F(\delta)$  с четырьмя опорными точками, представленную на рис. 4.11, б).

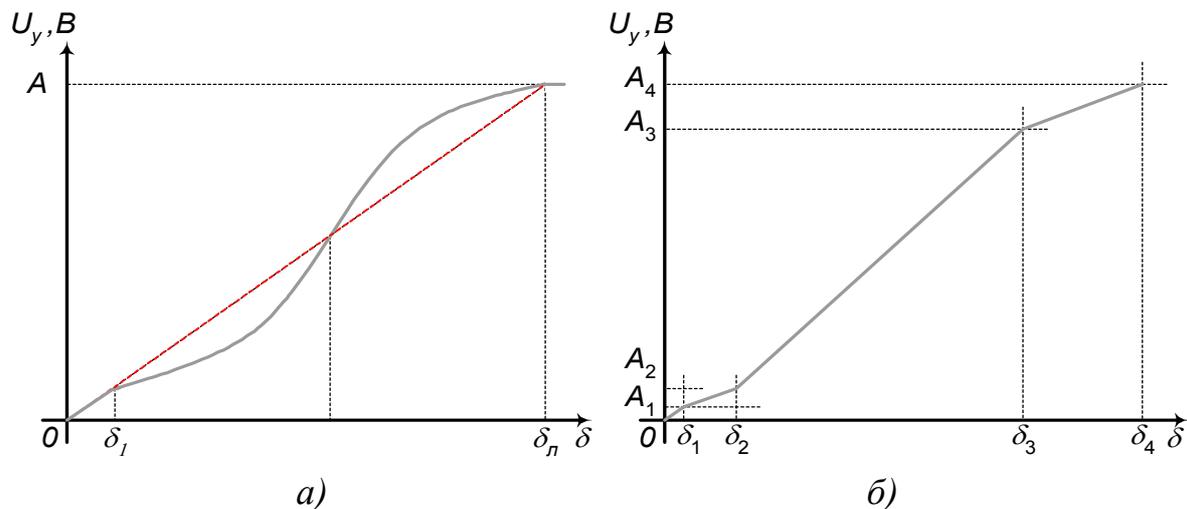


Рис. 4.11. Характеристики нелинейного регулятора положения

Нелинейный регулятор может быть реализован как программным путём на уровне управляющей программы цифрового привода, так и аппаратным в виде дополнительного модуля с программируемой памятью. Структура НРП представлена на рис. 4.12. Регулятор содержит набор линейных функций позиционной ошибки  $F_i(\delta)$  и аналоговый переключатель  $K$ , формирующий желаемую характеристику регулятора из заданного набора функций по величине рассогласования  $\delta$ .

Аналогичным образом может быть реализован и нелинейный регулятор в канале управления силой при решении задач работы привода на упор, а желаемая переходная характеристика наиболее просто реализуется кусочно-линейной аппроксимацией расчётной передаточной функции. В таком виде, например, реализован нелинейный регулятор в гидроприводе сопла в станке-термопластавтомате.

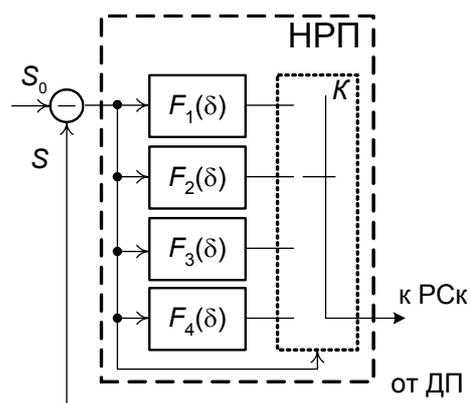


Рис. 4.12. Структура НРП

Исследования вентильного привода выполним на основе структуры, приведённой на рис. 4.12. Функциональная схема позиционного привода с нелинейным регулятором положения представлена на рис. 4.13.

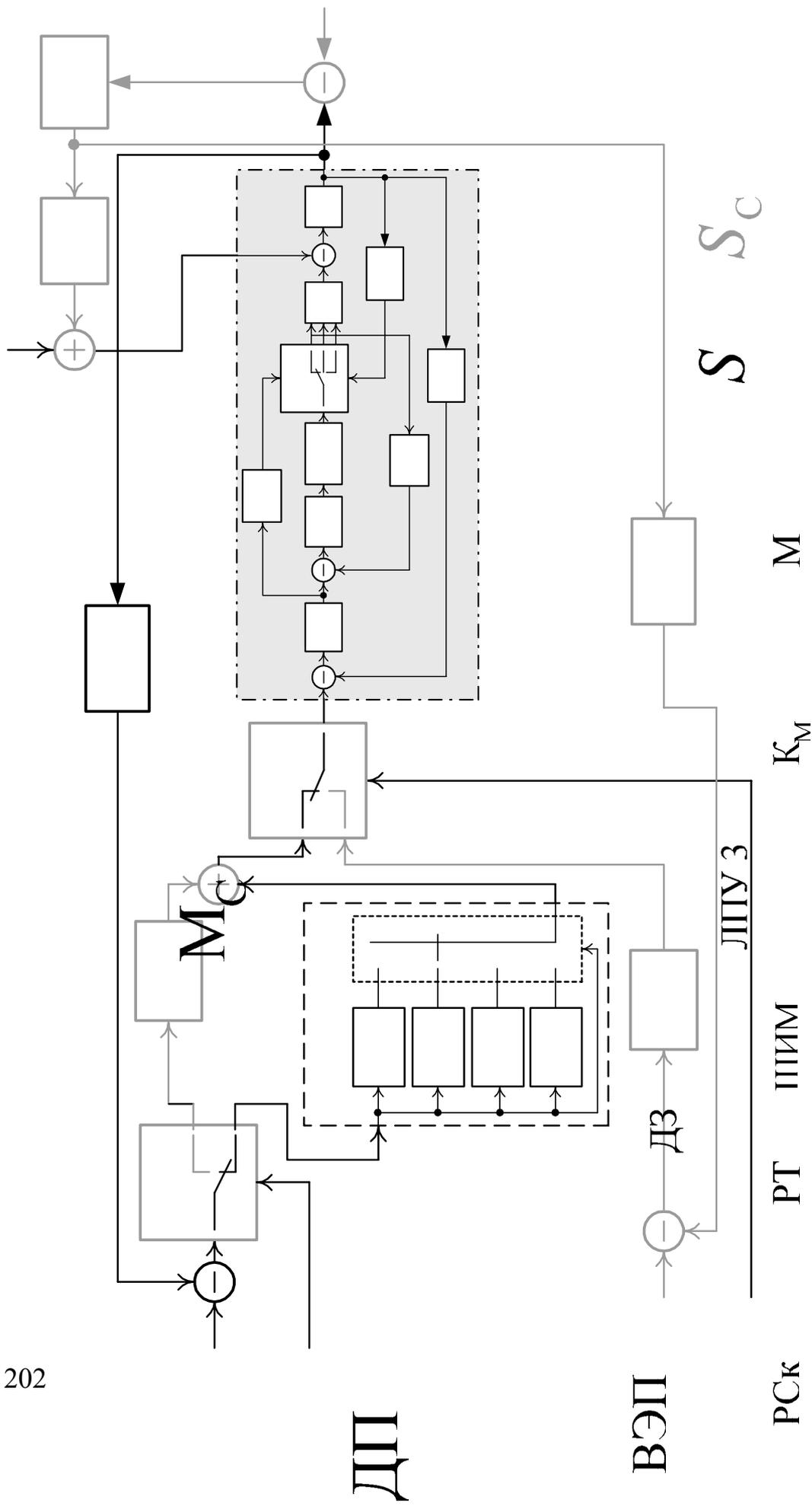


Рис. 4.13. Функциональная схема вентиляционного привода с нелинейным регулятором в режиме позиционного управления

ДПР

ДТ

ДСк

Цифровое моделирование проводилось для модели вентильного позиционного привода (3.15), (3.16) с нелинейным регулятором рис. 4.11, б. При этом значения коэффициентов составили:  $\delta = [0,2; 2,5; 9,0; 10,0]$ ;  $A = [0,2; 1,0; 12,0; 17,0]$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 4.14. Переходный процесс имеет аperiодический характер, без перерегулирования и колебаний, а время переходного процесса уменьшилось до 0,18 с. Таким образом, использование нелинейного регулятора положения в позиционном приводе позволяет полностью исключить моментные и скоростные перегрузки при работе с хрупким и субтильным объектом.

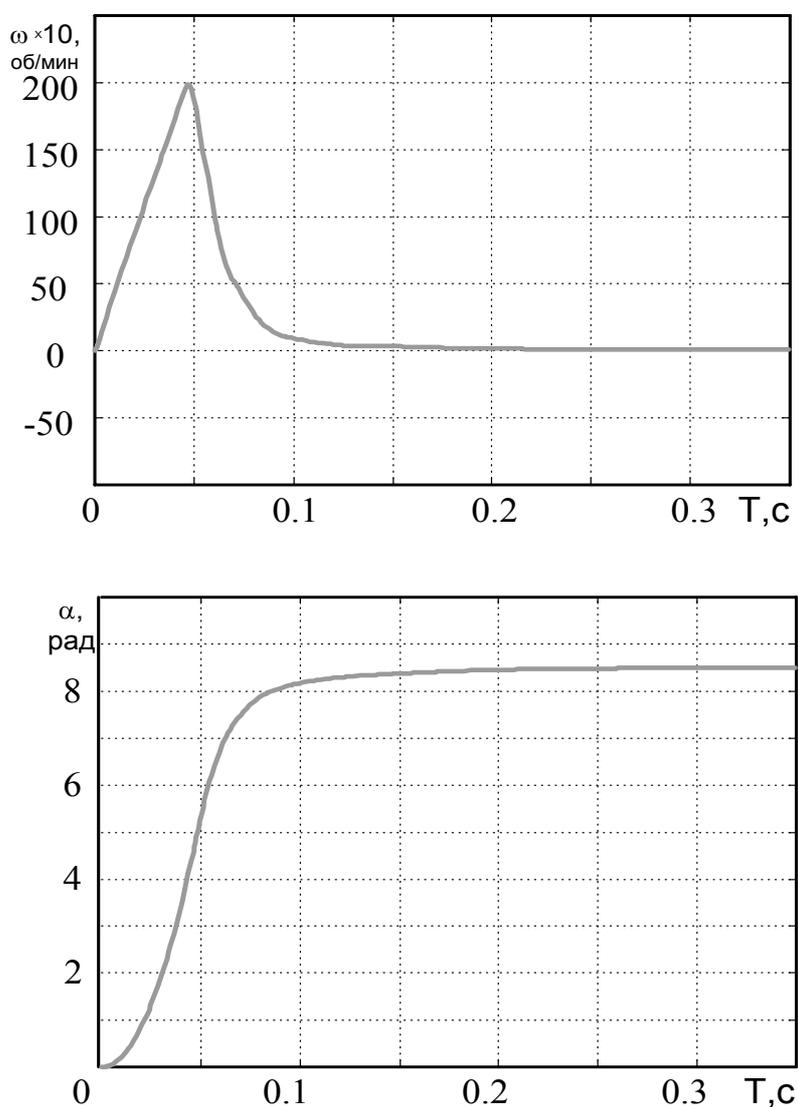


Рис. 4.14. Переходные характеристики позиционного привода с нелинейным регулятором

### 4.3. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С НЕЗАВИСИМЫМ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

При траекторном перемещении в свободной зоне алгоритмы движения предполагают взаимосвязанное управление перемещением механизма робота по координатным осям. Однако при выполнении элементарных движений динамику и управление по каждой из координат можно считать не зависимыми от других. Это обстоятельство существенно упрощает синтез и анализ как программного, так и адаптивного управления системой. Исходя из этого, рассмотрим динамические свойства и возможности управления РТК на примере управления одной координатой, например  $X$ .

Опишем динамику механизма перемещения с помощью вентильного привода с ШИМ. Структура привода является существенно нелинейной, прямые аналитические методы для исследования этих систем практически не реализуемы. Исследования выполнены методом математического моделирования с последующим проведением экспериментальных работ [7, 45].

Функциональная схема вентильного привода с линейным регулятором положения приведена на рис. 4.15. Здесь приняты следующие обозначения: ВЭП – вентильный электропривод; ЛРП и НРП – линейный и нелинейный регуляторы положения; РСк – регулятор скорости; РС – регулятор силы; РТ – регулятор тока; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ДЗ – дифференциатор знака; ЛПУ1...ЛПУ3 – логические переключающие устройства;  $K_M$  – матрица силовых ключей; М – исполнительный двигатель; ДТ – датчик тока; ДПР – датчик положения ротора; ДСк – тахогенератор; ДП – датчик положения;  $F(\Delta S)$  – нелинейность типа «упор»;  $C_M$  – матрица жёсткости; ДС – датчик силы.

Электропривод представляет собой регулятор скорости, выполненный по принципу подчинённого регулирования [25]. Регуляторы скорости и тока реализуют ПИ-закон. Тип привода – ЭПБ-2 с двигателем 2ДВУ165М. В двигатель встроен переключатель ПДФ-8, имеющий датчик положения ротора, датчик скорости и импульсный датчик положения. Датчик тока – шунт с фильтрацией сигнала. Замыкание по положению выполняется в микроЭВМ контроллера привода с программной реализацией регулятора положения.



Структура привода обладает рядом особенностей, среди которых выделим следующие:

1. В цепи обратной связи используется импульсный датчик, формирующий унитарный код с частотой  $T(t)^{-1}$ , определяемой как

$$T(t)^{-1} = \frac{V_x}{NK_t} \text{ [Гц]}, \quad (4.26)$$

где  $V_x$  [рад/мин] – частота вращения вала двигателя;  $N$  – единица дискретности датчика обратной связи с размерностью [360 град/н];  $n$  – число импульсов на оборот;  $K_t$  – масштабный коэффициент времени.

2. Абсолютная выходная координата привода формируется в аппаратном интерфейсе в виде параллельного кода  $X[\Delta T]$ .

3. Управляющее воздействие формируется в микроЭВМ в параллельном коде  $G[\Delta T]$  с частотой, определяемой несущей частотой программного цикла  $T$ .

4. Ошибка формируется в микроЭВМ в параллельном коде  $\delta[\Delta T]$ .

5. В схеме привода имеется ЛПУ, коммутирующее фазные обмотки статора в функции углового положения ротора. Функция переключения определяется выходным сигналом переключателя ДПР.

Структурная схема модели привода представлена на рис. 4.16.

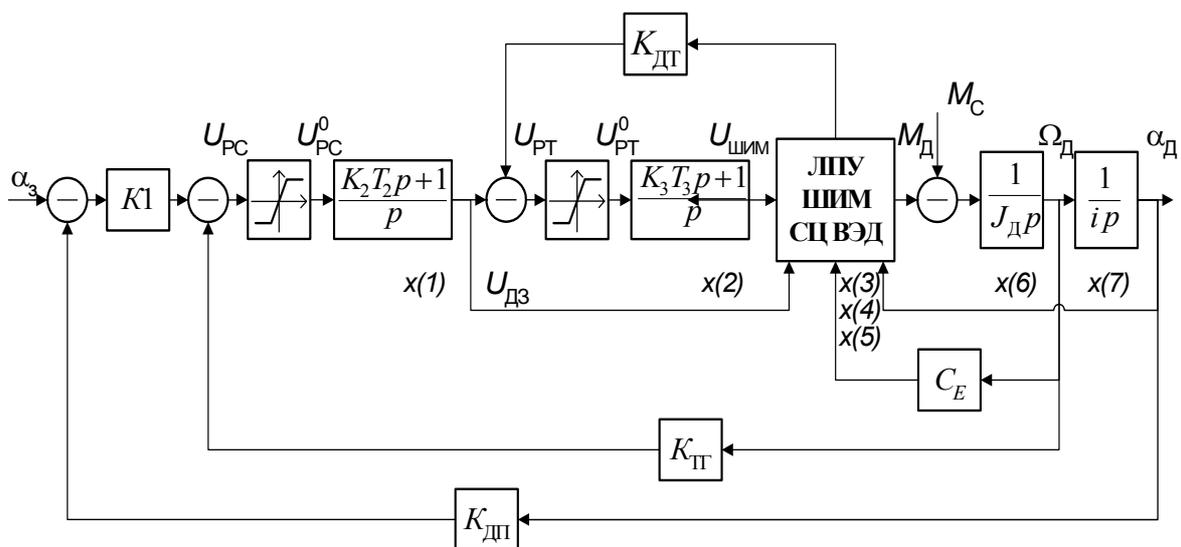


Рис. 4.16. Структурная схема привода

Полная система уравнений, описывающих привод, включает в себя три группы уравнений:

- линейные уравнения регуляторов скорости и тока, уравнения обратных связей и уравнения электромагнитных процессов в обмотке статора;
- дискретные уравнения ШИМ;
- логические уравнения совместно с дискретными уравнениями описания работы логического переключающего устройства.

Самое сложное звено в описании – это совокупность ШИМ–ЛУ–ИД–ДПР. Определим математическую модель вентильного привода с учётом приведённых выше особенностей:

$$\begin{aligned}
 U_{PC} &= K_1(\alpha_3 - K_{ДП}X(7)) - K_{ТГ}X(6); \\
 X(7) &= \alpha_{ДВ}; \\
 X(6) &= \Omega_{ДВ}; \\
 U_{PC}^0 &= \begin{cases} U_{PC} \forall -U_C \leq U_{PC} \leq U_C \\ |U_C| \cdot \text{sgn} U_{PC} \forall |U_{PC}| > U_C \end{cases}; \\
 pX(1) &= K_2 U_{PC}^0; \\
 U_{ДЗ} &= X(1) + K_2 T_2 U_{PC}^0; \\
 U_{РТ} &= U_{ДЗ} - K_{ДТ}(I_a^* + I_b^* + I_c^*); \\
 I_a^* &= \begin{cases} I_a \forall I_a \geq 0 \\ 0 \forall I_a < 0 \end{cases}; \\
 I_b^* &= \begin{cases} I_b \forall I_b \geq 0 \\ 0 \forall I_b < 0 \end{cases}; \\
 I_c^* &= \begin{cases} I_c \forall I_c \geq 0 \\ 0 \forall I_c < 0 \end{cases}; \\
 U_{РТ}^0 &= \begin{cases} U_{РТ} \forall -U_T \leq U_{РТ} \leq U_T \\ |U_T| \cdot \text{sgn} U_{РТ} \forall |U_{РТ}| > U_T \end{cases}; \\
 pX(2) &= K_3 U_{РТ}^0; \\
 U_{ШИМ} &= X(2) + K_3 T_3 U_{РТ}^0; \\
 X(3) &= I_a; \quad X(4) = I_b; \quad X(5) = I_c; \\
 I_c &= -(I_a + I_b).
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Уравнения для прямого вращения.

A1.  $0^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 60^0$ :

1.1.  $I_b \neq 0$ :

$$\begin{aligned} (L+M)(pX(4) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_b + I_c) + E_{bc} &= 0; \\ (L+M)(pX(3) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_a + I_c) + E_{ac} &= 0; \\ M_{\text{ДВ}} = M_{ac} + M_{bc} &= \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_c \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_b \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right). \end{aligned} \quad (4.28)$$

1.2.  $I_b = 0$ :

$$\begin{aligned} 2(L+M)pX(3) + 2R_{\Phi}X(3) &= U - E_{bc}; \\ M_{\text{ДВ}} = M_{ac} &= \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) \right); \\ E_{ab} = E_{ac} = E_{bc} &= C_M \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}). \end{aligned}$$

A2.  $60^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 120^0$ :

2.1.  $I_c \neq 0$ :

$$\begin{aligned} (L+M)(pX(4) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_b + I_c) + E_{bc} &= 0; \\ (L+M)(pX(3) + pX(4)) + R_{\Phi}(I_a + I_b) + E_{ab} &= 0; \\ M_{\text{ДВ}} = M_{ab} + M_{bc} &= \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_b \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_c \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right). \end{aligned} \quad (4.29)$$

2.2.  $I_c = 0$ :

$$\begin{aligned} 2(L+M)pX(4) + 2R_{\Phi}X(4) &= U - E_{ab}; \\ M_{\text{ДВ}} = M_{ab} &= \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) \right). \end{aligned}$$

A3.  $120^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 180^0$ :

3.1.  $I_a \neq 0$ :

$$\begin{aligned} (L+M)(pX(4) + pX(3)) + R_{\Phi}(I_b + I_a) + E_{ba} &= 0; \\ (L+M)(pX(4) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_b + I_c) + E_{bc} &= 0; \\ M_{\text{ДВ}} = M_{ab} + M_{bc} &= \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_b \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right). \end{aligned} \quad (4.30)$$

3.2.  $I_a = 0$ :

$$2(L + M)pX(5) + 2R_{\Phi}X(5) = U - E_{b-};$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{b-} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) \right).$$

A4.  $180^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 240^0$ :

4.1.  $I_b \neq 0$ :

$$(L + M)(pX(4) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_b + I_-) + E_{b-} = 0;$$

$$(L + M)(pX(3) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_a + I_c) + E_{ac} = 0; \quad (4.31)$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{a-} + M_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_- \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_b \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right).$$

4.2.  $I_b = 0$ :

$$2(L + M)pX(3) + 2R_{\Phi}X(3) = U - E_{a-};$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{a-} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_c \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) \right).$$

A5.  $240^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 300^0$ :

5.1.  $I_- \neq 0$ :

$$(L + M)(pX(3) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_a + I_-) + E_{a-} = 0;$$

$$(L + M)(pX(4) + pX(3)) + R_{\Phi}(I_b + I_a) + E_{ab} = 0; \quad (4.32)$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{a-} + M_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_c \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right).$$

5.2.  $I_- = 0$ :

$$2(L + M)pX(4) + 2R_{\Phi}X(4) = U - E_{ab};$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) \right).$$

A6.  $300^0 < \alpha_{\text{ДВ}} \leq 360^0$ :

6.1.  $I_a \neq 0$ :

$$(L + M)(pX(3) + pX(4)) + R_{\Phi}(I_a + I_b) + E_{ab} = 0;$$

$$(L + M)(pX(4) + pX(5)) + R_{\Phi}(I_b + I_-) + E_{b-} = 0; \quad (4.33)$$

$$M_{\text{ДВ}} = M_{ab} + M_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_c \cos(\alpha_{\text{ДВ}} - \frac{\pi}{6}) + I_a \cos(\alpha_{\text{ДВ}} + \frac{\pi}{6}) \right).$$

6.2.  $I_a = 0$ :

$$2(L + M)pX(5) + 2R_\Phi X(5) = U - E_{b-};$$

$$M_{ДВ} = M_{b-} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_M \left( I_b \cos\left(\alpha_{ДВ} - \frac{\pi}{6}\right) \right).$$

Уравнения для обратного вращения:

В1.  $300^0 < \alpha_{ДВ} \leq 360^0$  соответствует группе уравнений А3;

В2.  $240^0 < \alpha_{ДВ} \leq 300^0 \rightarrow A2$ ;

В3.  $180^0 < \alpha_{ДВ} \leq 240^0 \rightarrow A1$ ;

В4.  $120^0 < \alpha_{ДВ} \leq 180^0 \rightarrow A6$ ;

В5.  $60^0 < \alpha_{ДВ} \leq 120^0 \rightarrow A5$ ;

В6.  $0^0 < \alpha_{ДВ} \leq 60^0 \rightarrow A4$ ;

$$U = U_{ЗПТ} \frac{U_{ШИМ}}{K_3 U_{РТ}};$$

$$pX(6) = \frac{M_{ДВ} - M_C}{J_{ДВ}}; \quad (4.34)$$

$$pX(7) = \frac{X(6)}{i},$$

где  $p$  – оператор дифференцирования;  $U_{РС}$ ,  $U_{РТ}$ ,  $U_{ШИМ}$  – напряжения на выходах соответствующих регуляторов;  $U_C$  и  $U_T$  – напряжения насыщения регуляторов скорости и тока соответственно,  $U_{ЗПТ}$  – напряжение питания звена постоянного тока силового преобразователя;  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  – токи в фазах двигателя;  $L$  и  $M$  – индуктивность и взаимоиндуктивность обмоток;  $R_\Phi$  – активное сопротивление обмотки фазы двигателя.

Ввиду высокой сложности и нелинейности системы уравнений (4.27) – (4.34) для исследования переходных процессов в приводе представим структурную схему и соответствующую ей систему уравнений с учётом следующих допущений:

– частота квантования  $T^{-1}$  сигналов  $X[\Delta T]$ ,  $G[\Delta T]$ ,  $\delta[\Delta T]$  значительно превышает частоту среза линейной части привода  $\omega$  ( $T^{-1} > 10\omega$ );

– совокупность элементов ШИМ–ЛУ–ИД–ДПР, по рекомендациям [33], описывается эквивалентным звеном с передаточной функцией вида

$$W_{ДВ} = \frac{1/z_{\Phi}}{1 + pT_{\Phi}}, \quad (4.35)$$

где  $z_{\Phi}$  и  $T_{\Phi}$  – полное сопротивление и постоянная времени фазной обмотки.

При высокой частоте коммутации ШИМ (>10 кГц), значительно превышающей частоту среза, по теореме Котельникова можно считать, что ШИМ не влияет на динамические свойства системы управления перемещением.

Упрощенная структурная схема вентильного позиционного привода, подготовленная для составления уравнений для моделирования структурным методом, представлена на рис. 4.17.

Система уравнений в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} Y1 &= x_3 - K_{ДП}X(5); \\ Y2 &= Y1K_1; \\ Y3 &= Y15 - K_{ТГ}Y19; \\ Y4 &= X(1) + K_2T_2Y3; \\ Y5 &= Y13 - K_{ДГ}Y17; \\ Y6 &= X(2) + K_3T_3Y5; \\ Y8 &= Y18 - C_EY19; \\ Y9 &= C_MY17; \\ Y10 &= Y9 - M_C; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$Y13 = \begin{cases} 10 \forall Y4 \geq 10; \\ Y4 \forall -10 < Y4 < 10; \\ -10 \forall Y4 \leq -10; \end{cases}$$

$$Y15 = \begin{cases} 10 \forall Y2 \geq 10; \\ Y2 \forall -10 < Y2 < 10; \\ -10 \forall Y2 \leq -10; \end{cases}$$

$$Y17 = \begin{cases} 25 \forall X(3) \geq 25; \\ X(3) \forall -25 < X(3) < 25; \\ -25 \forall X(3) \leq -25; \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
Y18 &= \begin{cases} 300 \forall Y6 \geq 300; \\ Y6 \forall -300 < Y6 < 300; \\ -300 \forall Y6 \leq -300; \end{cases} \\
Y19 &= \begin{cases} 200 \forall X(4) \geq 200; \\ X(4) \forall -200 < X(4) < 200; \\ -200 \forall X(4) \leq -200; \end{cases} \\
pX(1) &= K_2 Y3; \\
pX(2) &= K_3 Y5; \\
pX(3) &= (Y8/z_\Phi - X(3))/T_\Phi; \\
pX(4) &= Y10/J_D; \\
pX(5) &= Y19/i.
\end{aligned} \tag{4.37}$$

При моделировании приняты значения коэффициентов, ориентированные на конкретный привод и реальный технологический процесс, для которого в дальнейшем были проведены экспериментальные исследования. Вентильный двигатель 2ДВУ165М имеет следующие параметры:  $P_M = 2,7$  кВт;  $M_H = 17$  Нм;  $N_H = 2000$  об/мин;  $I_H = 12$  А;  $I_m = 25$  А. Коэффициенты систем уравнений (3.15), (3.16) имеют следующие значения:  $K_1 = 1,0$ ;  $K_2 = 700$ ;  $K_3 = 5500$ ;  $K_{дт} = 0,4$  в/а;  $K_{тг} = 0,0477$  в/ (рад·с);  $K_{дп} = 1,0$ ;  $T_2 = 0,01$  с;  $T_3 = 0,01$  с;  $T_\Phi = 0,0088$  с;  $z_\Phi = 1,0$  ом;  $C_E = 1,4$ ;  $C_M = 1,4$ ;  $J_D = 0,0051$  кг·м<sup>2</sup>;  $I = 1$ .

Цифровое моделирование проводилось на ПЭВМ типа IBM PC с использованием пакета *MATLAB*. Переходная характеристика модели привода представлена на рис. 4.18.

Численное интегрирование дифференциальных уравнений осуществлялось методом Рунге – Кутты V с заданной точностью  $\delta = 1 \cdot e^{-4}$  с автоматическим выбором шага интегрирования. За номинальную добротность привода принято ее паспортное значение  $K_V = 75$  с<sup>-1</sup>. Этому значению соответствует коэффициент передачи регулятора положения  $K_1 = 1$ . Амплитуда скачка угла составляла  $\alpha = 8,5$  рад. Привод имеет перерегулирование по скорости 33 %. По положению хотя и нет абсолютного перерегулирования относительно заданного значения угла, но характер подхода к заданному положению колебательный. Перерегулирование по положению будем рассматривать относительно амплитуды входа системы в линейную зону, что на графиках соответствует изменению знака ускорения. При этом переходный процесс по положению рассматривается и оценивается как отработка скачка угла с начальными условиями  $g = \alpha = \delta_{д} \cdot 1(t)$ ,  $\dot{X} = \Omega_{д}$ ,  $\ddot{X} = \varepsilon_{д}$ .

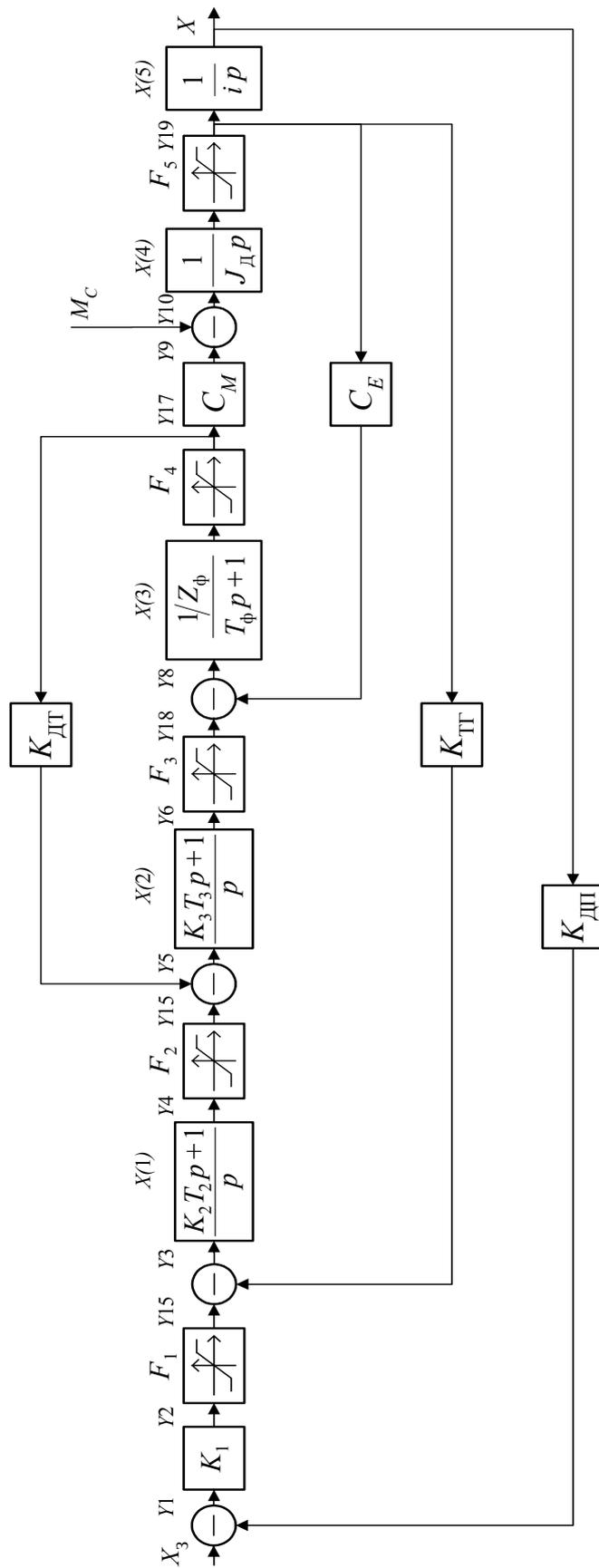


Рис. 4.17. Структурная схема вентильного привода с линейным регулятором в контуре положения

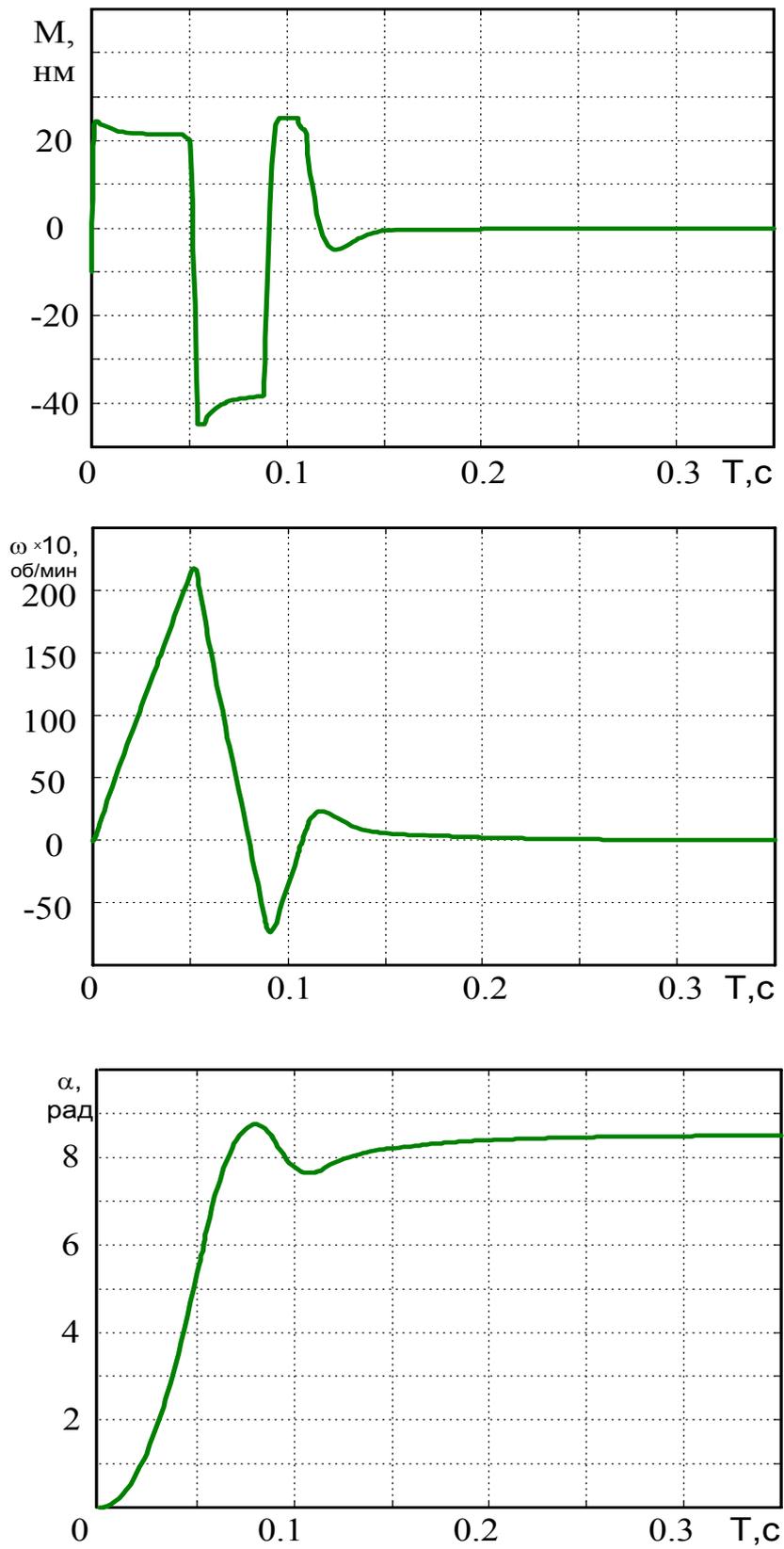


Рис. 4.18. Переходные характеристики позиционного привода с линейным регулятором

Для исследуемой системы согласно переходной характеристике имеем:  $\delta_{л} = 6$  рад,  $\Omega_{л} = 2000$  об/мин,  $\varepsilon_{л} = 48300$  с<sup>-2</sup>; относительное перерегулирование, определённое при нулевом и максимальном значении скорости на этом участке составляет 0,75 рад или 12,5 %; общее время позиционирования  $t_{п} = 0,22$  с; время переходного процесса  $t_{пп} = 0,168$  с.

Линейный регулятор не обеспечивает асимптотической устойчивости программного движения, причём переходные процессы при обработке перемещений могут иметь колебательный характер. Кроме того, неизбежные в процессе эксплуатации возмущения и неопределённости (изменения массо-инерционных характеристик, дрейф коэффициентов трения и упругих деформаций и т.п.) приводят к снижению точности позиционирования, уменьшению быстродействия, а в ряде случаев и к аварийным ситуациям, что в принципе недопустимо при работе с такими объектами, как ТВС.

Это требует разработки и использования более совершенных систем, например, с адаптивным регулятором с сигнальной и параметрической самонастройкой либо систем с изменяющимся коэффициентом передачи, желаемый характер переходных процессов в которых достигается введением дополнительного нелинейного функционала.

Для обеспечения высокого быстродействия и апериодического переходного процесса в прямом тракте привода необходимо использование нелинейного регулятора положения.

Рассмотрим работу привода при управлении им по каналу силы. В этом случае структура привода (см. рис. 4.15) примет вид, представленный на рис. 4.19.

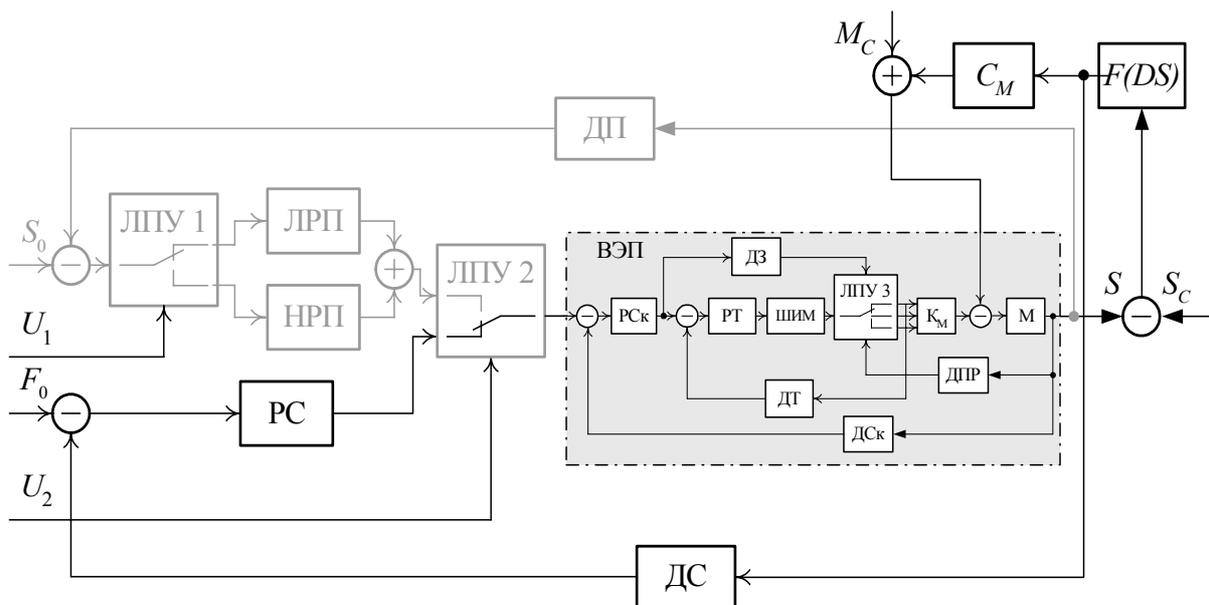


Рис. 4.19. Функциональная схема вентильного привода в режиме управления силой

ЭП имеет силовую главную обратную связь, замыкаемую через датчик силы ДС и линейный регулятор РС. Задачи управления силой взаимодействия с объектом и её стабилизации рассматриваются при работе привода на упор при отсутствии переключения структуры привода с управления по силе на позиционное.

При выполнении установочных операций в режимах с ограничением развиваемых сил важное значение имеет вид нелинейной характеристики  $F(\Delta s)$ , определяющей характер взаимодействия объекта в схвате работа с окружающей средой (стенками ячейки контейнера, например).

При работе привода в зоне линейных деформаций и условия неразрушаемости объекта работ можно выделить четыре основных вида упоров:

1. «Линейный» упор.

$$F_1(s) = \begin{cases} 0 \forall (S - S_C) \leq 0; \\ K_1(S - S_C) \forall (S - S_C) > 0. \end{cases} \quad (4.38)$$

2. «Жёсткий» упор с зоной нечувствительности.

$$F_2(s) = \begin{cases} 0 \forall (S - S_C) \leq \delta; \\ K_2(S - S_C) \forall (S - S_C) > \delta. \end{cases} \quad (4.39)$$

3. Упор с гистерезисом.

$$F_3(s) = \begin{cases} 0 \forall (S - S_C) \leq 0; \\ K_1(S - S_C) \forall (S - S_C) > 0 \wedge dS/dt > 0; \\ K_1(S - S_C - \delta) \forall (S - S_C) > \delta \wedge dS/dt < 0; \\ 0 \forall 0 < (S - S_C) < \delta \wedge dS/dt < 0. \end{cases} \quad (4.40)$$

4. Упор с «ударом» и гистерезисом.

$$F_4(s) = \begin{cases} 0 \forall (S - S_C) \leq 0; \\ H \forall 0 < (S - S_C) < \delta \wedge dS/dt > 0; \\ K_1(S - S_C) \forall (S - S_C) > \delta \wedge dS/dt > 0; \\ K_1(S - S_C - \delta) \forall (S - S_C) > \delta \wedge dS/dt < 0; \\ 0 \forall 0 < (S - S_C) < \delta \wedge dS/dt < 0, \end{cases} \quad (4.41)$$

где  $S_C$  – координата упора;  $\delta$  – величина зоны нечувствительности;  $K$  – коэффициент линейной взаимосвязи упругих деформаций с величиной силы ( $K_2 \gg K_1$ );  $H$  – пиковое значение силы в момент удара.

Для исследования привода с управлением по силе по модели (см. рис. 4.17) дополним структуру исполнительной части датчиком силы и моделью упора (4.38) ... (4.41). Структура привода примет вид, представленный на рис. 4.20. Дополнительные коэффициенты системы имеют значение:  $C_E = 1,4$ ;  $C_M = 1,4$ ;  $K_5 = 1,0$ ;  $K_7 = 1,0 \cdot 10^{-2}$ ;  $i = 1000$ ;  $C_D = 5,0 \cdot 10^5$ ;  $K_1 = 10$ ;  $K_2 = 1,0 \cdot 10^7$ ;  $H = 0,08$ ;  $\delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

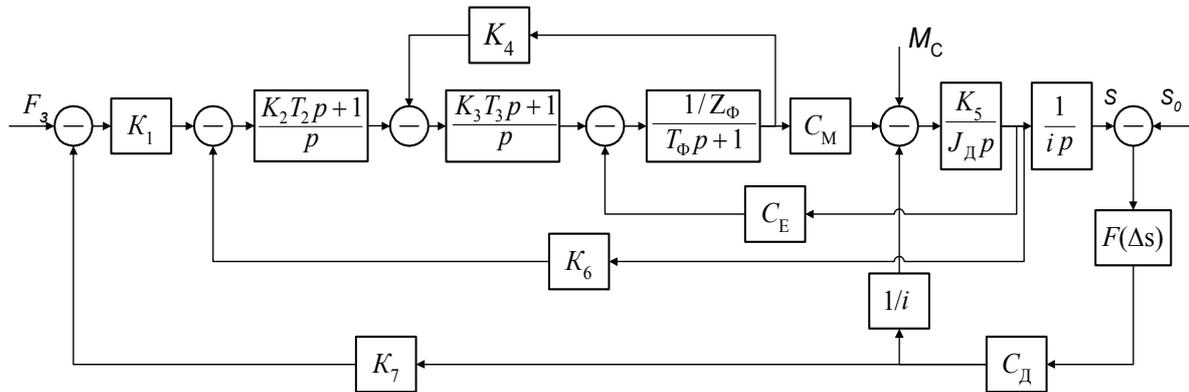


Рис. 4.20. Структурная схема привода с управлением по силе

По итогам моделирования силового привода с упорами (4.38) – (4.41) получены переходные процессы в системе, представленные на рис. 4.21 – 4.24 соответственно. Из приведённых графиков видно, что в момент контакта объекта с препятствием (соответствует моменту времени  $t_k = 0,3$  с) начинается явно выраженный затухающий колебательный процесс со случайными периодом и амплитудой, а параметры колебаний и время переходного процесса существенно зависят от упругих свойств объекта работ (в т.ч. датчика) и самого препятствия. Так, для характеристики  $F_1(\Delta s)$  в системе возникают устойчивые колебания, которые могут привести к разрушению ТВС, что недопустимо (рис. 4.21). Значительное увеличение жёсткости упора  $F_2(\Delta s)$  сокращает время переходного процесса до 0,05 с, но при этом в приводе сохраняются значительные высокочастотные колебания момента (рис. 4.22).

Учёт гистерезиса упора  $F_3(\Delta s)$  позволяет уменьшить амплитуду моментных колебаний даже при невысокой жёсткости упора, но переходный процесс в приводе при этом увеличивается до 0,12 с (рис. 4.23). Удар при касании объектов  $F_4(\Delta s)$  сокращает переходные колебания до 0,06 с, но и в установившемся режиме наблюдаются колебания скорости в пределах 1...5 % (рис. 4.24). Оптимизация параметров привода достигается демпфированием упругости и повышением жёсткости силоизмерительной цепи.

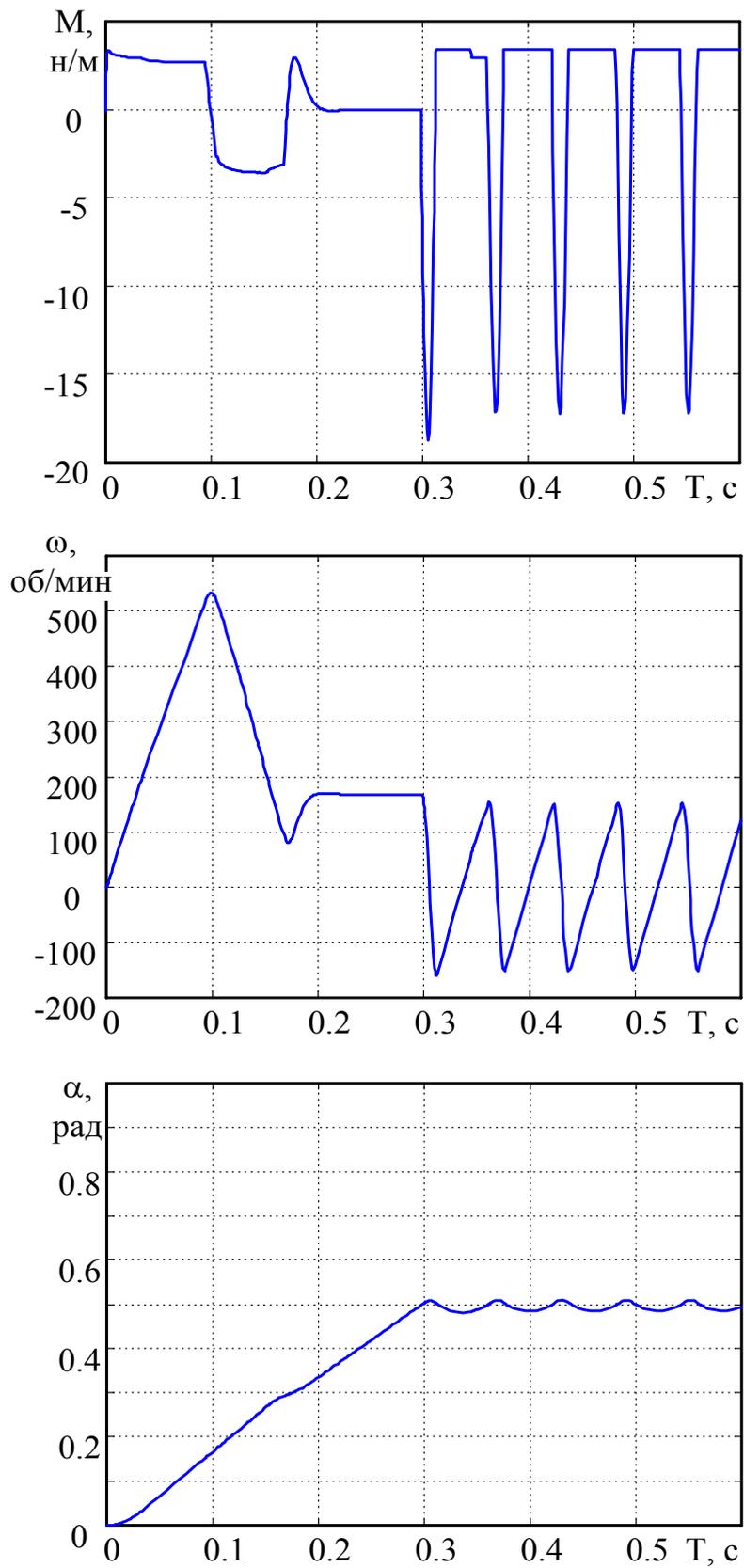


Рис. 4.21. Переходные характеристики привода с управлением по силе с упором  $F_1$  ( $\Delta s$ )

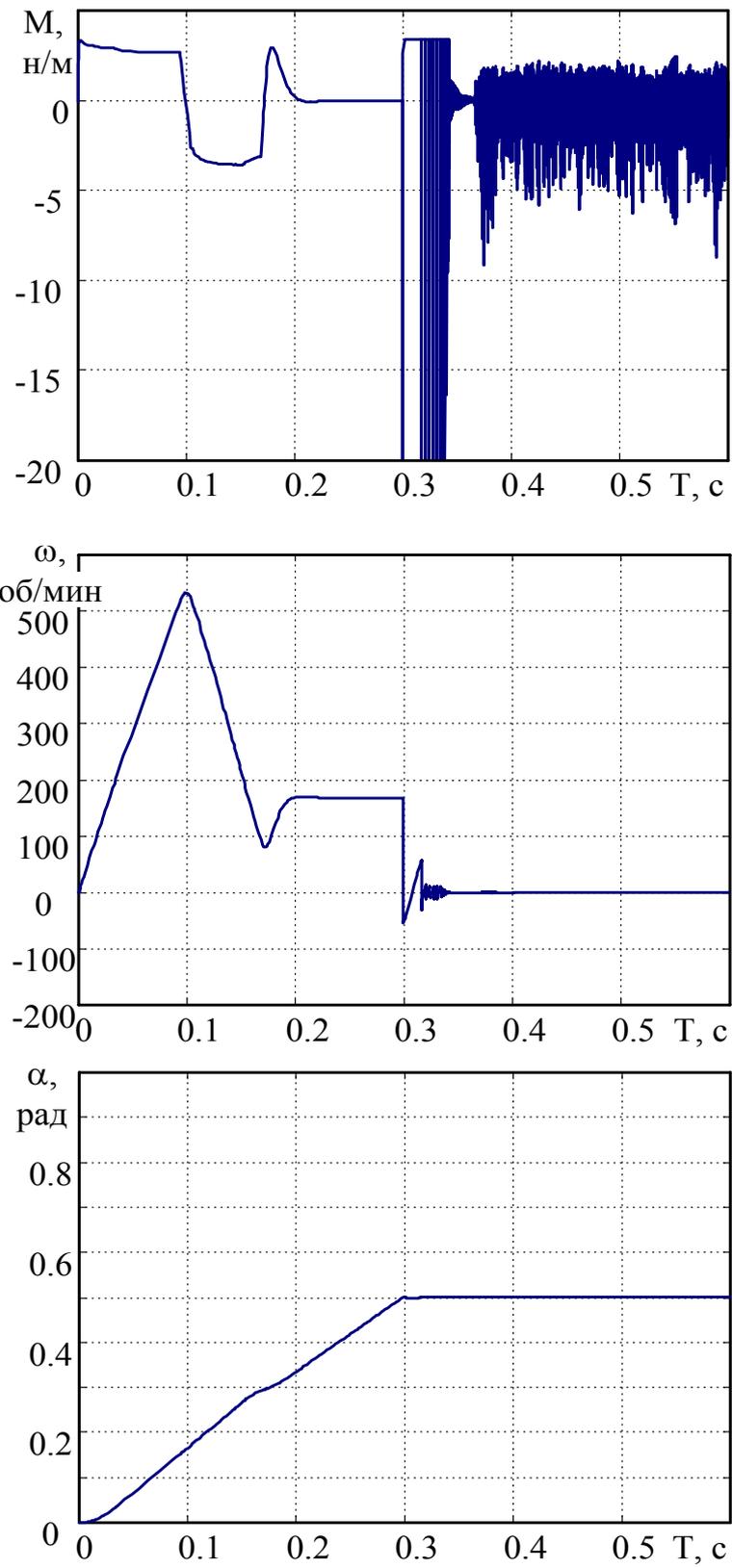


Рис. 4.22. Переходные характеристики привода с управлением по силе с упором  $F_2$  ( $\Delta s$ )

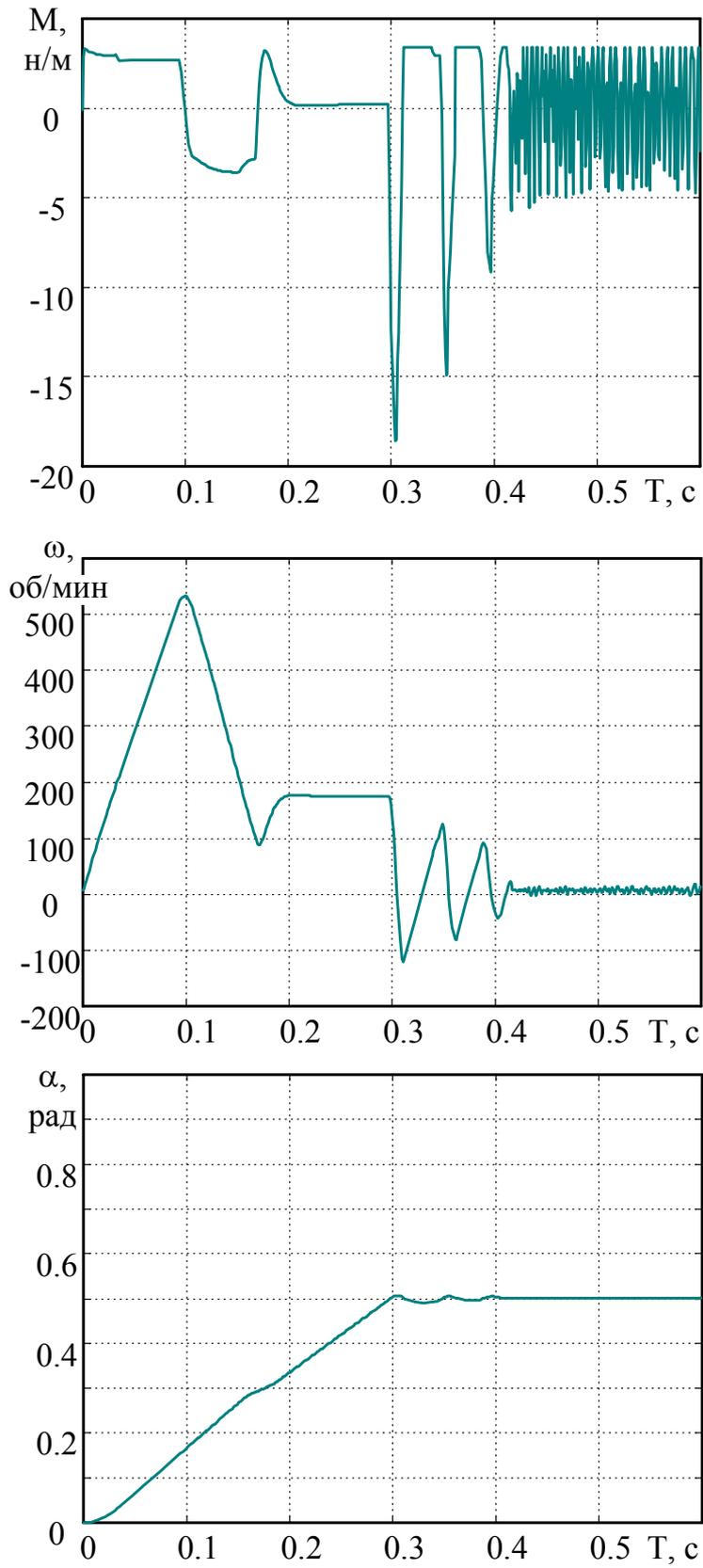


Рис. 4.23. Переходные характеристики привода с управлением по силе с упором  $F_3$  ( $\Delta s$ )

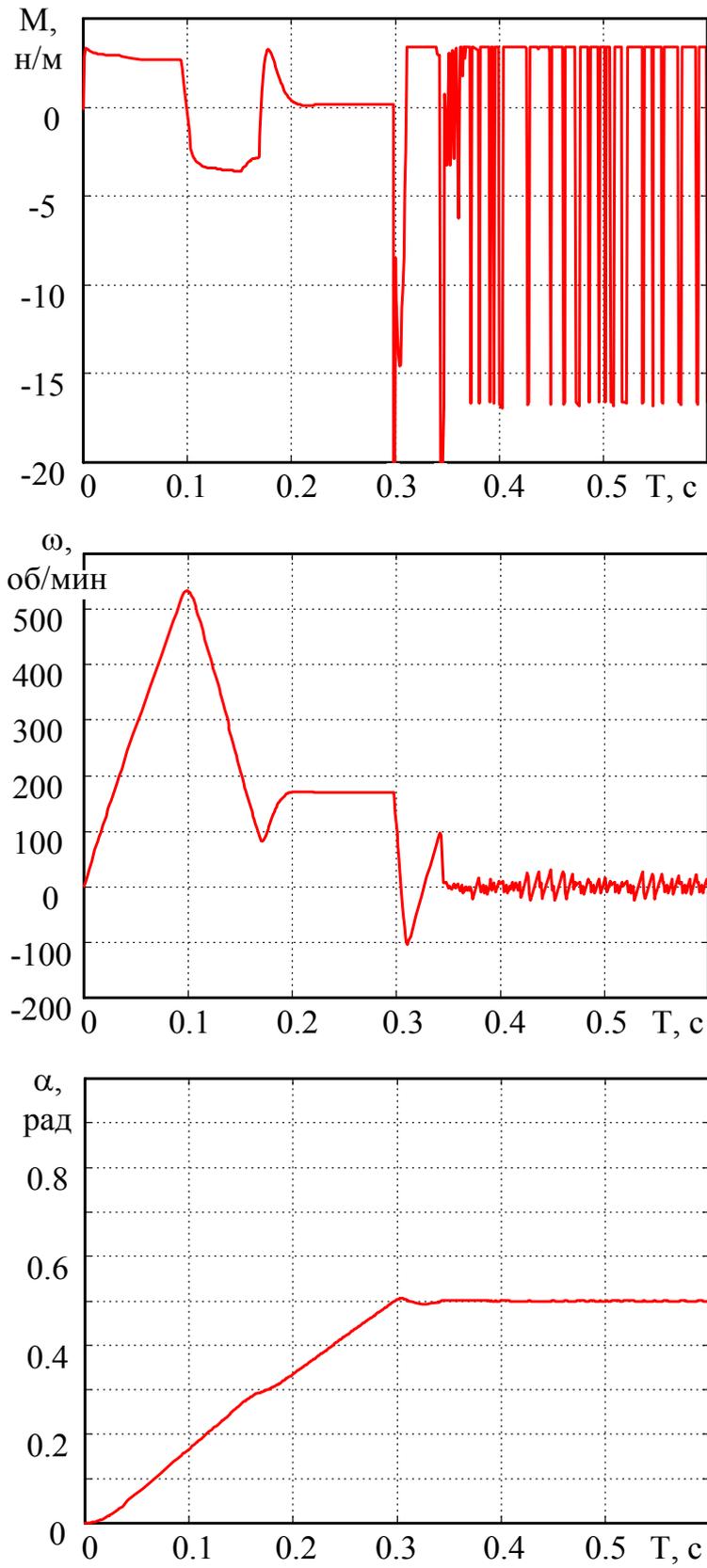


Рис. 4.24. Переходные характеристики привода с управлением по силе с упором  $F_4$  ( $\Delta s$ )

Таким образом, очевидно, что в условиях работы приводов универсального РТК с хрупким и субтильным ТВС необходимо обеспечить аperiodическое без перерегулирования протекание переходных процессов в приводах комплекса при управлении в позиционном режиме, а при переключении структур с позиционного управления на управление силой и обратно, а также и при чисто силовом управлении исключить появление колебательных процессов.

#### 4.4. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ И ПОДАТЛИВОСТИ

Для проведения анализа и синтеза структурной схемы моментного привода в качестве базового возьмем электропривод, рассмотренный в п. 4.3. Для организации моментно-позиционного управления применяются различные законы организации электропривода переменной структуры. В качестве примера можно предложить структурную схему, представленную на рис. 4.15.

Исследование привода в режиме отработки заданного момента (силы) выполняется при условии обеспечения постоянства контакта собираемых деталей, что исключает переключение структуры электропривода с моментного управления на управление по положению.

Структурная схема следящего электропривода (см. рис. 4.17) описывается уравнениями (4.36, 4.37). В уравнениях введем обозначения: коэффициент усиления регулятора положения  $K_{РП} = K_1 F_1$ , где  $F_1$  – нелинейность  $Y_{15}$ ;  $K_{РС} = K_2 F_2$  – регулятор положения;  $K_{РТ} = K_3 F_3$  – регулятор тока;  $K_{ДВ} = F_4/Z_{\Phi}$ ;  $K_V = F_5$ . В матричной форме система уравнений записывается в виде:

$$\overline{\dot{X}} = A_1 \overline{X}, \quad (4.42)$$

где  $A_1$  – матрица коэффициентов размером  $5 \times 5$ :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_{\Gamma\Gamma}k_{PC} & -k_{ДП}k_{РП}k_{PC} \\ k_{РТ} & 0 & -k_{Д\Gamma}k_{РТ} & a_{24} & a_{25} \\ k_{РТ}k_{ДВ}T_3 & k_{ДВ} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & c_M k_V / J_{Д} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/i & 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{24} = -k_{\Gamma\Gamma}k_{PC}k_{РТ}T_2; \quad a_{25} = -k_{ДП}k_{РП}k_{PC}k_{РТ}T_2;$$

$$a_{33} = -(k_{\text{ДТ}}k_{\text{РТ}}k_{\text{ДВ}}T_3 + 1)/T_{\Phi};$$

$$a_{34} = -(c_e k_{\text{ДВ}} + k_{\text{ТГ}}k_{\text{ДВ}}k_{\text{РС}}k_{\text{РТ}}T_2T_3);$$

$$a_{35} = -k_{\text{ДП}}k_{\text{РП}}k_{\text{РС}}k_{\text{РТ}}k_{\text{ДВ}}T_2T_3.$$

Как говорилось выше, для отработки заданного момента (силы) сборочная система должна быть оснащена силомоментным датчиком, который может быть расположен либо на сборочном столе, либо находиться в запыстье сборочного робота. Используются различные компоновки датчиков.

1. Датчики сил  $F_x$  и  $F_z$  для поступательных перемещений расположены на сборочном столе. Структурная схема исполнительской части привода представлена на рис. 4.25.

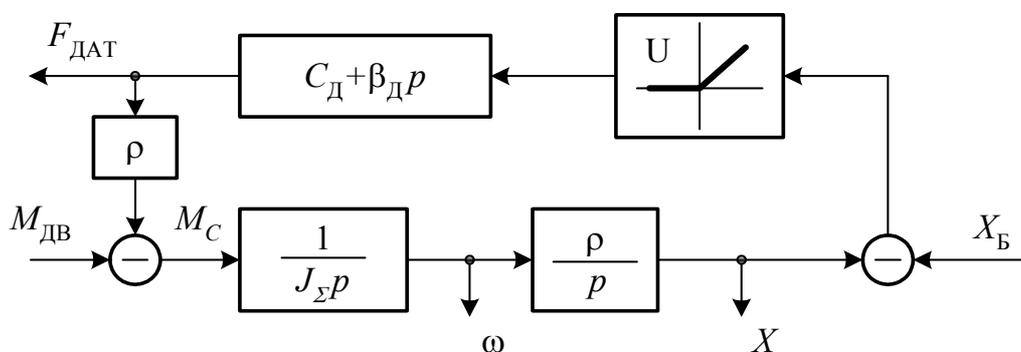


Рис. 4.25. Структурная схема с датчиком силы

На рисунке обозначено:  $J_{\Sigma}$  – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции,  $J_{\Sigma} = J_{\text{ДВ}} + J_{\text{Ш}} + M_{\Sigma}\rho^2$ , где  $M_{\Sigma}$  – масса схвата с деталью,  $\rho$  – радиус приведения.

2. Датчик момента  $M_0$  для вращательного движения расположен на сборочном столе. Структурная схема исполнительской части привода представлена на рис. 4.26.

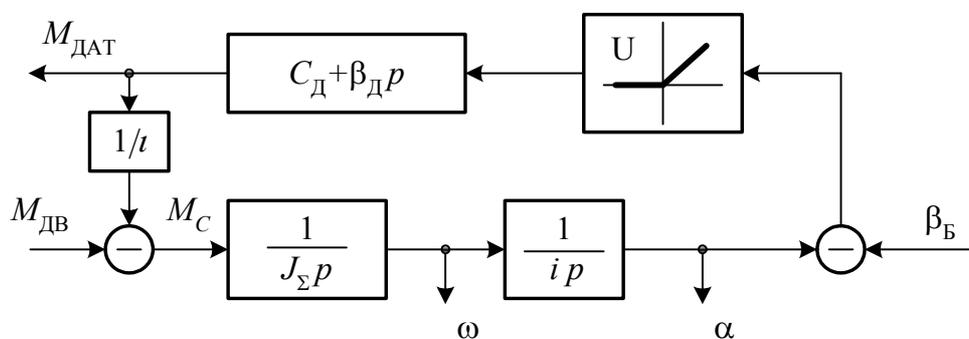


Рис. 4.26. Структурная схема с датчиком момента

3. Датчик момента  $M_0$  для вращательного движения расположен в запястье робота. Структурная схема исполнительный части привода представлена на рис. 4.27. На рисунке обозначено:  $J_{\Sigma 1}$  – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции датчика,  $J_{\Sigma 2}$  – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции схвата с деталью.

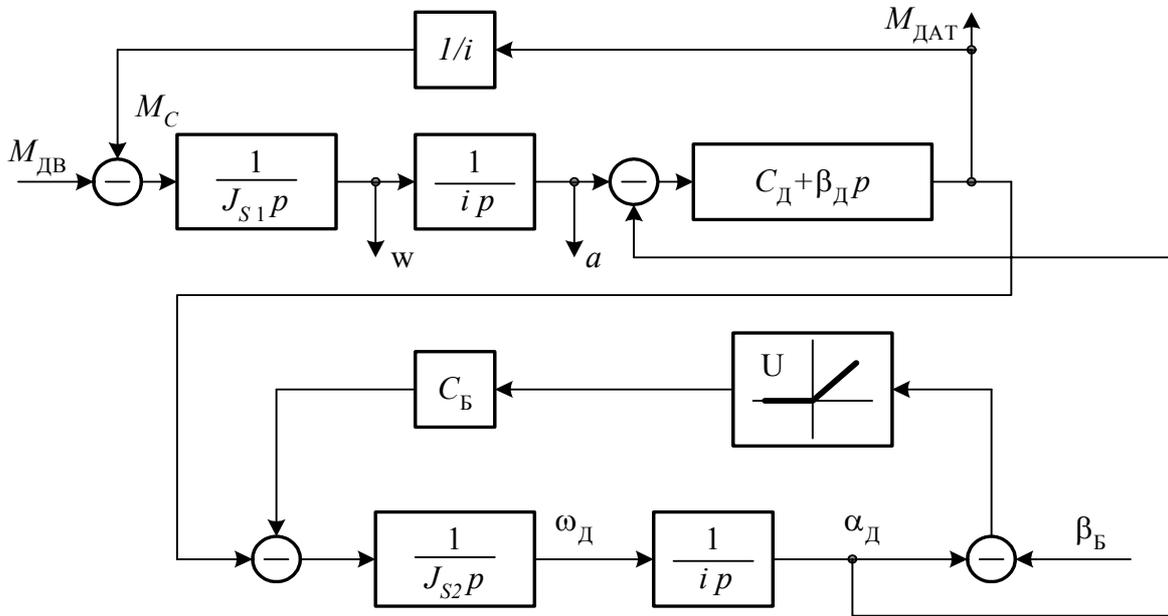


Рис. 4.27. Структурная схема с датчиком момента в запястье робота

Полная структурная схема моментного привода с измерительным датчиком силы представлена на рис. 4.28.

В матричной форме система уравнений, описывающих привод с управлением по силе, записывается в виде:

$$\dot{\bar{X}} = A_2 \bar{X}, \quad (4.43)$$

где  $A_2$  – матрица коэффициентов размером  $5 \times 5$ :

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_{\Gamma\Gamma}k_{PC} & -k_{DM}k_{RP}k_{PC}c_D \\ k_{PT} & 0 & -k_{DT}k_{PT} & a_{24} & a_{25} \\ k_{PT}k_{DV}T_3 & k_{DV} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & c_M k_V / J_D & 0 & -c_D k_V \rho / J_D \\ 0 & 0 & 0 & \rho & 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{24} = -k_{\Gamma\Gamma}k_{PC}k_{PT}T_2; \quad a_{25} = -c_D k_{DM}k_{RP}k_{PC}k_{PT}T_2;$$

$$a_{33} = -(k_{DT}k_{PT}k_{DV}T_3 + 1) / T_\Phi;$$

$$a_{34} = -(c_e k_{DV} + k_{\Gamma\Gamma}k_{DV}k_{PC}k_{PT}T_2T_3);$$

$$a_{35} = -c_D k_{DM}k_{RP}k_{PC}k_{PT}k_{DV}T_2T_3; \quad c_D - \text{жесткость датчика.}$$

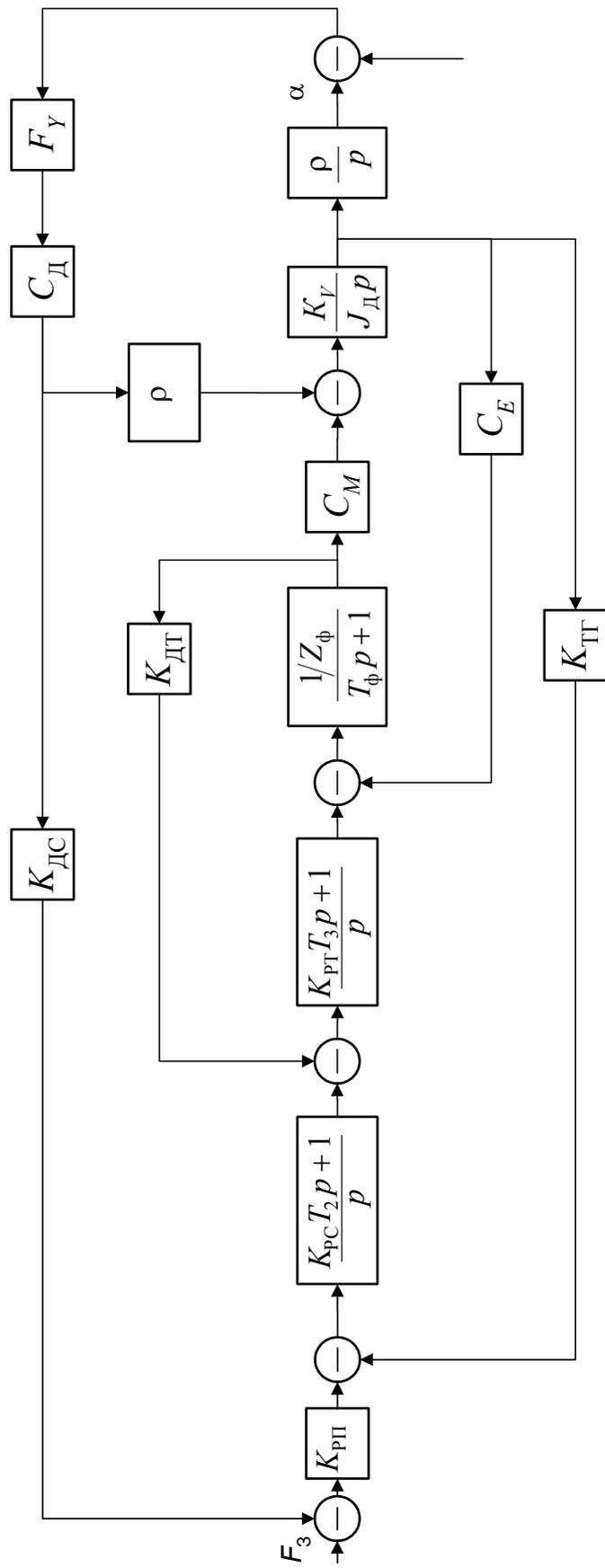


Рис. 4.28. Структурная схема привода с управлением по силе в контуре регулятора положения

Для моделирования приняты следующие значения коэффициентов:  
 $k_1 = 1,0$ ;  $k_2 = 700$ ;  $k_3 = 5500$ ;  $k_{ДТ} = 10 \text{ В}/25\text{А} = 0,4$ ;  $k_{ГТ} = 0,0477$ ;  $k_{ДС} = 0,01$ ;  
 $T_2 = 0,01$ ;  $T_3 = 0,01$ ;  $T_{\Phi} = 0,0088$ ;  $Z_{\Phi} = 1,0 \text{ (Ом)}$ ;  $c_M = 1,4$ ;  $c_e = 1,4$ ;  
 $J_D = 0,0051$ ;  $\rho = 0,001$ ;  $c_D = 500000$ ;  $k_V = 1,0$ .

В результате цифрового моделирования получены графики переходного процесса, представленные на рис. 4.29.

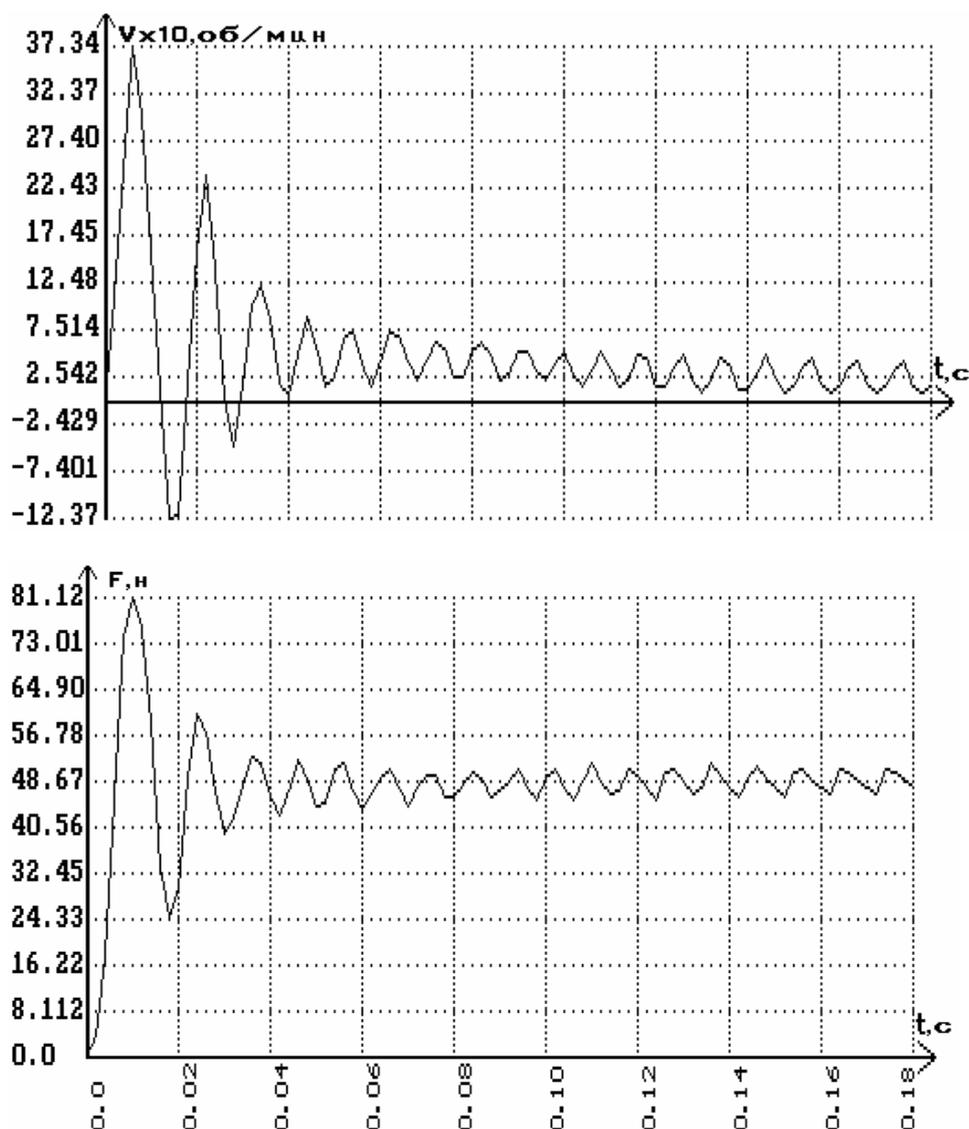


Рис. 4.29. Графики переходного процесса силового привода

На графиках видно, что переходный процесс при отработке заданной силы имеет явно выраженный колебательный затянувшийся характер. Амплитуда колебаний достигает 20 %. Колебания имеют случайные период и

амплитуду. Следовательно, о качественном управлении при такой структуре электропривода говорить нельзя.

Выполним цифровое моделирование привода с датчиком момента, расположенным в запястье робота (см. рис. 4.27).

В матричной форме система уравнений, описывающих моментный привод, записывается в виде

$$\dot{\bar{X}} = A_3 \bar{X}, \quad (4.44)$$

где  $A_3$  – матрица коэффициентов размером  $7 \times 7$ :

$$A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_{\Gamma T} k_{PC} & a_{15} & 0 & a_{17} \\ k_{PT} & 0 & -k_{DT} k_{PT} & a_{24} & a_{25} & 0 & a_{27} \\ k_{PT} k_{DV} T_3 & k_{DV} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & a_{37} \\ 0 & 0 & c_M k_V / J_{\Sigma 1} & 0 & a_{45} & 0 & a_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 1/i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_D / J_{\Sigma 2} & 0 & c_6 / J_{\Sigma 2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{15} = -k_{DM} k_{RP} k_{PC} c_D; \quad a_{17} = k_{DM} k_{RP} k_{PC} c_D;$$

$$a_{24} = -k_{\Gamma T} k_{PC} k_{PT} T_2; \quad a_{25} = -c_D k_{DM} k_{RP} k_{PC} k_{PT} T_2; \quad a_{27} = -c_D k_{DM} k_{RP} k_{PC} k_{PT} T_2;$$

$$a_{33} = -(k_{DT} k_{PT} k_{DV} T_3 + 1) / T_\phi; \quad a_{34} = -(c_e k_{DV} + k_{\Gamma T} k_{DV} k_{PC} k_{PT} T_2 T_3);$$

$$a_{35} = -c_D k_{DM} k_{RP} k_{PC} k_{PT} k_{DV} T_2 T_3; \quad a_{37} = c_D k_{DM} k_{RP} k_{PC} k_{PT} k_{DV} T_2 T_3;$$

$$a_{45} = -c_D k_V / (i J_{\Sigma 1}); \quad a_{47} = c_D k_V / (i J_{\Sigma 1});$$

$c_6$  – жесткость базовой детали.

В результате цифрового моделирования получены графики переходного процесса при силовом взаимодействии, представленные на рис. 4.30.

Вследствие влияния упругого элемента (датчика) переходный процесс также является колебательным и процесс стал более затянувшимся. Время переходного процесса превышает 0,2 с. На первом графике показана скорость движения запястья робота, в котором установлен датчик момента.

На рис. 4.31 показано движение схвата с деталью. Как видно из рисунка, на движение наложены колебания малой амплитуды (0,4 рад/с), обусловленные наличием упругости в прямом тракте.

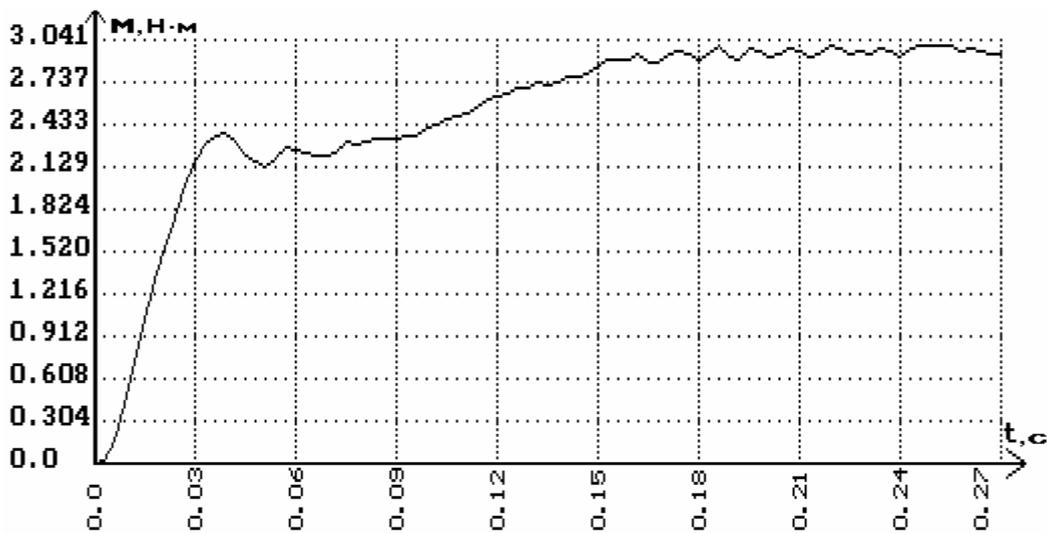
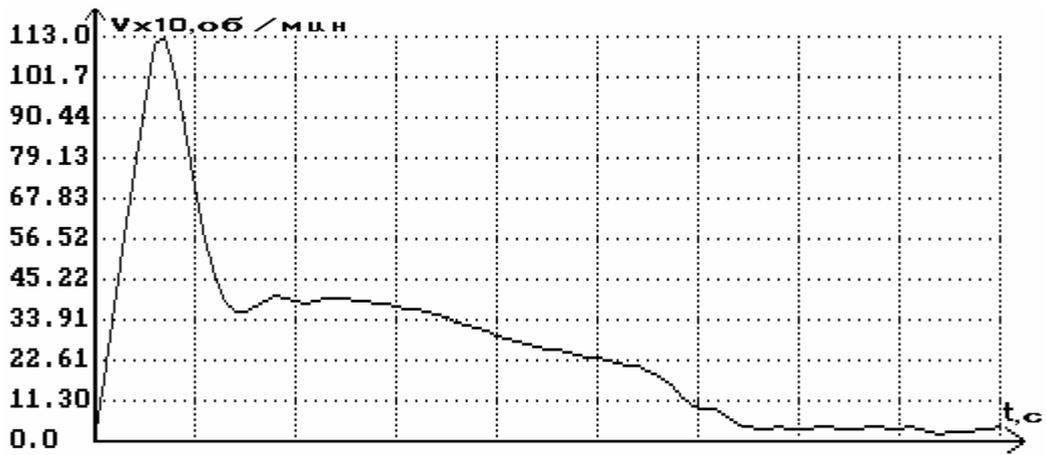


Рис. 4.30. Графики переходного процесса моментного привода с датчиком, расположенным в запястье робота

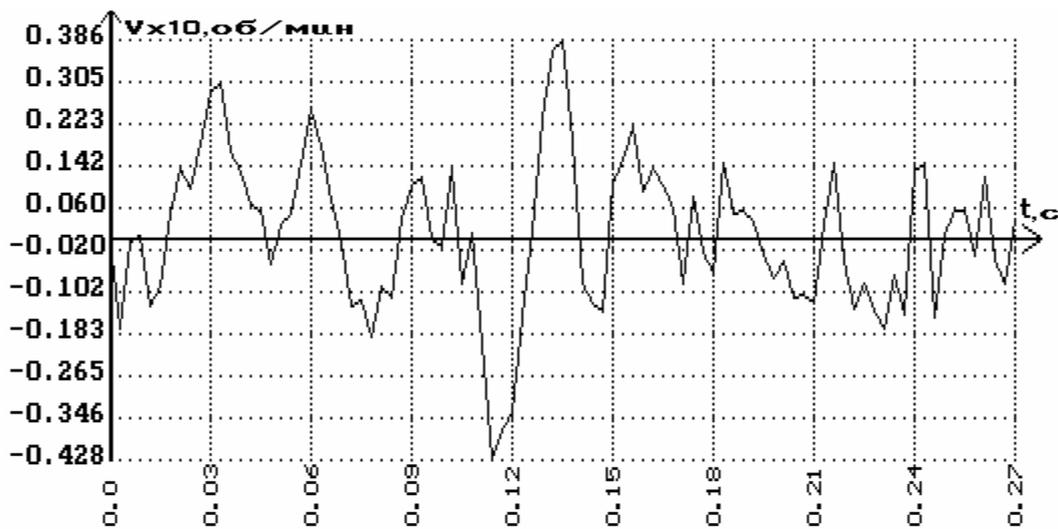


Рис. 4.31. График движения схвата с деталью

Для устранения этих колебаний необходимо осуществлять демпфирование упругости и повышать жесткость датчика. Однако чрезмерное повышение жесткости приведет к снижению чувствительности датчика.

Для режима обработки заданного момента (силы) обратную связь по моменту предлагается вводить в контур регулятора тока. При этом отключаются регуляторы положения и скорости. Структурная схема привода представлена на рис. 4.32.

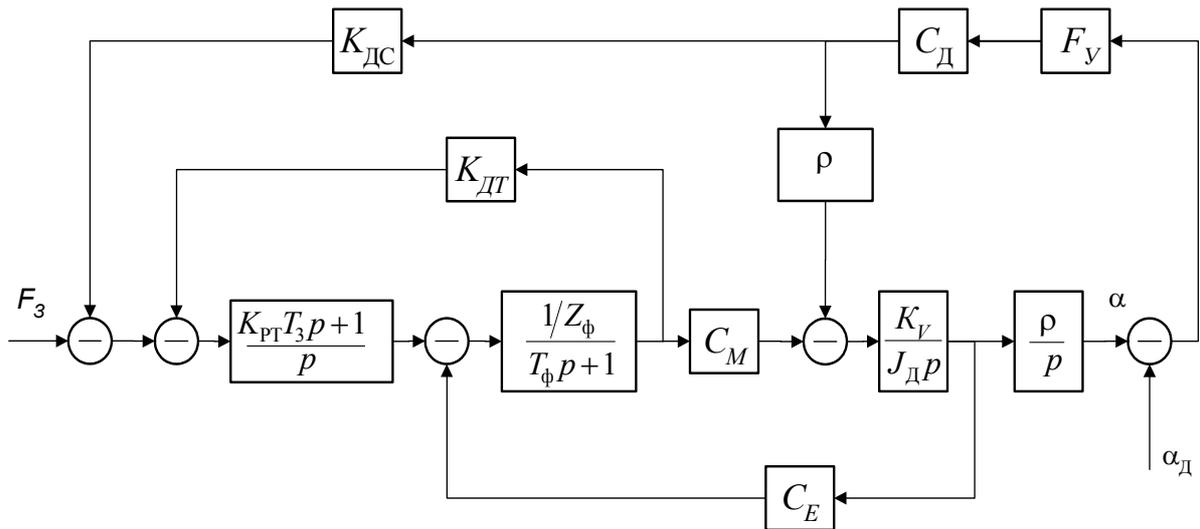


Рис. 4.32. Структурная схема привода с управлением по силе в контуре регулятора тока

В зоне контакта собираемых деталей электропривод описывается системой уравнений в нормальной форме Коши в матричном виде:

$$\dot{\bar{X}} = A_4 \bar{X}, \quad (4.45)$$

где  $A_4$  – матрица коэффициентов размером  $4 \times 4$ :

$$A_2 = \begin{vmatrix} 0 & -k_{дТ} k_{рТ} & 0 & -c_{д} k_{дМ} k_{рТ} \\ k_{дВ} & a_{22} & -c_e k_{дВ} & a_{24} \\ 0 & c_M k_V / J_{д} & 0 & -c_{д} k_V / (i J_{д}) \\ 0 & 0 & 1/i & 0 \end{vmatrix}$$

$$a_{22} = -(k_{дТ} k_{рТ} k_{дВ} T_3 + 1) / T_{\phi}; \quad a_{24} = -c_{д} k_{дМ} k_{рТ} k_{дВ} T_3.$$

В результате цифрового моделирования получены графики переходного процесса при силовом взаимодействии, представленные на рис. 4.33.

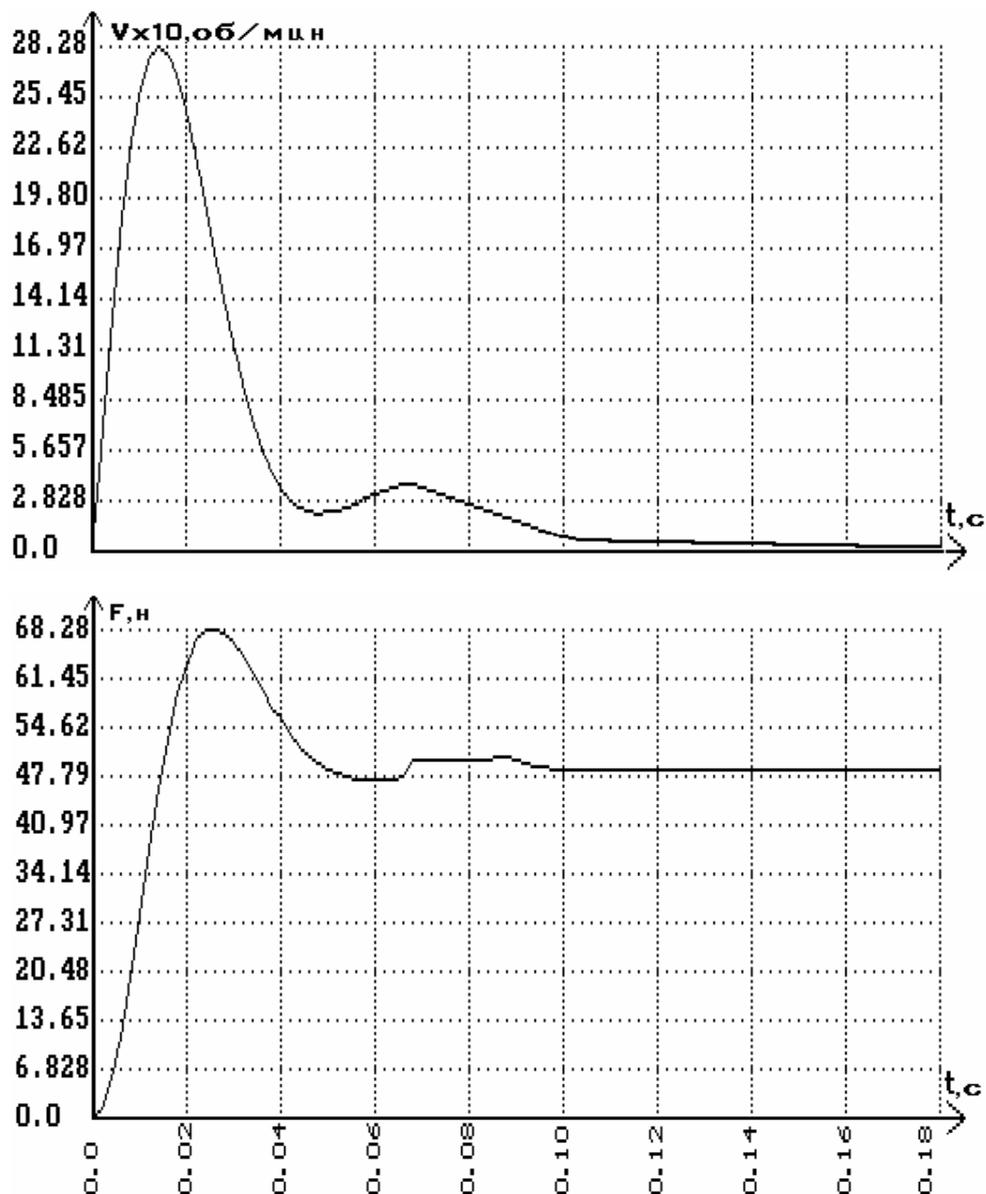


Рис. 4.33. Графики переходного процесса силового привода

Быстродействие системы при достижении величины ошибки  $< 1\%$  составляет  $t = 0,1$  с. В данном случае  $F_{зад} = 50$  Н. Электропривод с таким управлением по силе является быстродействующим и переходный процесс – колебательный с затуханием, близким к единице.

Выброс силы в момент контакта свидетельствует об ударе в момент контакта. Здесь необходимо обеспечить подход к точке контакта с минимальной скоростью. В случае, если процесс сопровождается неоднократ-

ным отскоком, обусловленным взаимодействием масс и упругими деформациями, необходимо применить устройства отсечки этих колебаний.

Структура электропривода с датчиком момента, расположенным в запястье робота (см. рис. 4.27) описывается системой уравнений в нормальной форме Коши в матричном виде

$$\dot{\bar{X}} = A_5 \bar{X} \quad (4.46)$$

где  $A_5$  – матрица коэффициентов размером  $6 \times 6$ :

$$A_5 = \begin{pmatrix} 0 & -k_{\text{ДТ}}k_{\text{РТ}} & 0 & a_{14} & 0 & a_{16} \\ k_{\text{ДВ}} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & a_{26} \\ 0 & c_M k_V / J_{\Sigma 1} & 0 & -c_D k_V / (i / J_{\Sigma 1}) & 0 & c_D k_V / (i / J_{\Sigma 1}) \\ 0 & 0 & 1/i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_D / J_{\Sigma 2} & 0 & c_6 / J_{\Sigma 2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$a_{14} = -c_D k_{\text{ДМ}} k_{\text{РТ}}; \quad a_{16} = c_D k_{\text{ДМ}} k_{\text{РТ}};$$

$$a_{22} = -(k_{\text{ДТ}} k_{\text{РТ}} k_{\text{ДВ}} T_3 + 1) / T_\phi;$$

$$a_{23} = -c_e k_{\text{ДВ}}; \quad a_{24} = -c_D k_{\text{ДМ}} k_{\text{РТ}} k_{\text{ДВ}} T_3;$$

$$a_{26} = c_D k_{\text{ДМ}} k_{\text{РТ}} k_{\text{ДВ}} T_3.$$

В результате цифрового моделирования получены графики переходного процесса при силовом взаимодействии, представленные на рис. 4.34. Переходный процесс носит ярко выраженный колебательный характер, величина перерегулирования достигает 65 %, однако время переходного процесса уменьшилось до 0,15 с. Следовательно, задание управления по моменту на вход регулятора тока позволяет повысить быстродействие электропривода, а при отсутствии упругого элемента (датчика момента) в прямом тракте значительно улучшается качество регулирования.

Таким образом, электропривод с переменной структурой описывается следующими уравнениями (4.42, 4.45, 4.46) :

$$\dot{\bar{X}} = A_1 \bar{X} \quad \text{– следящий привод при движении в свободной зоне};$$

$\dot{\bar{X}} = A_4 \bar{X}$  – моментный привод при силовом взаимодействии и датчиком момента (силы), расположенном на сборочном столе;

$\dot{\bar{X}} = A_5 \bar{X}$  – моментный привод при силовом взаимодействии и датчиком момента, расположенном в запястье робота.

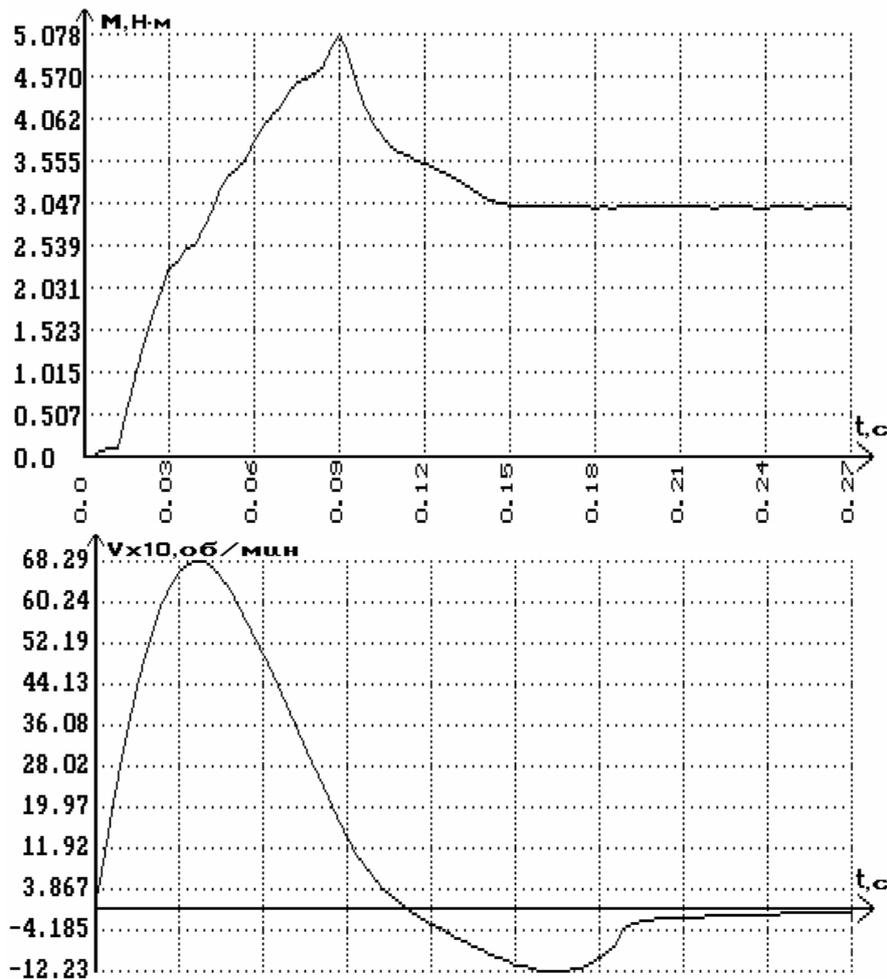


Рис. 4.34. Графики переходного процесса силового привода с датчиком момента, расположенным в запястье робота

## 4.5. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

При выполнении операций с субтильными объектами приводы робота работают в общем случае в режиме позиционно-силового управления с переключением структуры. Основная проблема создания подобных систем координирующего согласованного управления заключается в структурном синтезе системы. В качестве базовой выберем структуру, реализованную для управления вентильным ЭП (см. рис. 4.15).

Функциональная схема двухканальной системы связного регулирования с ПСУ, соответствующая заданным условиям работы, приведена на рис. 4.35, где дополнительно обозначены:  $F_{SPi}(\delta S)$ ,  $F_{PSi}(P)$  – блоки взаимосвязи каналов регулирования положения и силы при согласованном управлении;  $\Phi_{Si}(S_0, P)$ ,  $\Phi_{Pi}(P, \delta S)$  – функциональные регуляторы каналов управления.

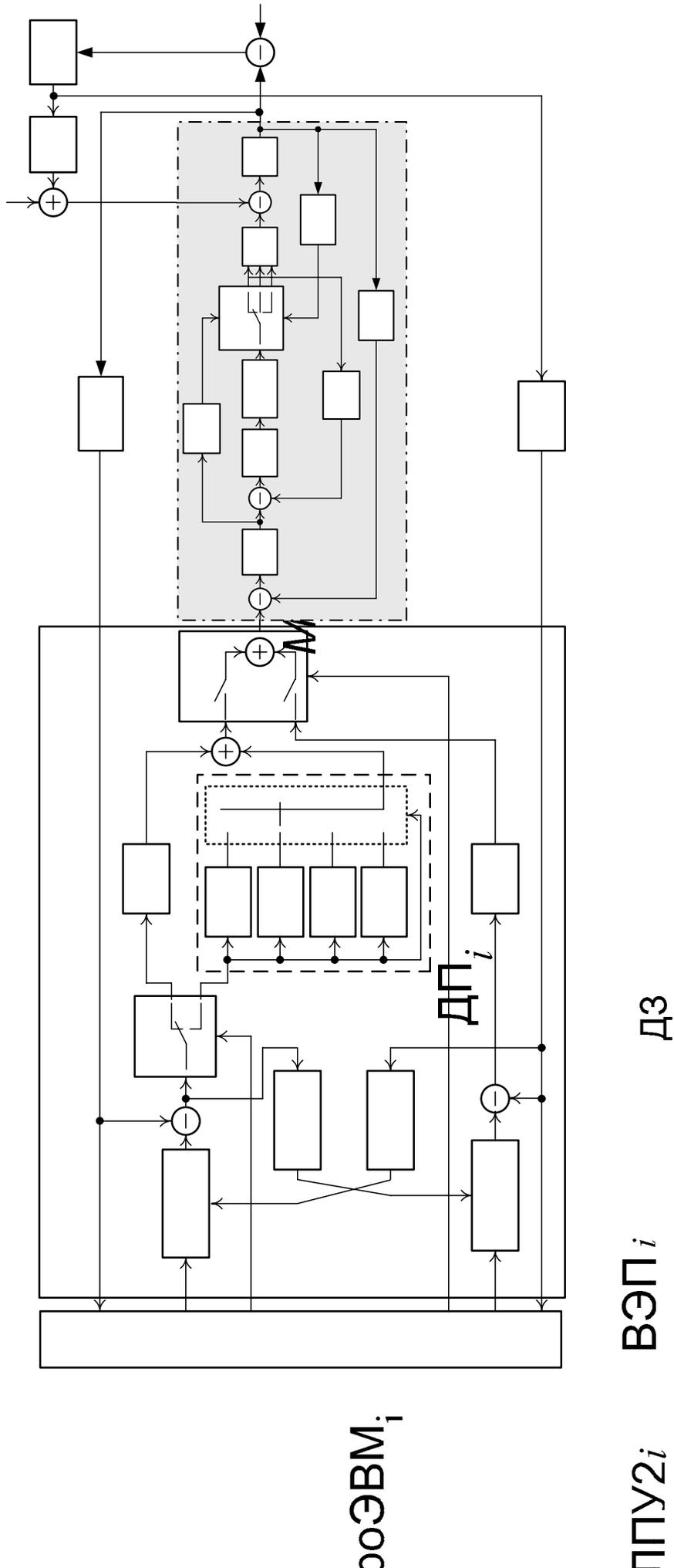


Рис. 4.35. Обобщенная функциональная схема двухканальной системы позиционно-силового управления для РТК подачи ТВС

Структурная схема системы, соответствующая функциональной, представлена на рис. 4.36. Здесь обозначены:  $W_{ВЭП}(p)$  – передаточная функция эквивалентной линейной модели вентильного электропривода;  $W_{РС}(p)$  – передаточная функция регулятора силы; в режимах переключения структуры привода позиционные перемещения малы, поэтому контур положения привода будем рассматривать только с линейным регулятором  $W_{ЛРП}(p) = K_{РП}$ ;  $W_{\phi_s}(p)$ ,  $W_{\phi_p}(p)$ ,  $W_{F_{sp}}(p)$ ,  $W_{F_{ps}}(p)$  – передаточные функции соответствующих регуляторов, выбираемые системой управления многофункциональным РТК из определённого набора при реализации заданного алгоритма управления.

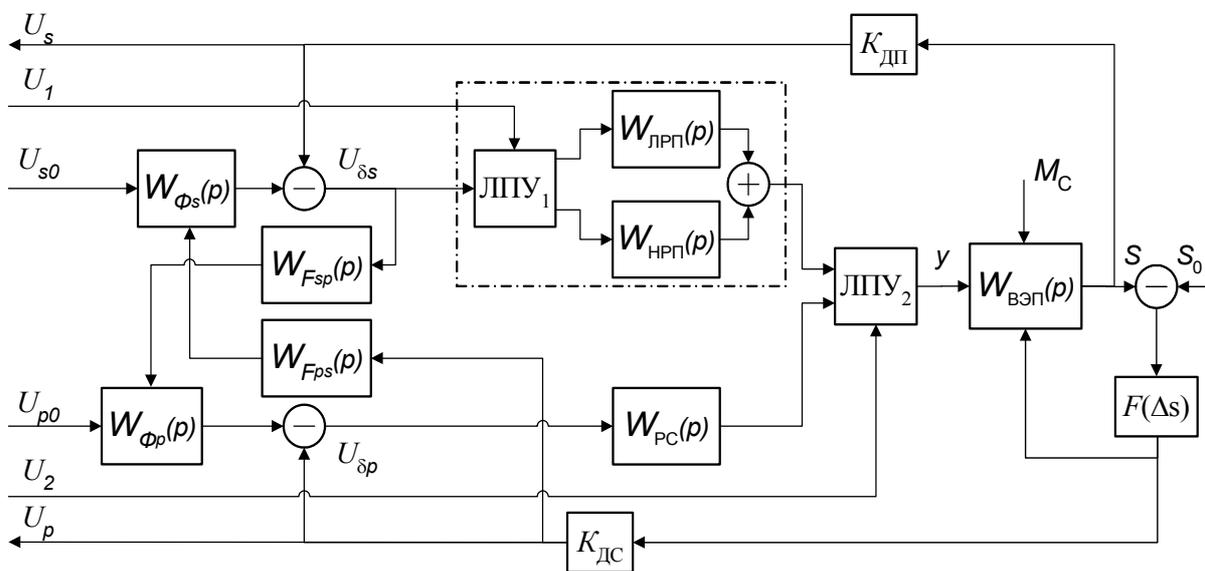


Рис. 4.36. Структурная схема двухканальной системы управления

При условии отсутствия взаимосвязи через функциональные регуляторы и ЛПУ1 исходную структурную схему (см. рис. 4.36) можно представить в виде рис. 4.37, где через ЛЧ и ЭНЧ выделены линейная и эквивалентная нелинейная части привода. Линейная часть образована тремя полиномами  $A(p)$ ,  $B(p)$  и  $C(p)$ , а эквивалентная нелинейная часть содержит два нелинейных элемента НЭ1 – нелинейность типа «односторонняя реакция упругого звена» и НЭ2 – логическое переключающее устройство (ЛПУ2), соединённые между собой линейными звеньями [69]. НЭ1 является реализацией характеристики упора  $F(\Delta s)$ , а НЭ2 переключает управление с позиционного на управление силой по комбинации сигналов  $U_{\delta s}$  и  $U_p$ :

$$y = \begin{cases} U_{\delta S}(t) & \forall U_P = 0 \wedge U_{\delta S} \geq 0 \vee U_P \geq 0 \wedge U_{\delta S} < 0; \\ U_{\delta P}(t) & \forall U_P > 0 \wedge U_{\delta S} > 0. \end{cases} \quad (4.47)$$

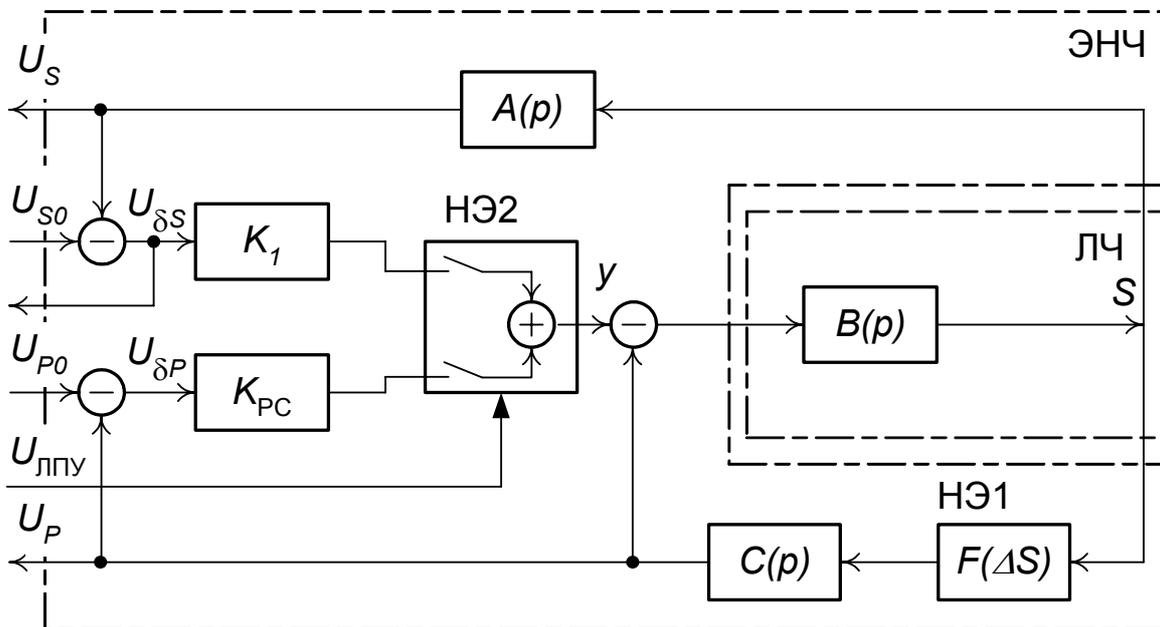


Рис. 4.37. Преобразованная структурная схема двухканальной системы

Работу блока переключения структуры можно условно разделить на два режима: первый – переключение с позиционного управления на управление силой по сигналу  $U_P$ , второй – переключение структуры с управления силой на позиционное управление по сигналу  $U_{\delta S}$ , определяющему ошибку по положению.

Оба режима можно рассматривать при наличии и отсутствии контакта РО с ОР. Работу блока в этих режимах можно описать следующим выражением:

$$y = \begin{cases} U_{\delta S}(t) & \forall U_P = 0 \wedge U_{\delta S} \geq 0; \\ U_{\delta P}(t) & \forall U_P \geq 0 \wedge U_{\delta S} \leq 0; \\ U_{\delta P}(t) & \forall U_P > 0 \wedge U_{\delta S} > 0. \end{cases} \quad (4.48)$$

Определим характеристики элементов ЛПУ на границе свободной зоны при условии  $U_{S0} = 0$  и  $U_{P0} = 0$ :

– переключение структуры с позиционного управления на управление силой:

$$y_{\text{П-М}} = \begin{cases} 0 & \forall U_P = 0 \wedge U_{\delta S} \geq 0; \\ K_{\text{PC}} U_{\delta P}(t) & \forall U_P > 0 \wedge U_{\delta S} > 0, \end{cases} \quad (4.49)$$

– переключение структуры с управления силой на позиционное управление:

$$y_{M-II} = \begin{cases} 0 \quad \forall U_P > 0 \wedge U_{\delta S} > 0; \\ K_{PII} U_{\delta S}(t) \quad \forall U_P = 0 \wedge U_{\delta S} \geq 0. \end{cases} \quad (4.50)$$

Исследование автономного привода в режимах переключения структур приближённым методом на основе гармонической и интегральной линеаризации рассматривается в работе [69], где показано, что нелинейное звено типа ЛПУ2 изменяет область устойчивости исходных позиционных и силовых приводов: коэффициент усиления в приводе, замкнутом по положению, уменьшается, а в приводе, замкнутом по силе – увеличивается. Таким образом, исключение автоколебательных режимов обеспечивается выбором коэффициентов усиления регуляторов положения  $K_{PII}$  и силы  $K_{PC}$  меньше некоторого граничного значения.

Для успешного применения систем с переключением структуры, 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  $F_{SP}(\delta S)$ ,  $F_{PS}(P)$ ,  $\Phi_S(S_0, P)$ ,  $\Phi_P(P, \delta S)$  в виде

$$\begin{cases} F_{SP}(\delta S) = \text{sgn}(K_{SP}\delta S); \\ F_{PS}(P) = 0; \\ \Phi_S(S_0, P) = 1; \\ \Phi_P(P, \delta S) = P_0 F_{SP}(\delta S), \end{cases} \quad (4.51)$$

где  $K_{SP}$  – 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. 4.38. В структуре системы в блок взаимосвязи каналов  $F_{SP}(\delta S)$  входят усилитель-ограничитель УО и модуль выделения знака  $SGN$ , а функциональный регулятор канала силы  $\Phi_P(P, \delta S)$  – блок умножения  $BV$ . В качестве сигналов задания используется сигнал  $S_0$  требуемого перемещения и сигнал  $P_0$ , определяющий требуемую силу. Знак сигнала задания  $P_0$ , подаваемого на привод, совпадает со знаком ошибки привода по положению, что определяет однонаправленность прикладываемой силы и направления перемещения. При работе привода во время контакта работа с объ-

ектом 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 схвата робота с объектом, что может вызвать соударение, нарушение ориентации и поломку робота и самого объекта.

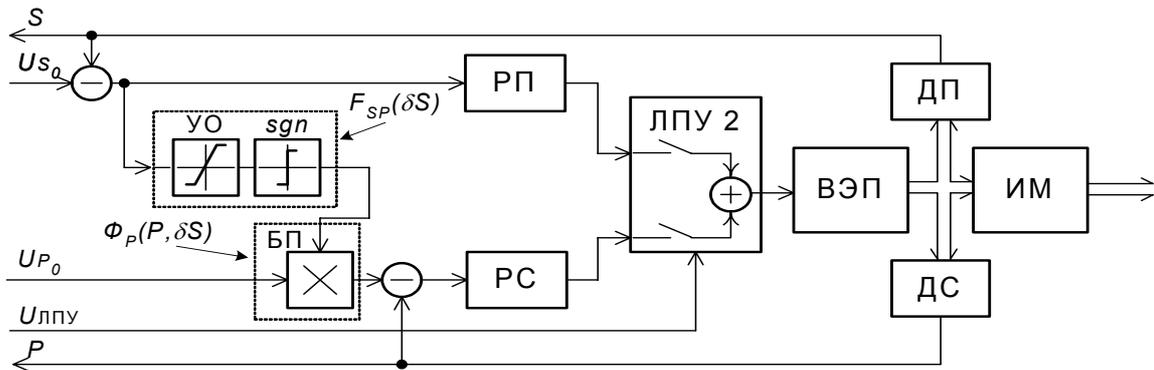


Рис. 4.38. Двухканальная система связанного позиционно-силового регулирования с мультипликативной перекрёстной связью

Характер изменения координат приведён на рис. 4.39. При линейном изменении сигнала задания по положению  $S_0$  (прямая 1) и постоянной величине сигнала задания по силе  $P_0$  (кривая 2) траектория движения схвата робота в свободной зоне также будет иметь линейный вид (кривая 2, участок  $0 \dots t_1$ ).

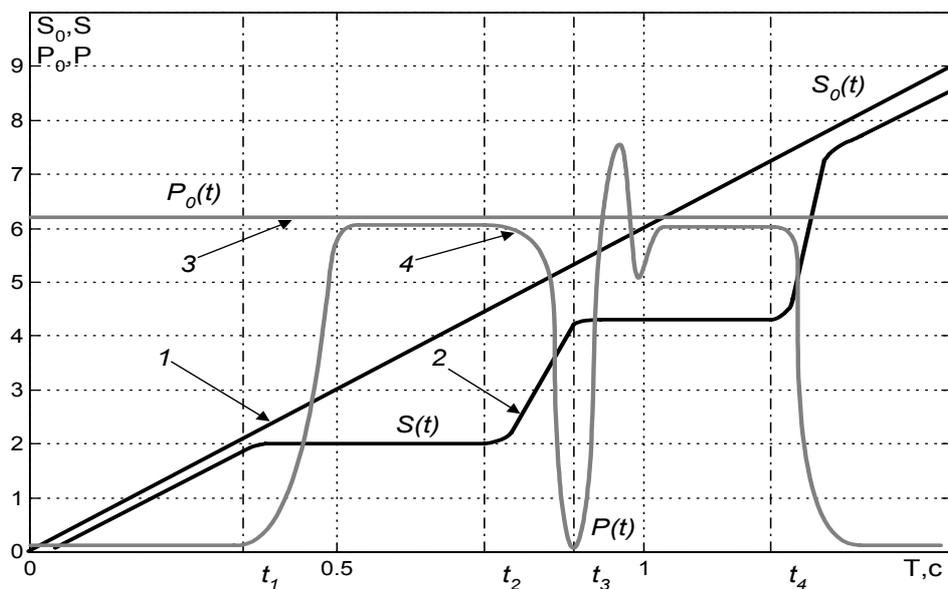


Рис. 4.39. Характер изменения координат в двухканальной системе с мультипликативной перекрёстной связью

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 схвата робота остаётся постоянным и равным координате точки контакта с препятствием. Сигнал задания по положению  $S_0$  тем не менее возрастает, увеличивается ошибка  $\delta S = (S_0 - S)$ . Одновременно с этим появляется сигнал с датчика силы ДС, привод управления по положению переключается через коммутатор ЛПУ2 на управление по силе (интервал  $t_1 \dots t_2$ ) и формируется силовое воздействие на объект  $P$  (кривая 4), соответствующее сигналу задания  $P_0$ . При этом сигнал позиционной ошибки  $\delta S$  не попадает на вход привода, так как ЛПУ2 переключён на управление по силе. Если приводы робота работают по одному из алгоритмов, рассмотренных в гл. 2, то перемещение схвата робота по координатам  $X$  и  $Y$  приведут к тому, что в момент времени  $t_2$  прекратится контакт робота с внешним объектом, сигнал с датчика силы ДС станет равным нулю и ЛПУ2 переключится на управление по положению для отработки накопившегося рассогласования  $\delta S$  (интервал времени  $t_2 \dots t_3$ ). Ошибка, накопленная в канале положения, вызывает перемещение с большим ускорением и скоростью (больше требуемых), может привести к удару ТВС о другую грань ячейки контейнера (выше допустимой силы), что запрещено.

Проблема повышения быстродействия двухканальной системы при контактном взаимодействии может быть решена применением логического функционального регулятора силы  $\Phi_P(P, \delta S)$  следующего вида:

$$\Phi_P(P, \delta S) = \begin{cases} K_{P1} \vee (K_{P2}P_0 - (P_0 - P)) > 0; \\ 1 \vee (K_{P2}P_0 - (P_0 - P)) \leq 0. \end{cases} \quad (4.52)$$

В этом случае структура системы примет вид, показанный на рис. 4.40, а переходные процессы в такой системе при переключении структур – на рис. 4.41.

Переход в режим отработки сигнала задания  $P_0$  происходит в момент времени  $t_1$ . Коэффициент усиления усилителя У1 выбирается равным  $(1 + \delta)^{-1}$ , где  $\delta$  – величина перерегулирования привода в режиме регулирования силы.

На интервале  $(t_1 \dots t_2)$  заданное значение силы соответствует  $P_{02} = P_{01} - mP_{02}$ , в момент времени  $t_2$  текущее значение силы  $P_{10} = P_0$ , и ЛПУ<sub>Р</sub> соединит датчик силы с сумматором на входе РС. На участке  $(t_2 \dots t_3)$  сила  $P = P_0$ , а  $S = 0$  (кривая 1). Если бы в момент времени  $t_2$  ЛПУ1 не переключился, то переходные процессы соответствовали бы кривой 2.



введения нелинейного функционального регулятора положения с логическим управлением  $\Phi_S(S_0, P)$ . В этом случае регуляторы  $F_{SP}(\delta S)$ ,  $F_{PS}(P)$ ,  $\Phi_S(S_0, P)$ ,  $\Phi_P(P, \delta S)$  примут вид

$$\begin{cases} F_{SP}(\delta S) = \text{sgn}(K_{SP}\delta S); \\ F_{PS}(P) = \text{sgn}(K_{PS}P); \\ \Phi_S(S_0, P) = \begin{cases} K_S \int_0^\tau (S_0 - S'_0) \cdot dt & \forall F_{PS}(P) = 0 \wedge S_0 < S'_0; \\ S'_0 & \forall F_{PS}(P) = 1 \wedge S_0 = S'_0; \end{cases} \\ \Phi_P(P, \delta S) = P_0 F_{SP}(\delta S), \end{cases} \quad (4.53)$$

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. 4.42. Привод работает следующим образом: при движении в свободной зоне сигнал с датчика силы ДС отсутствует, ЛПУ2 коммутирует систему в режим замыкания по положению, а сигнал ошибки рассогласования по положению через ЛПУ<sub>S</sub>, интегратор и сумматор приводит в движение исполнительный орган. При касании внешнего объекта сигнал с ДС переключает ЛПУ<sub>S</sub> и ЛПУ2, сигнал позиционного задания  $S_0$  фиксируется на уровне  $S'_0$ , соответствующем координате точки касания.

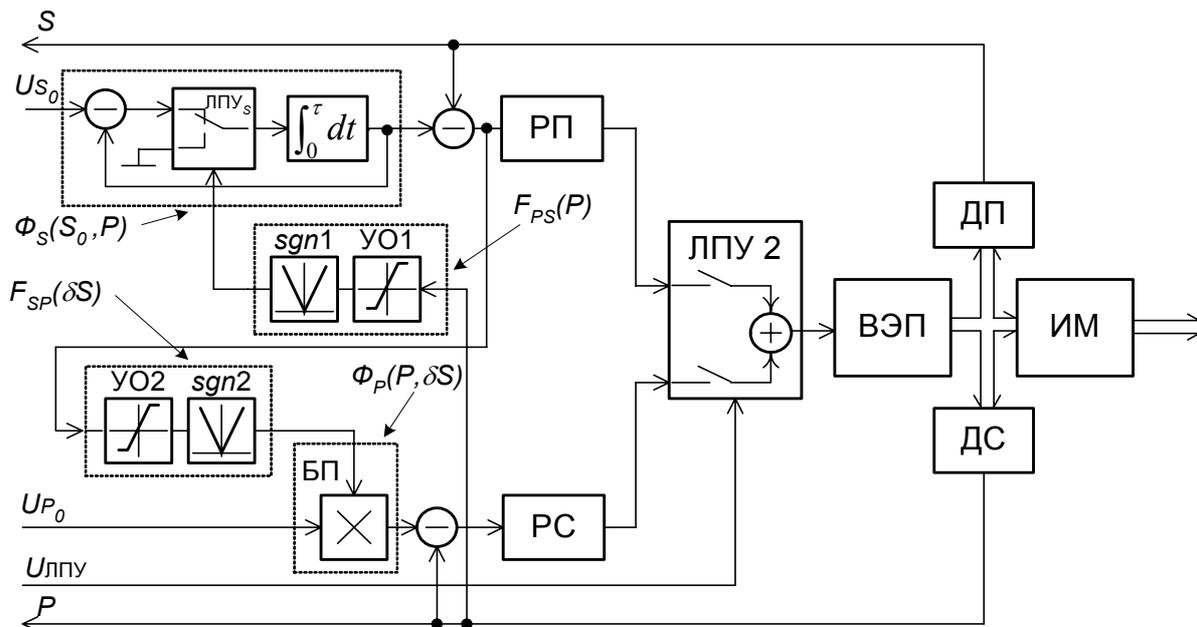


Рис. 4.42. Двухканальная система связанного позиционно-силового управления с нелинейным функциональным регулятором положения с логическим управлением

При отработке управляющих алгоритмов приводами других координат работа в какой-то момент времени сигнал с ДС становится равным нулю, ЛПУ2 переключается на управление положением, но сигнал задания, коммутируемый ЛПУ<sub>S</sub>, начинает увеличиваться с уровня  $S'_0$ , что обеспечивает плавность перемещения при переходе от контакта с объектом к работе в свободной зоне. Достижение сигналом  $S'_0$  величины сигнала задания по положению  $S_0$  обеспечивается наличием единичной отрицательной обратной связи, охватывающей интегратор.

Управление движением РО в многофункциональном РТК осуществляется как при отсутствии действия связей, так и при наличии их. Таким образом, проблему оптимизации структуры системы управления целесообразно решать для обоих случаев. Поставленная задача достигается, в общем случае, введением логически управляемых нелинейных функциональных регуляторов положения и силы с перекрёстными связями (см. рис. 4.34), характеристика которых может выбираться системой управления РТК в зависимости от выполняемого в текущий момент алгоритма управления подачей ТВС. 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.

Исследования системы связного регулирования с позиционно-силовым управлением универсальной РСС ввиду высокой сложности структуры и большого числа нелинейностей аналитическими методами затруднены, поэтому выполним их путём цифрового моделирования. В качестве характерного примера будем использовать алгоритм (см. рис. 2.17) определения координат центра ячейки контейнера с помощью измерительного конуса. Работа системы управления, реализующей указанный алгоритм, и её структура рассмотрены в гл. 2, 3. Укрупнённая структура системы связного регулирования в этом режиме представлена на рис. 4.43.

Двухканальный привод связного ПСУ по оси  $Z$  содержит нелинейный функциональный регулятор положения (ЛПУ<sub>S</sub> и интегратор И) с логическим управлением по силе, приводы  $X$  и  $Y$  в следящем режиме обрабатывают разностный сигнал с соответствующих пар датчиков силы. При моделировании использованы линейные модели ЭП. Модель «конус – ячей-

ка» (М «К-Я») описывает геометрию контакта измерительного конуса со стенками ячейки контейнера при его перемещении.

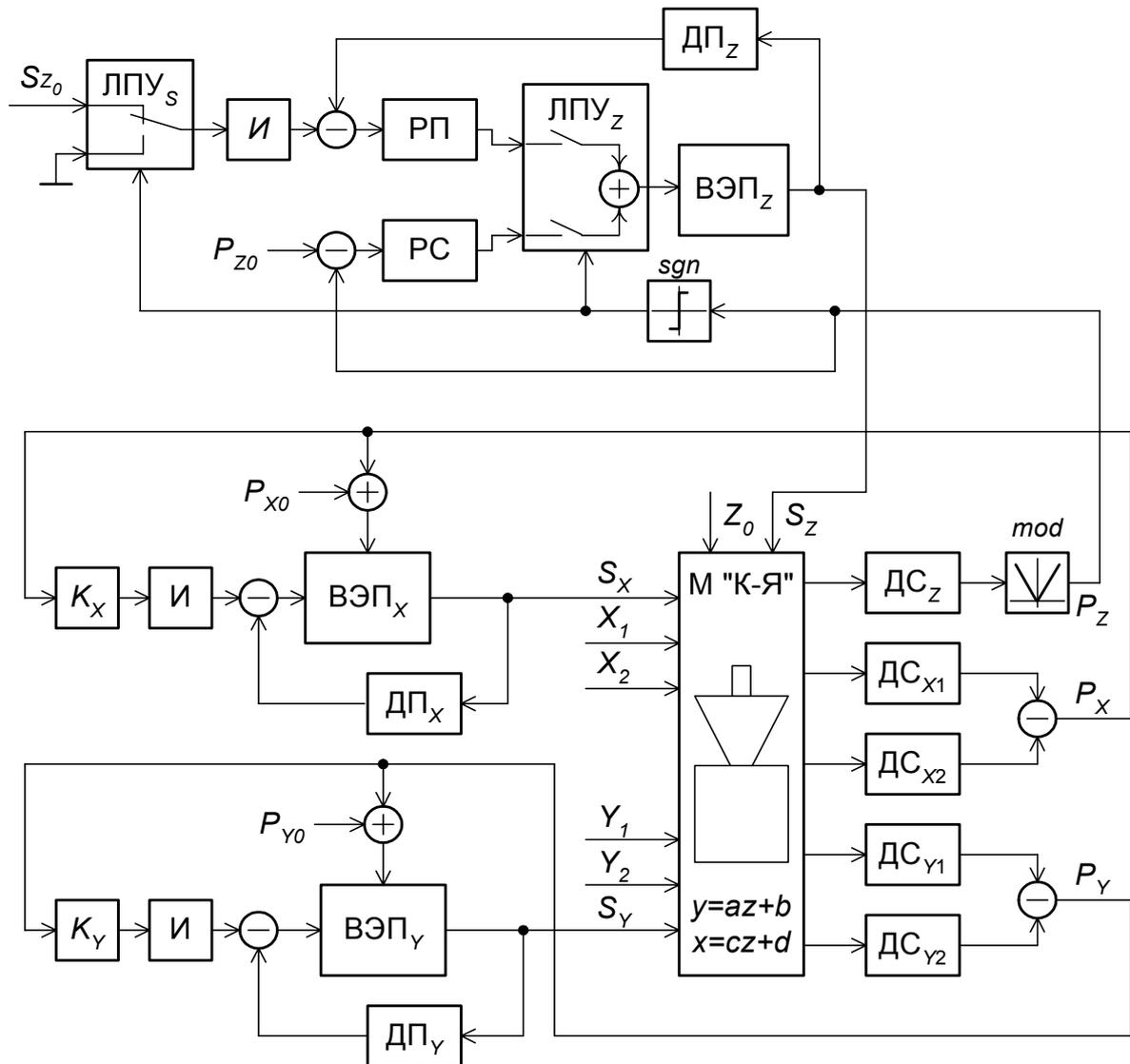


Рис. 4.43. Структура системы связного регулирования при определении координат

Исходное положение объектов после отработки системой программной точки позиционирования представлено на рис. 4.44, а. Образующая измерительного конуса составляет с его основанием угол  $\alpha = 60^\circ$  и описывается семейством линейных уравнений вида  $a = kb + c$ ; начальное отклонение осей ячейки и конуса составляет по оси  $X$  – 10 мм, по оси  $Y$  – 20 мм. Движение осуществляется по оси  $Z$  до контакта боковой поверхности конуса с краем отверстия ячейки. Инструментальная среда моделирования – пакет MATLAB.

Структурная модель измерительного конуса, реализующая геометрию контакта, приведена на рис. 4.44, б. Структурная модель системы (рис. 4.44), в состав которой входит и модель измерительного конуса, представлена на рис. 4.45. Модель привода по оси  $Z$  «*privodZ*» является двухканальной с позиционно-силовым управлением; управление переключением структуры производится по информации с датчика силы по координате  $Z$ .

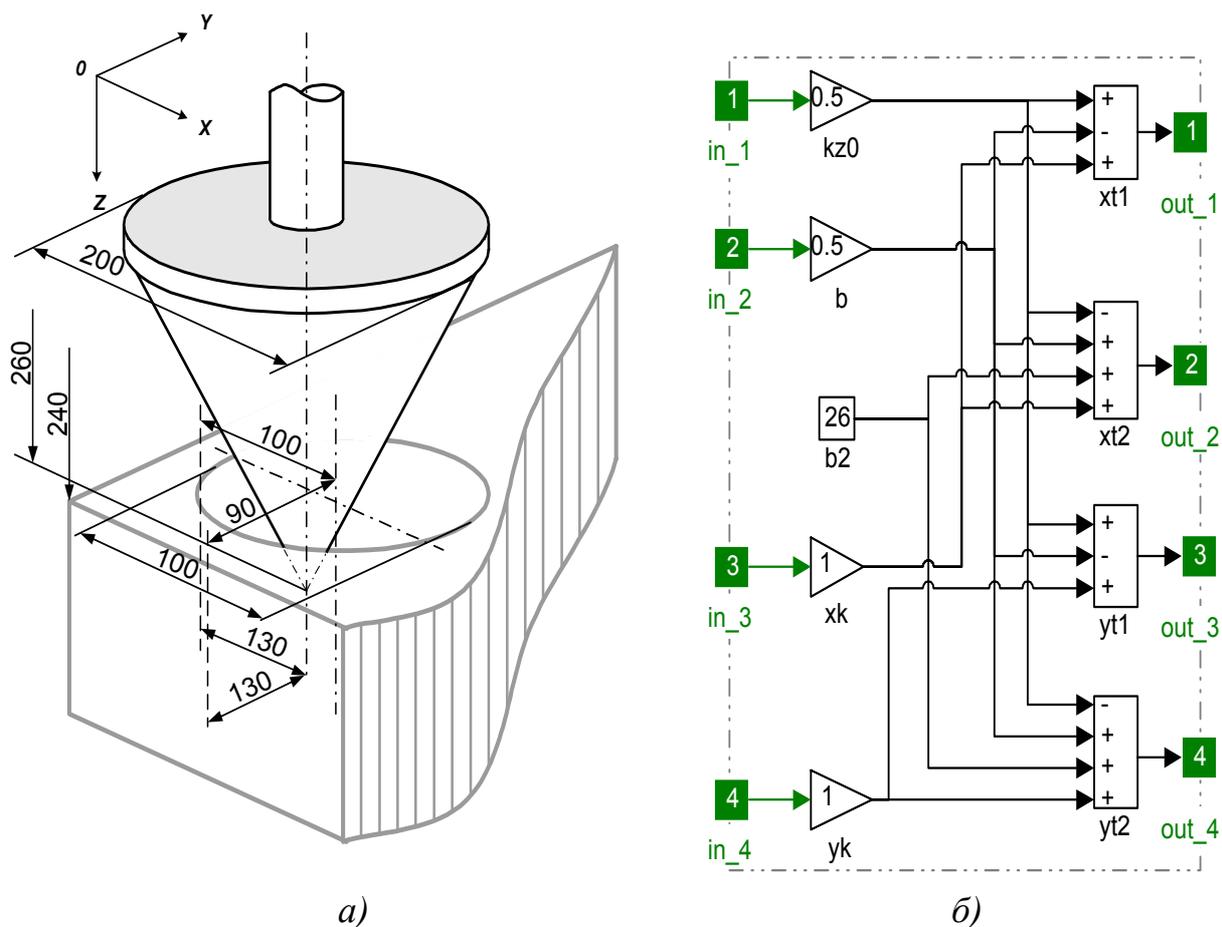


Рис. 4.44. Определение координат центра ячейки контейнера: а – геометрическая модель объектов; б – структурная модель измерительного конуса

Для обеспечения плавности перемещения при переходе от контакта с ячейкой к работе в свободной зоне в канале задания положения привода установлены переключатель  $swz0$  и интегратор  $int2$ , управляемые знаком силового взаимодействия  $sign$ . В таком режиме привод  $Z$  обеспечивает постоянный контакт измерительного конуса с ячейкой контейнера.

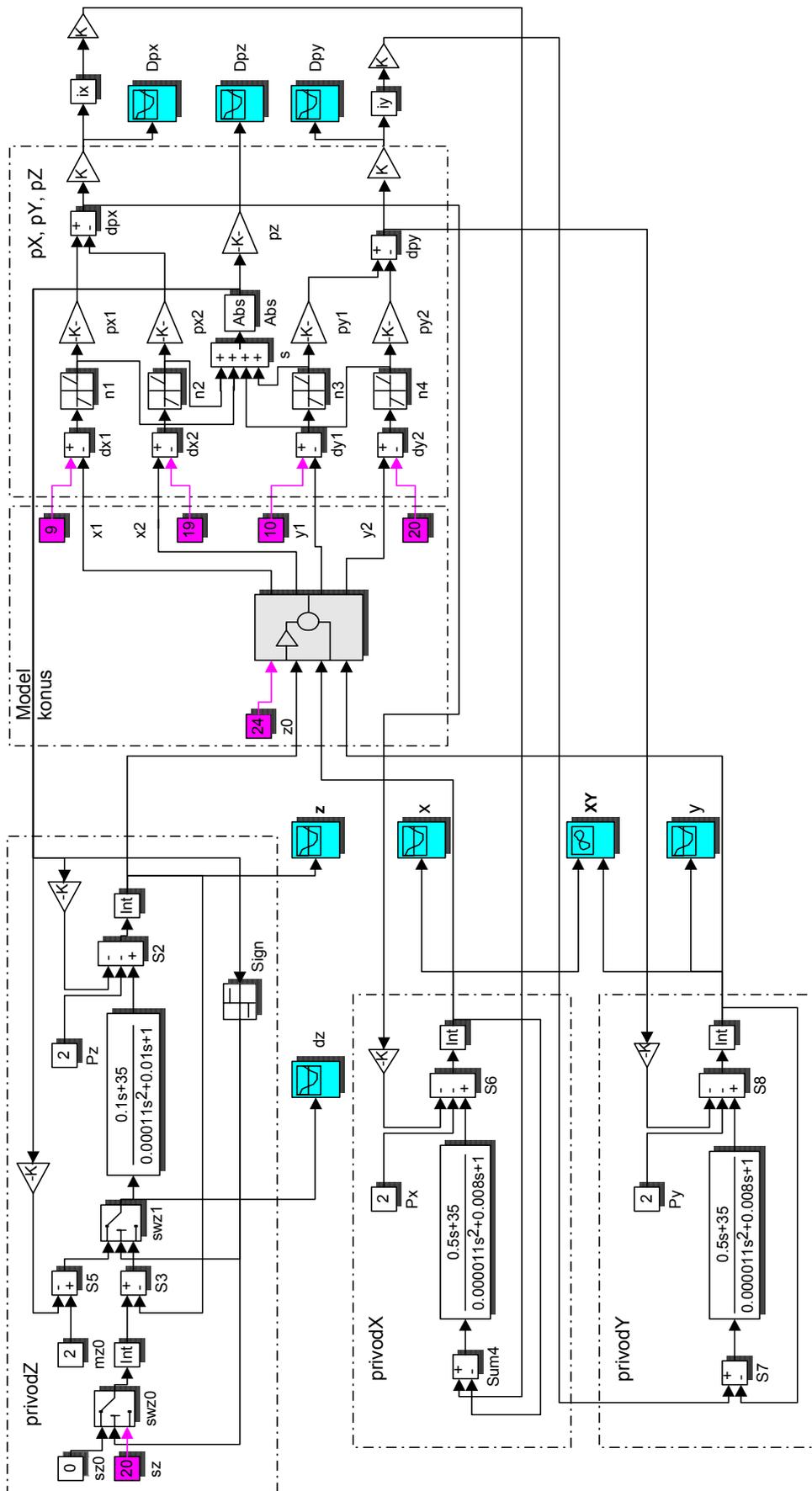


Рис. 4.45. Структурная модель системы позиционно-силового управления

Модель трёхкомпонентного датчика силы « $p_x, p_y, p_z$ » работает на основе геометрической информации о заданном уставками  $x_1, x_2, y_1, y_2$  положении ячейки и текущего перемещения модели конуса по оси  $Z$ . Разность сигналов деформации через пороговые элементы  $n_1 - n_4$  и блок выделения модуля  $Abs$  управляет переключением структуры привода  $Z$ .

Приводы по координатам  $X$  и  $Y$  « $privodX$ », « $privodY$ » обрабатывают сигнал с модели датчика силы  $dpx$  и  $dpy$  и перемещают измерительный конус в сторону уменьшения разности сигнала с элементов сравнения, что приводит к перемещению схвата с измерительным конусом одновременно по координатам  $X$  и  $Y$  и движению по координате  $Z$ , обеспечивающим постоянный контакт конуса с ячейкой. Величина перемещения запоминается интеграторами  $ix$  и  $iy$ . При совпадении оси ячейки с осью конуса сигналы с пар датчиков силы становятся равны между собой и движение завершается.

Результаты цифрового моделирования представлены графиками на рис. 4.46 (графики изменения сил) и рис. 4.47 (графики координатного смещения), из которых видно, что разработанная структура системы управления обеспечивает решение поставленной задачи совмещения осей ячейки контейнера и измерительного конуса. В момент времени  $t_1 = 0,24$  с произошёл контакт конуса с ячейкой по координате  $Y$ , при  $t_2 = 0,58$  с – по координате  $X$ . Совмещение завершилось через  $t = 1,1$  с после начала процесса.

Характер изменения сил при движении во многом определяется видом характеристики  $F(s)$ . Движение при совмещении осей может выполняться в скользящем режиме; возможно завершение процесса появлением субгармонических колебаний, но детальное исследование этих процессов лежит вне рамок настоящей работы.

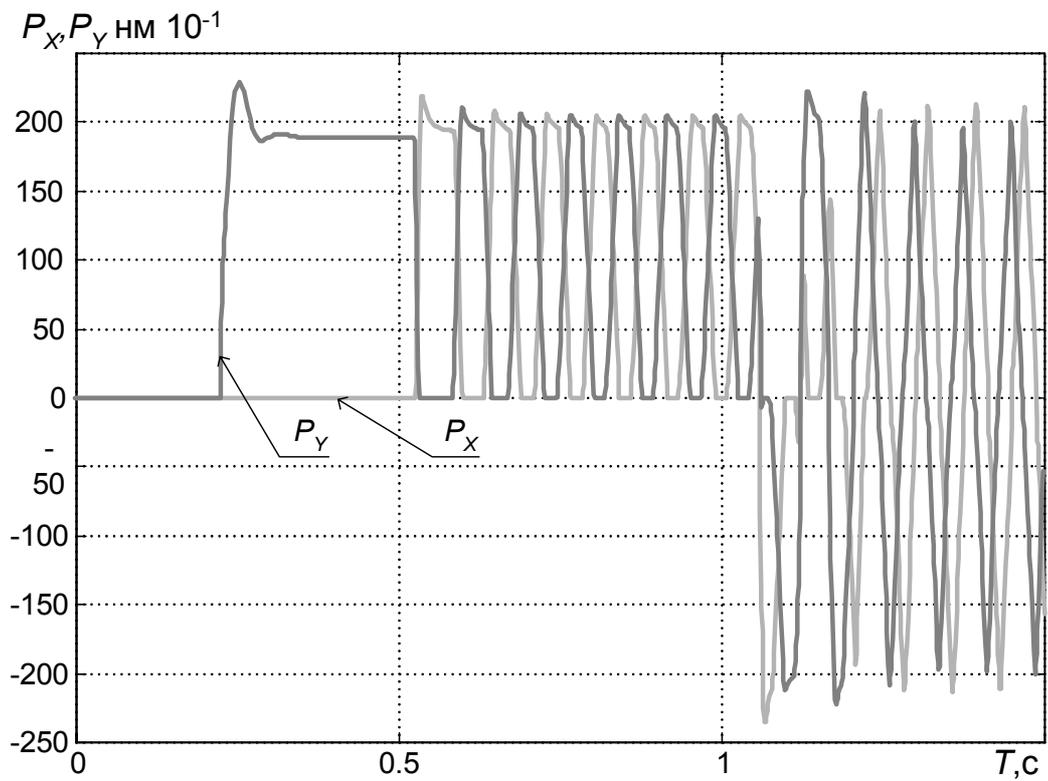
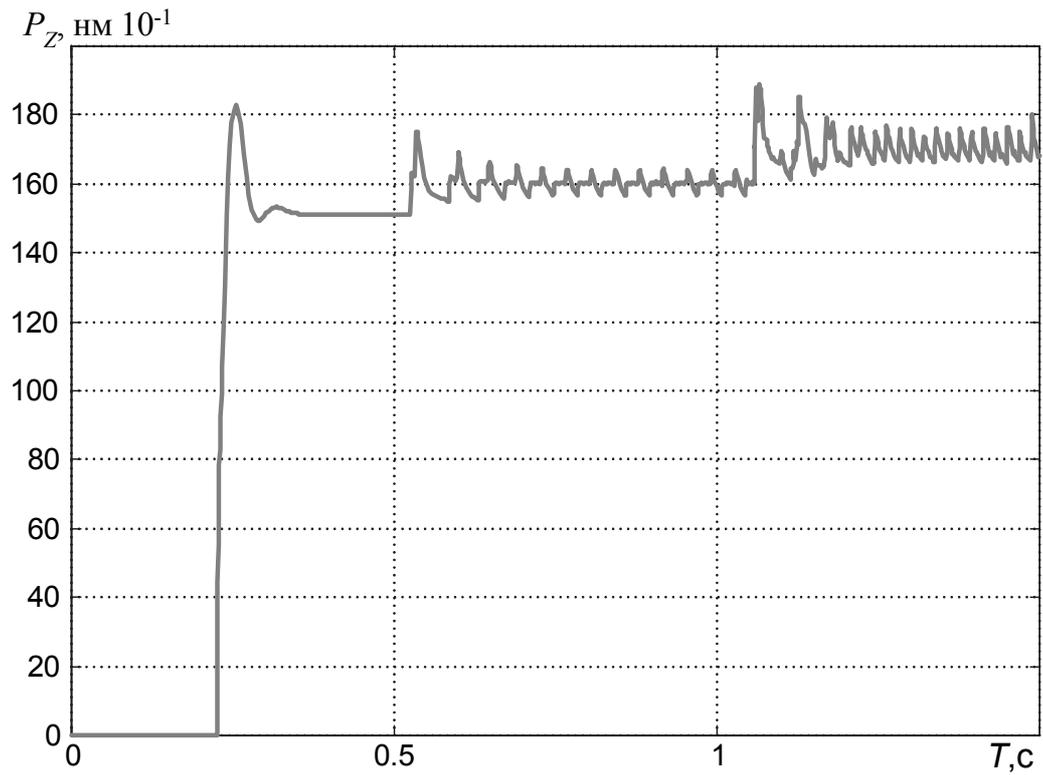


Рис. 4.46. Переходные процессы в системе управления.  
Графики изменения сил при определении координат центра ячейки

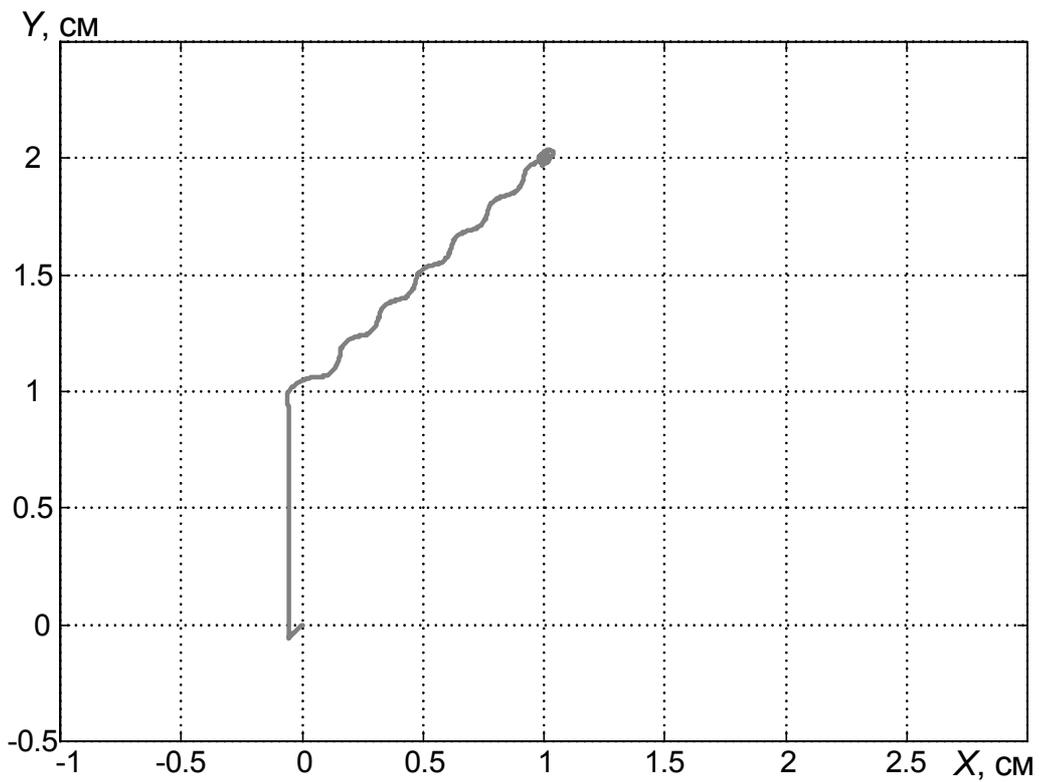
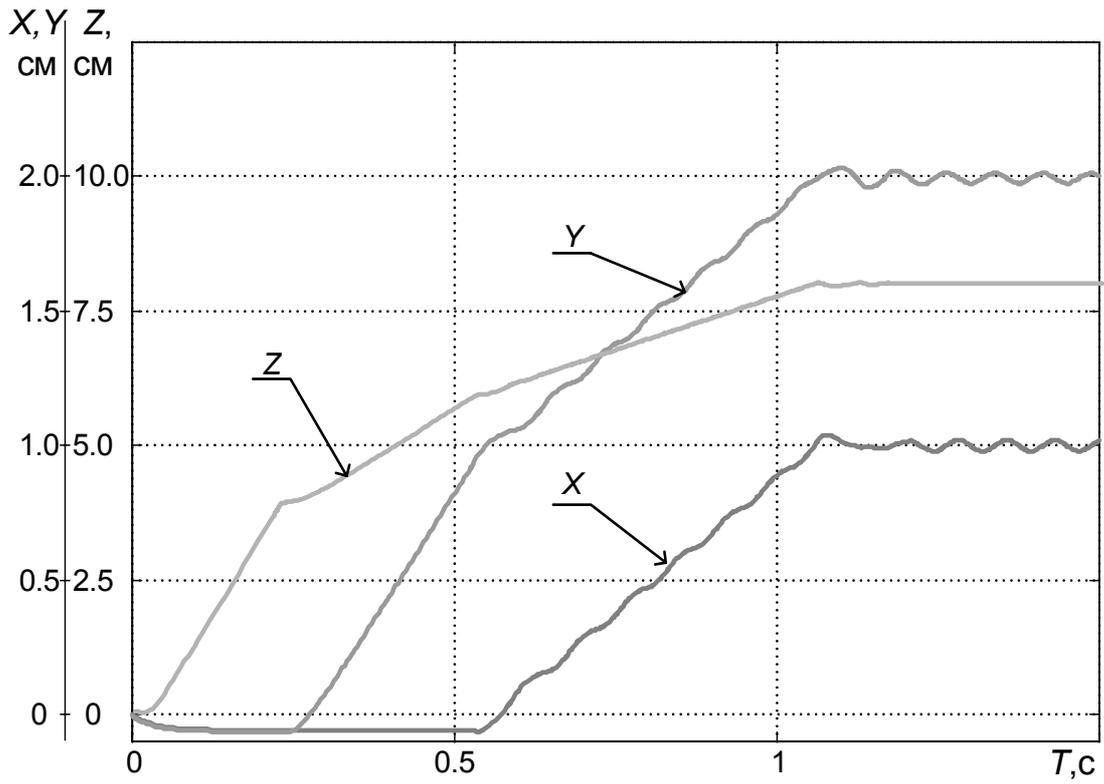


Рис. 4.47. Переходные процессы в системе управления. Графики смещения измерительного конуса при определении координат центра ячейки

## 5. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

### 5.1. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В составе РТС можно выделить три основных функциональных модуля: управляющая ЭВМ, исполнительные электроприводы и процесс сопряжения, являющийся объектом управления.

На управляющую ЭВМ возлагаются следующие задачи:

- распознавание сборочных ситуаций;
- решение задач диагностики, а именно определение причины несообразности сборочных единиц;
- формирование управления на исполнительные электроприводы;
- определение величины коррекции управляющего воздействия на основании использования математической модели сборочного процесса.

Учитывая функциональную схему системы управления роботизированного сборочного комплекса, исполнительный механизм должен иметь в своем составе электроприводы, обеспечивающие движение в функции отработки заданного положения, скорости и момента (силы). Таким образом электроприводы должны иметь переменную структуру.

Исходя из сделанных замечаний, предлагается функциональная схема исполнительной системы РТС (рис. 5.1). На схеме показана базовая деталь типа втулки, установленная на сборочном столе. Сборочный стол имеет две степени подвижности (в данном случае рассматривается сборка деталей в варианте решения плоской задачи) : горизонтального перемещения по координате  $X$  и вращательного движения по координате  $\alpha$ .

Вторая деталь – вал находится в схвате робота. Для выполнения этапа сопряжения схват робота имеет возможность перемещаться по координате  $Z$  вертикального перемещения. В общем случае робот имеет и другие степени подвижности, предназначенные для этапа транспортного перемещения, но для этапа сопряжения и ориентации они не участвуют и поэтому не рассматриваются.

Каждая степень подвижности исполнительной системы сборочного комплекса имеет привод с переменной структурой, имеющей возможность работать в режимах отработки заданного момента (силы) и положения исполнительного органа. Переключение режимов работы осуществляется с помощью коммутатора  $K_i$ , управляемого командами с ЭВМ.

Формирование сигналов задания по положению и задания на отработку момента (силы) осуществляется управляющей микроЭВМ в зависимости от информации с силомоментного датчика (СМД) и датчиков положения.

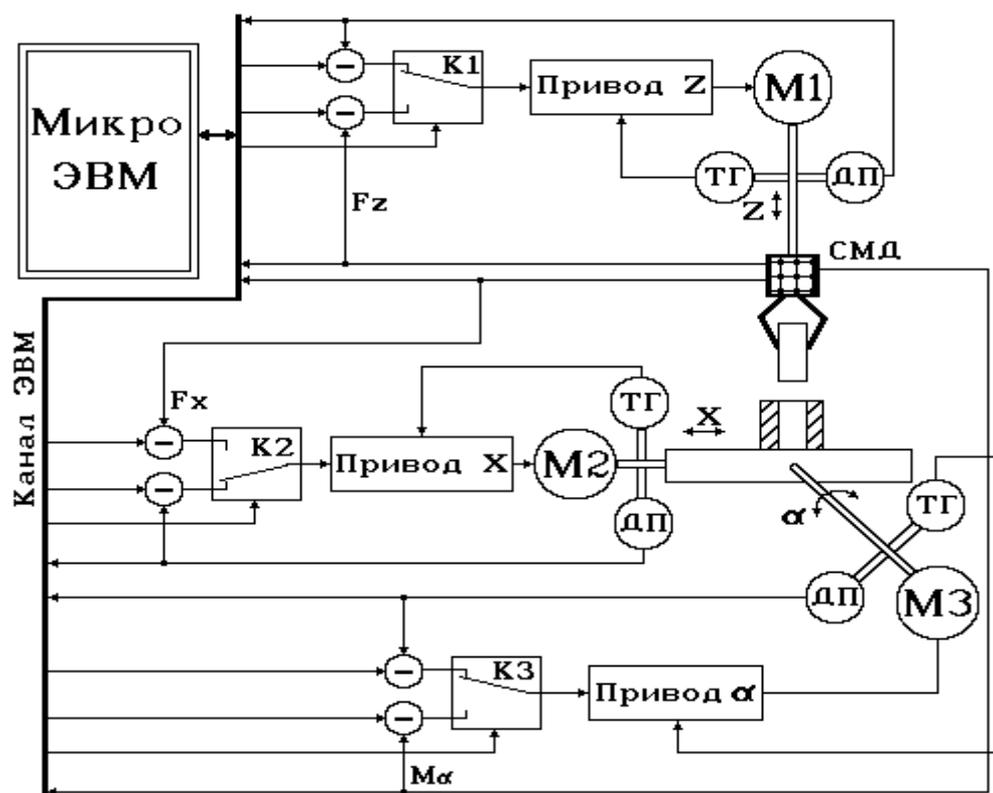


Рис. 5.1. Функциональная схема исполнительной системы роботизированного сборочного комплекса

Таким образом, в рассмотренной структурной схеме исполнительной системы роботизированного сборочного комплекса на управляющую ЭВМ возлагается достаточно широкий круг задач: от обработки информации с силомоментного датчика до управления приводами в следящем режиме. Следовательно, для работы в масштабе реального времени управляющая ЭВМ должна иметь высокие параметры по быстродействию, объему памяти и т.д.

Снижение требований к управляющей ЭВМ достигается построением РТС, в состав которой входят электроприводы с микропроцессорным управлением. Функциональная схема исполнительного комплекса с микропроцессорными приводами представлена на рис. 5.2. Микропроцессоры, входящие в состав микроконтроллера, осуществляют управление приводом в режиме обработки заданного момента (силы) или положения по командам с управляющей ЭВМ верхнего уровня. Микропроцессорный вычислитель обрабатывает информацию с силомоментного датчика. Управляющая микроЭВМ осуществляет только расчет траектории движения и обработку алгоритмов управления.

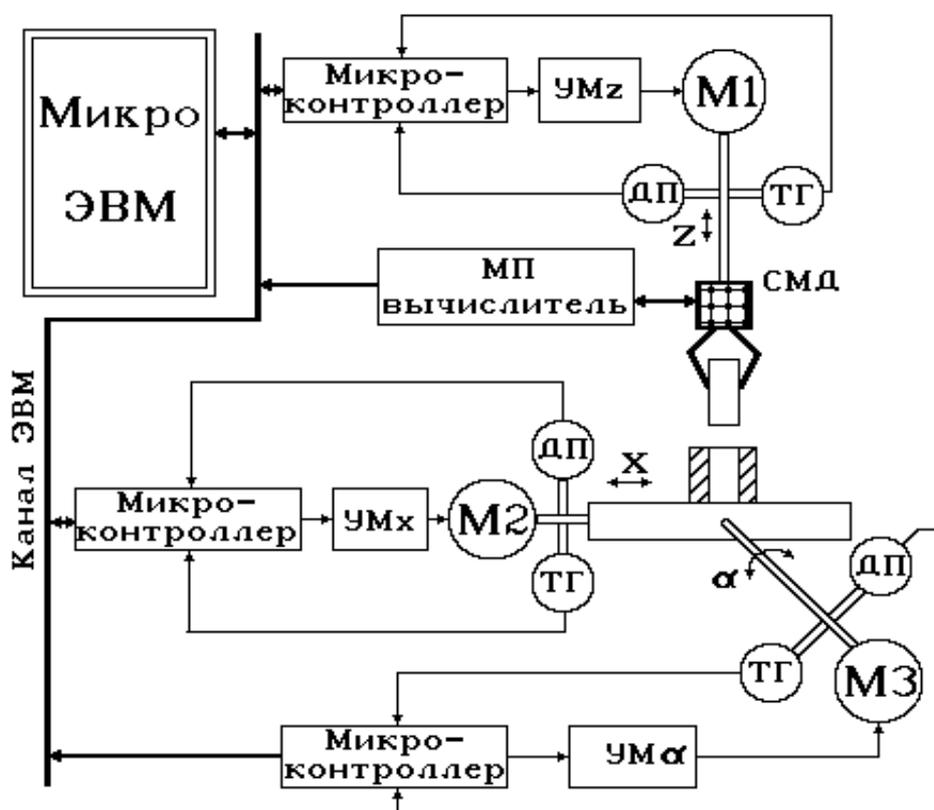


Рис. 5.2. Функциональная схема исполнительного комплекса сборочного комплекса с микропроцессорными приводами

На рис. 5.3 представлена функциональная схема, позволяющая значительно упростить аппаратную реализацию исполнительного комплекса сборочного комплекса.

Функции регуляторов положения, скорости, тока выполняет микроЭВМ, а в качестве преобразователя используются силовые ключи. При таком подходе построения системы управления целесообразно использовать цифровые датчики положения и скорости, а возможно, и цифрового силомоментного датчика (или АЦП). В этом случае значительно увеличивается вычислительная нагрузка на управляющую ЭВМ, но решение этой проблемы возможно применением микропроцессорного управления преобразователями по каждой координате.

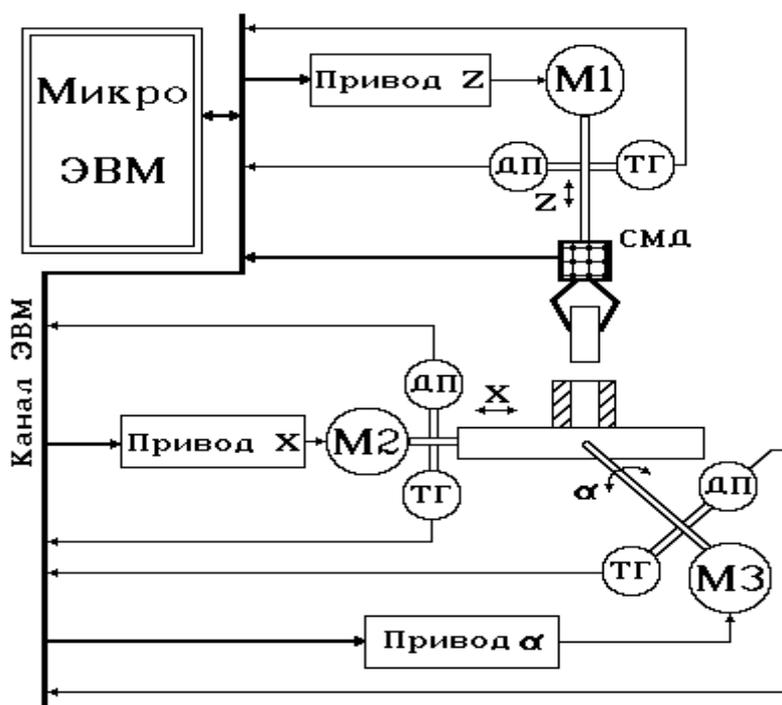


Рис. 5.3. Функциональная схема исполнительной системы сборочного комплекса с управлением от ЭВМ

В рассмотренных выше функциональных схемах предполагается наличие электроприводов с переменной структурой. Ключевым элементом привода является организация позиционного и моментного (силового) управления. Поэтому необходимо провести анализ и синтез структурной схемы привода в режиме отработки позиционного задания и моментного управления в зависимости от места расположения и вида датчика момента и места подачи управляющего сигнала.

Анализ алгоритмов работы и структур системы управления многофункциональной РТС при выполнении технологических операций, а также

систем позиционно-силового управления электроприводами позволяет сделать вывод о том, что подавляющее большинство управляющих операций может быть реализовано на программном уровне с использованием некоторого постоянного комплекта аппаратных средств (координатные электроприводы, группы датчиков состояния системы, блоки ЦАП/АЦП, интерфейсы и линии связи, панели и пульта оператора и т.п.). Общую структуру системы можно представить в виде, изображённом на рис. 5.4. РТС имеет большее количество степеней подвижности, структура которых может переключаться в зависимости от вида управления, организуя движения в двух системах координат – транспортной и инструментальной.

Представляется рациональным применение многоуровневой многопроцессорной СУ с распределением функций, предложенной в [68]. На верхнем уровне управления необходимо наличие двухпроцессорной системы с тем, чтобы каждый из процессоров выполнял свою группу функций (один – общее управление технологическим процессом подачи, другой – отображение его хода, диалог с оператором и АСУ верхнего уровня, протоколирование и т.п.) и одновременно контролировал работу другого.

В случае нештатного функционирования автоматической реконфигурации системы не требуется. Достаточно заблокировать движение рабочего органа манипулятора и выдать диагностическое сообщение персоналу.

Управление на исполнительном уровне (отдельными координатами и вспомогательным оборудованием) возможно поручить простым микропроцессорам, снабженным средствами преобразования сигналов.

Система управления комплексом, с одной стороны, должна обеспечивать автоматическое безаварийное выполнение технологических операций, а с другой – работать под управлением оператора в составе общей АСУТП. Микропроцессорная система управления должна быть приспособлена к работе в производственных условиях в режиме управления в реальном масштабе времени. Базовая аппаратная структура системы управления является тем более сложной, чем многообразнее задача, причём мера сложности определяется группой признаков, обозначающих архитектуру аппаратной части устройства. Проведём классификацию, в рамках которой выделим четыре класса архитектурных построений микропроцессорной системы управления РТК (рис. 5.5).

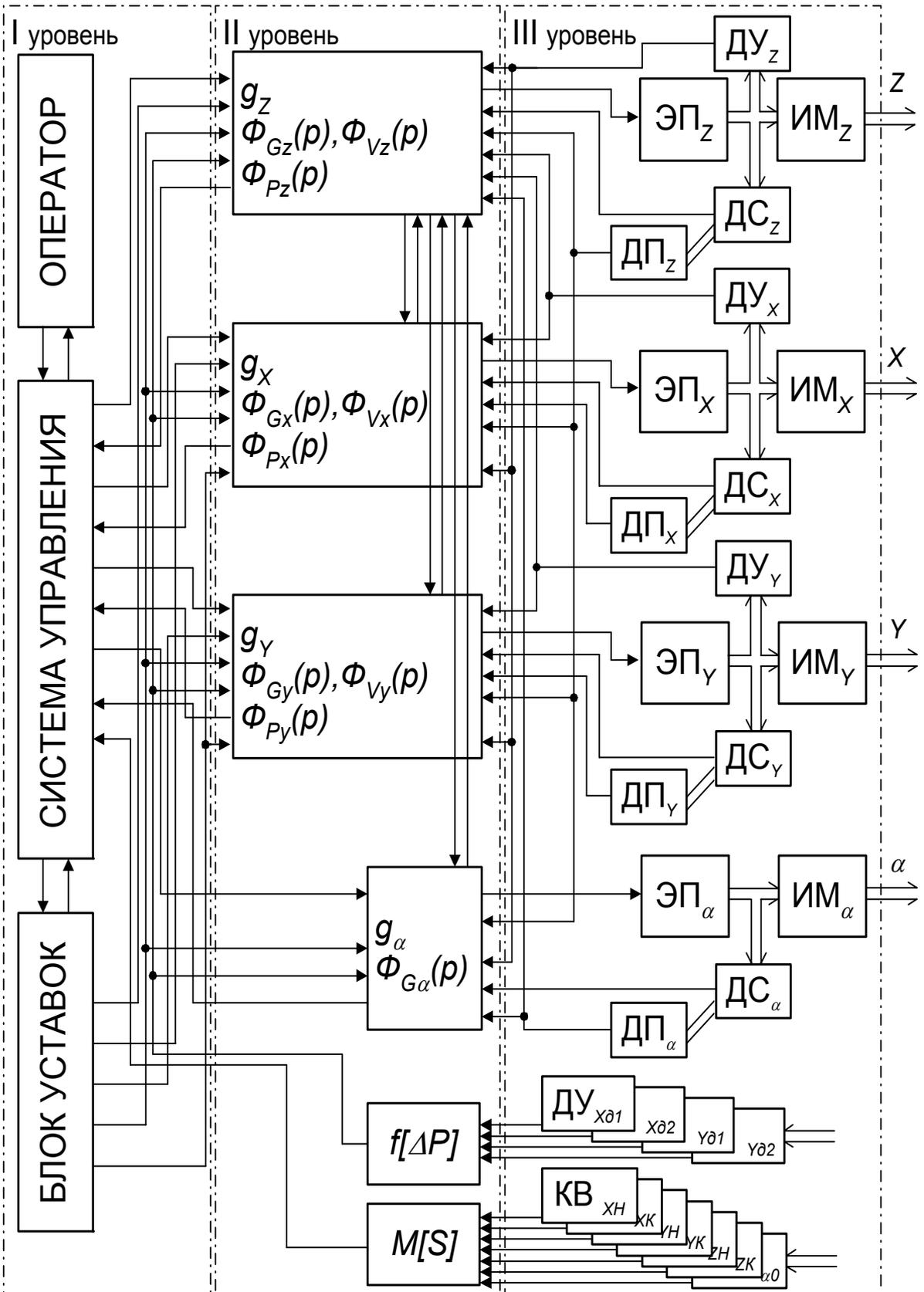


Рис. 5.4. Общая структура системы управления многофункциональной РТС

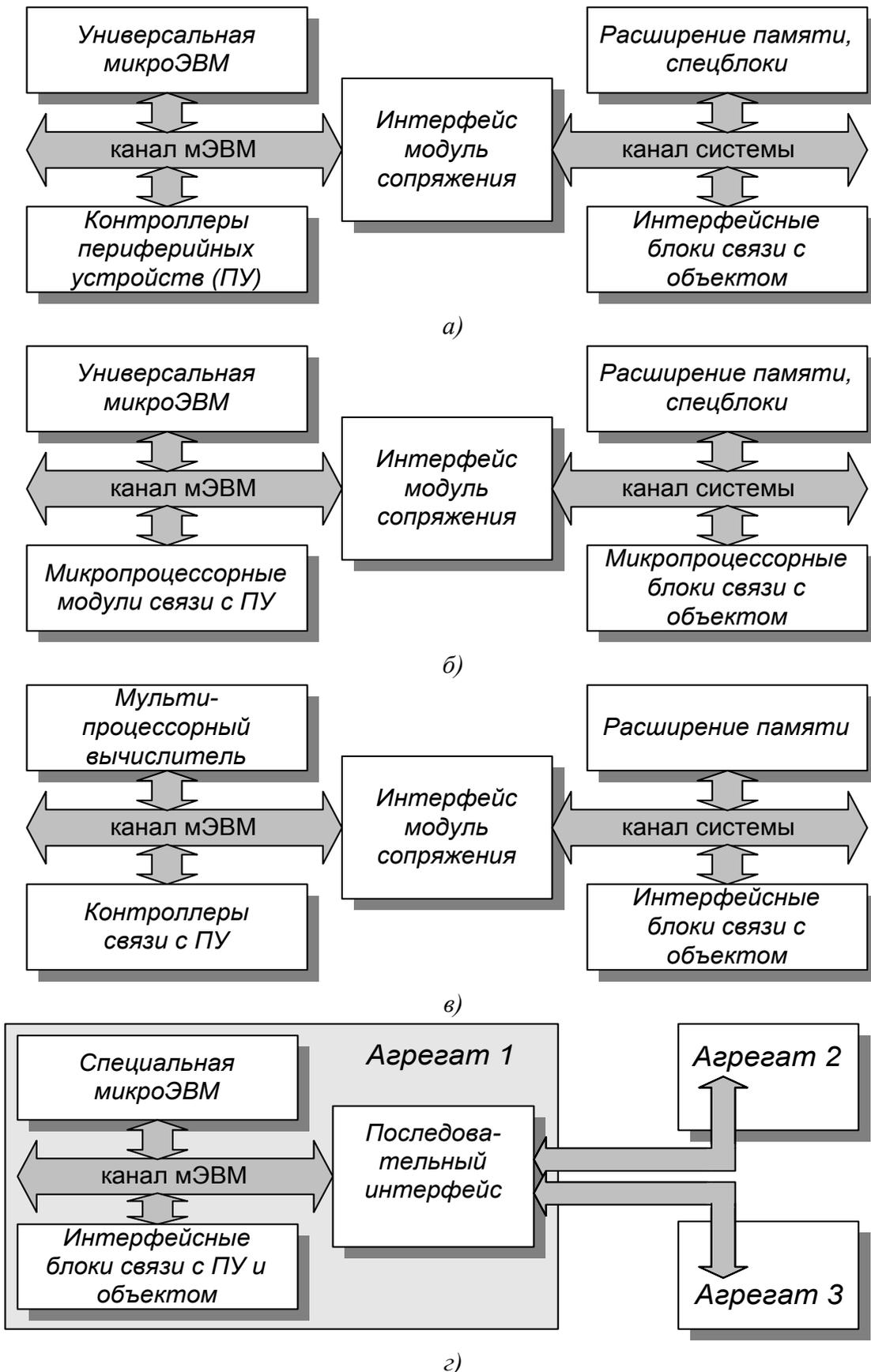


Рис. 5.5. Архитектурное построение микропроцессорных систем управления

Простейший вариант – с одним микропроцессором в составе универсальной микроЭВМ (рис. 5.5, *а*). Различные по своей структуре каналы ЭВМ и системы управления связаны через интерфейс – модуль сопряжения, предназначенный для программно настраиваемого соединения устройств с разным способом представления данных.

Интерфейсные блоки осуществляют связь с объектом (приводами и автоматикой РТК). Из-за ограниченных возможностей микроЭВМ используют расширение памяти и дополнительные аппаратные блоки. Все абоненты, связанные с такой системой, пассивны. Подобное устройство отличается простотой реализации и низкой стоимостью, но вычислительные и функциональные возможности ограничены.

Наращивают возможности двумя способами (рис. 5.5, *б*, *в*). На рис. 5.5, *б* представлена система, центральный вычислитель которой использует один микропроцессор, однако устройства связи с периферией микроЭВМ, устройства связи с объектом также построены на микропроцессорной основе. Таким образом, наращивание вычислительной мощности обеспечено путём разгрузки центрального вычислителя от функций ввода-вывода. Другая возможность состоит в непосредственном увеличении мощности центрального вычислителя за счёт мультипроцессорирования, как это показано на рис. 5.5, *в*. Ещё один способ, особенно актуальный для систем управления сложными многофункциональными устройствами больших размеров, заключается в декомпозиции всей системы на структурно однородные и функционально законченные агрегаты, каждый из которых располагает вычислителем, некоторой группой интерфейсных блоков и средствами межагрегатной связи по последовательному каналу (рис. 5.5, *г*). Естественным способом повышения уровня функциональности является увеличение числа процессоров и построение распределённой системы управления, в которой функции управления децентрализованы [67].

Постоянный оперативный контроль за ходом выполняемого технологического процесса подачи сборок обуславливает применение двухуровневой системы: первый уровень – микроЭВМ связи с оператором и формирование задач управления; второй уровень – распределённая многопроцессорная система формирования и обработки управляющей информации. Обмен с оператором в соответствии с принципом «активного оператора» должен включать элементы непрерывного взаимоконтроля человека и системы, в том числе постановку тестовых задач для оператора в периоды, ко-

гда его участие в реальном процессе управления не требуется. На эту же микроЭВМ можно возложить распознавание образов, вводимых с телекамеры зоны взаимодействия «ТВС – ячейка контейнера».

В то же время для управления объектом (тем более при наличии периферийных процессоров) требуется значительно менее мощный и быстродействующий процессор. В [23] показано, что для контурного управления промышленным роботом при работе с ТВС длительность расчета одной интерполяционной точки не должна превышать 5 мс, время опроса датчиков составляет 5 % времени работы ЭВМ, необходимая разрядность представления данных не превышает 16, размер ОЗУ данных – до 4 Кслов, ПЗУ – до 4 Кслов. В этом качестве вполне применим один из однокристалльных контроллеров.

В настоящее время в составе СУ широкое распространение получили персональные ЭВМ типа IBM PC. При всех их очевидных преимуществах эти ПЭВМ не рассчитаны на работу в производственных условиях, а, тем более, в жёстких условиях эксплуатации. Высоким требованиям к качеству и надёжности работы соответствуют индустриальные одноплатные микроЭВМ американских фирм Advantech и Octagon Systems. Являясь IBM-совместимыми, такие микрокомпьютеры позволяют оператору работать в привычной программной среде в любой из DOS- или Windows- оболочек, со стандартной клавиатурой и выводом информации на экран монитора.

Кроме того, для программирования производственных задач разработан чрезвычайно простой и доступный язык CAMBASIC, имеющий встроенную поддержку всех подсистем микроконтроллеров, включая дискретный и аналоговый ввод-вывод, прерывания, а также поддержку сетевых протоколов обмена.

Известно, что в составе системы со взаимоконтролем желательно иметь микроЭВМ разных типов и с различным матобеспечением. Это предохраняет от однотипных ошибок при проектировании аппаратных и программных средств. В то же время необходима совместимость каналов управления для их взаимодействия. В качестве таких совместимых платформ можно использовать микропроцессоры и микроконтроллеры фирмы Intel.

При построении распределённой многопроцессорной системы управления многофункциональной РТС возможны различные варианты объединения процессоров в сеть (рис. 5.6). На рис. 5.6, а показана объединённая система типа «замкнутый контур». Передача информации осуществ-

вляется вдоль контура в одном направлении, пока не возвратится к источнику. Гибкость такой системы высока, контур легко наращивается.

Надёжность недостаточна, так как отказ одного узла выводит из строя весь контур. Сеть типа «полная связь» (рис. 5.6, б) обеспечивает передачу информации прямо по назначению, но большое число связей усложняет систему. Возможен вариант соединения процессоров в «звезду» (рис. 5.6, в).

Центральный узел может быть общей памятью или переключающим устройством, связывающим источник и приёмник сигналов. Логика построения узла достаточно сложная, а выход его из строя является полным отказом системы. В структуре типа «общая шина» (рис. 5.6, г) каждое устройство может обмениваться с каждым, но при этом сложным узлом становится сама шина.

Во многих случаях предпочтение отдают «нерегулярной структуре» (рис. 5.6, д), в которой каждый процессор соединён по крайней мере с двумя другими, чтобы избежать

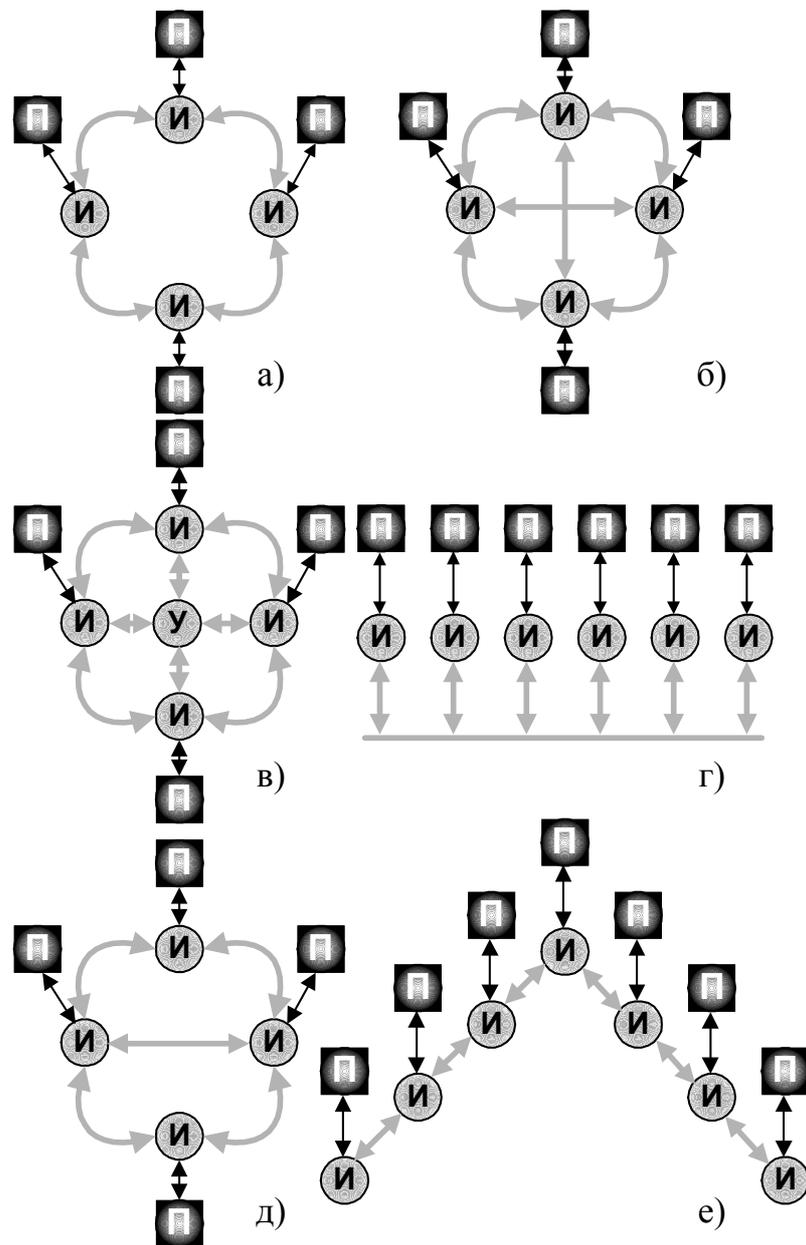


Рис. 5.6. Варианты объединения микропроцессоров в сеть в распределённой системе управления:  
 П – микропроцессор; И – интерфейс; У – усилитель

изоляции. В структуре типа «дерево» (рис. 5.6, *e*) организуются только необходимые связи. В условиях обеспечения безаварийной работы РТК подачи сборок и возможности изменения конфигурации системы управления при возникновении различных ситуаций необходимо обеспечить связь между всеми модулями, т.е. реализовать структуру в варианте рис. 5.6, *б* или рис. 5.6, *г*.

На локальную сеть возлагаются функции передачи сообщений за гарантированное время. Протяжённость линий связи обычно не превышает десятков метров, размер сообщения – нескольких десятков байт, а время доставки сообщения – в пределах от 0,01 до 0,1 с. Типичными являются два режима информационного обмена в сети: *широковещательный*, когда передаваемое сообщение предназначено для всех остальных подсистем (микроконтроллеров сети), и *абонентский*, когда сообщение предназначено только одному МП. Первым способом передаются различные информационные параметры, используемые многими подсистемами РТК, что позволяет уменьшить загрузку сети за счёт исключения множественных передач одного и того же сообщения различным адресатам. Вторым способом передаются команды управления от центрального процессора к исполнительным модулям и приоритетные сообщения. Наиболее распространёнными в настоящее время являются локальные сети двух структур: кольцевые и моноканальные (типа BITBUS). Последние являются значительно более удобными для реализации управляющих микросетей, так как допускают простую наращиваемость, модифицируемость и резервирование линий связи при простой аппаратной их реализации. В моноканальной сети время доставки сообщения не зависит от общего числа МП и такие сети обладают высокой живучестью и надёжностью. В сетях с единым моноканалом все МП связаны между собой одной общей линией связи (рис. 5.7).

Существует несколько известных методов доступа к разделяемой линии (протоколов), обеспечивающих разделение канала связи между многими подсистемами. Наиболее перспективным из известных является *интервально-маркерный метод*, позволяющий устранить конфликты в канале и наиболее полно использовать пропускную способность канала.

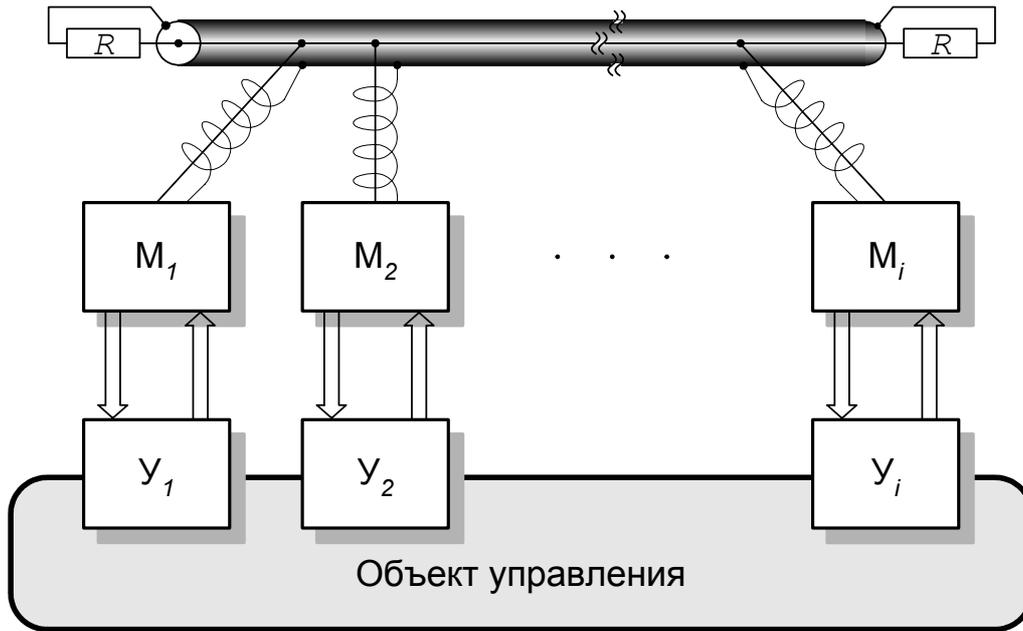


Рис. 5.7. Структура локальной сети микроконтроллеров многофункционального РТК

Граф состояний МП представлен на рис. 5.8. Запрос на передачу сообщения ( $RQ$ ) формируется в МП прикладной программой управления объектом, а задержки, реализуемые таймером, имеют следующий смысл:

$TM1$  – контроль пропажи маркера;

$TM2$  – ожидание своего окна;

$TM3$  – ожидание окончания периода сети;

$TM4$  – пауза перед восстановлением синхронизма.

Для реализации подсистемы требуются следующие ресурсы: порт последовательного обмена, таймер, два уровня прерываний. Этими ресурсами располагает, например, микроЭВМ Philips 80C552, позволяющая вести приём/передачу

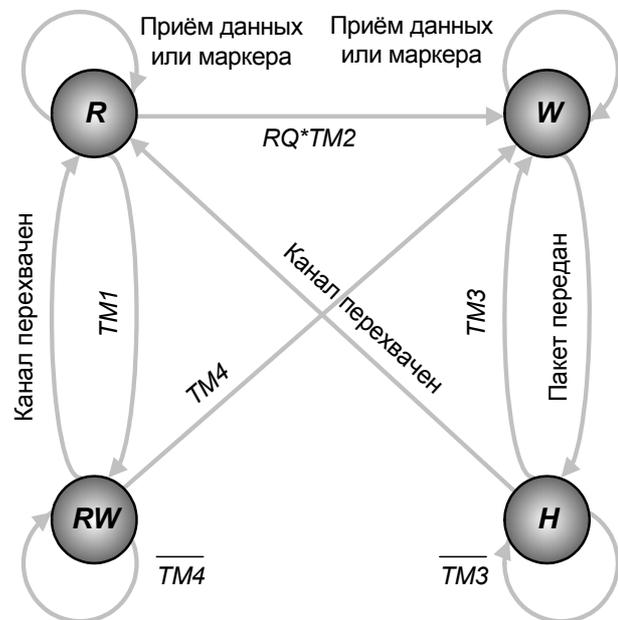


Рис. 5.8. Граф состояний микропроцессоров локальной сети

данных со скоростью до 375 Кбит/с. Время передачи одного байта составляет при этом 58,7 мкс, а пропускная способность сети при этом примерно равна 17 Кбайт/с. Очевидно, что микроконтроллер, работающий в составе распределённой системы управления РТК подачи сборок на основе локальной микросети, должен, кроме прикладной программы управления, иметь ещё и программные средства доступа к моноканалу, т.е. МП должен работать в 2-программном режиме с разделением всех ресурсов между этими двумя программами и реализацией механизма взаимодействия (например, на основе приоритета) между сетевой и прикладной программами.

Исходя из сказанного, реализацией системы управления многофункционального РТК подачи ТВС наиболее близкой к оптимальной является распределённая структура с двухпроцессорным комплексом «IBM-совместимая ЭВМ – микропроцессорный контроллер» на верхнем уровне и однокристалльными контроллерами, управляющими на исполнительном уровне отдельными координатами РТК и вспомогательным оборудованием.

## **5.2. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Задача управления электроприводами РТС на исполнительном уровне возлагается на микропроцессорный контроллер, основной функцией которого является реализация регуляторов силы, положения, скорости разного вида и в различных их сочетаниях в режимах позиционного, силового и позиционно-силового управления и переключения между ними.

Представим структурную схему привода с ПСУ, построенного по системе подчинённого регулирования с контурами тока, скорости и положения в виде рис. 5.9. На ней выделены элементы схемы с реализацией на программном уровне: МП регулятор положения и/или силы, формирующий управление; МП регулятор скорости; МП регулятор тока.

В зависимости от возможностей применяемой элементной базы на одном МП могут быть реализованы один или несколько регуляторов. Первым шагом было возложение на ЭВМ функции замыкания привода по положению и реализация пропорционального регулятора. В работе [55] были показаны требования, предъявляемые к МП, при использовании их в контуре привода.

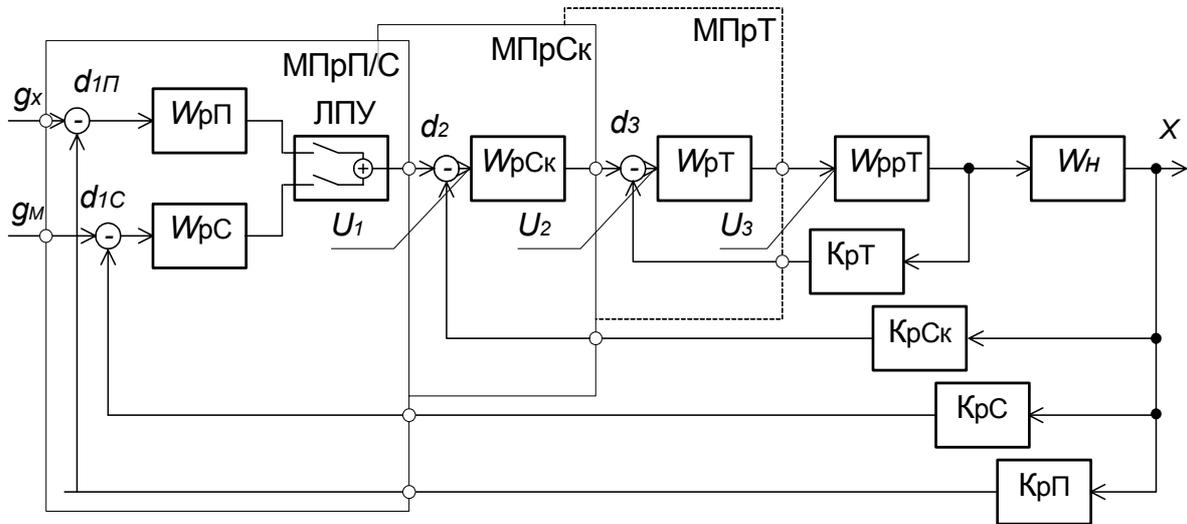


Рис. 5.9. Структурная схема микропроцессорного привода с ПСУ

По мере увеличения возможностей микроЭВМ (в первую очередь, ёмкость памяти, быстродействие, система команд расширенной арифметики) программно реализуются более сложные законы: П-, ПИ- и ПИД-регуляторы с непосредственным управлением силовыми ключами в тиристорных и транзисторных приводах. Среди работ, в которых более полно раскрыты вопросы построения приводов на основе МП, следует выделить работы [4, 49, 65]. МП как регулятор соответствующего контура привода выполняет три основные процедуры:

- 1) чтение входных сигналов (задания и обратной связи);
- 2) реализацию закона регулирования в реальном масштабе времени;
- 3) передачу на выход кода управляющего сигнала.

Наиболее сложным и в то же время включающем все предыдущие является ПИД-регулятор. Запишем систему уравнений в дискретной форме для МП контура, определяющего ПИД закон регулирования [42]:

$$U_i[nT] = K_{\text{П}}\delta[nT] + K_{\text{И}} \sum_{j=1}^n \delta[jT] + K_{\text{Д}}(\delta[nT] - \delta[(n-1)T]);$$

$$\delta_i[nT] = U_{zi}[nT] - K_{\text{ОС}}x[nT],$$

где  $U_{zi}$ ,  $U_i$  – соответственно входной и выходной сигналы регулятора;  $x$  – выходной сигнал контура;  $K_{\text{ОС}}$  – коэффициент передачи обратной связ-

зи;  $K_{\Pi}$ ,  $K_{\text{И}}$  и  $K_{\text{Д}}$  – коэффициенты передачи соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих;  $T$  – цикл программы расчёта.

Коэффициенты  $K_{\text{И}}$  и  $K_{\text{Д}}$  определяются через постоянные времени  $T_{\text{И}}$  интегрирования и  $T_{\text{Д}}$  дифференцирования:

$$K_{\text{И}} = T/T_{\text{И}}; K_{\text{Д}} = \frac{T_{\text{Д}}}{T}.$$

При необходимости вычисления старших производных можно использовать выражения для определения второй производной в виде

$$\Delta^2 \delta[nT] = \Delta \delta[nT] - \Delta \delta[(n-1)T],$$

а для третьей и более старших разностей в виде

$$\Delta^K \delta[nT] = \Delta \delta^{K-1}[nT] - \Delta \delta^{K-1}[(n-1)T] = \sum_{i=1}^K (-1)^i \binom{K}{i} \delta[(n+K-i)T],$$

где  $\binom{k}{r} = C_k^r = \frac{k!}{r!(k-r)!}$  – биномиальные коэффициенты.

МикроЭВМ привода оперирует с кодами  $N$  соответствующих параметров и уравнения для реализации могут быть представлены в виде [49]

$$N_{U_i} = \text{ent}(K_{\Pi} N_{\delta_i} + K_{\text{И}} \sum_{i=1}^n N_{\delta_i} + K_{\text{Д}} (N_{\delta_i} - N_{\delta_{(i-1)}}));$$

$$N_{\delta_i} = N_{U_{zi}} - K_{\text{ОС}} N_{x_i},$$

где  $N$  – код параметра, определяемого соответствующим индексом.

Цикл расчета и соответствующая ему частота дискретизации, с одной стороны, должна быть выбрана в несколько раз выше полосы пропускания аналоговой части привода, а с другой стороны – ограничена быстродействием применяемого МП, его системой команд и особенностей построения алгоритма управления.

Кроме учёта временных соотношений, необходимо определить и потребности в постоянной памяти (ROM) для хранения программ и в оперативной памяти (RAM) для временного хранения данных. Определим методику выбора требуемого быстродействия микропроцессорных средств и

оценки эффективности (с точки зрения времени реализации) алгоритмов позиционно-силового управления при выполнении операций подачи ТВС.

Исходные данные должны включать:

- алгоритм управления движением привода;
- требуемую точность перемещения;
- максимальные геометрические размеры перемещений;
- частоту тактовых импульсов  $\omega$ ;
- период постоянной несущей частоты  $T$ ;
- максимальную скорость перемещения  $V_{\max}$ .

Следует отметить, что, варьируя исходные данные, можно получить различные оценки. Например, в случае определённой заранее микроЭВМ может быть поставлена задача выбора алгоритма, наиболее эффективно реализуемого на микроЭВМ данной вычислительной мощности. С другой стороны, может быть поставлена задача определения требуемого быстродействия МП.

Разрядность величин, необходимая для работы по тому или иному алгоритму, зависит от максимальных геометрических размеров координатных перемещений, требуемой точности движения по формируемой траектории, скоростных характеристик и особенностей самих алгоритмов, но может быть выбрана для большинства микроЭВМ равной восьми, шестнадцати или тридцати двум. Необходимость работы при расчётах со словами двойной и тройной длины резко снижает производительность микропроцессорной системы.

Требуемое время выполнения «средней» операции определим как

$$\bar{t}_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{усл}}}{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i q_i}{\omega},$$

где  $T_{\text{усл}}$  – условное время отработки алгоритма;  $q_i = t_i / t_{\text{ср}}$  – весовой коэффициент времени из множества  $\{q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m\}$ , определяющий отношение времени выполнения операции  $i$ -го типа ко времени выполнения наиболее часто повторяющейся операции;  $w_i$  – число операций  $i$ -го типа из множества  $\{w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m\}$ , которое определяет число и состав операций алгоритма и, в случае задания конкретного МП, системы команд.

Полученная величина  $t_{\text{CP}}$  и может служить оценкой требуемого быстроедействия. Кроме этого, необходимо учитывать время на подготовку входных данных (опрос и преобразование информации с датчиков обратной связи), время на реализацию алгоритмов управления приводом, поэтому полученная оценка должна быть уменьшена:

$$\bar{t}'_{\text{CP}} \approx (0,4 \div 0,6) \bar{t}_{\text{CP}}.$$

Изложенная методика достаточно полно учитывает основные технические характеристики, предъявляемые к микропроцессорным средствам и алгоритмам, однако она отличается сложностью и трудоёмкостью, поскольку в случае перебора алгоритмов и возможности использования микроЭВМ различных типов необходимо выполнять большой объём программирования и обработки результатов. В связи с этим рассмотрим другой вариант методики выбора необходимых алгоритмов и возможности их реализации на микроЭВМ и микропроцессорах (рис. 5.10).

Поскольку возможности микропроцессорных средств не должны, в принципе, ограничивать требования к задачам управления, в первую очередь выбираются необходимые алгоритмы. Затем определяется приблизительное время реализации алгоритма управления, для чего в нём выделяются блоки, требующие для реализации наибольших временных затрат, и составляются программы в системах команд конкретного МП.

Зная в процентном отношении затраты на реализацию таких блоков и время их выполнения в конкретном МП, можно определить общее время выполнения алгоритма. Например, в алгоритмах линейной и круговой интерполяции [11] по методу оценочной функции наибольшее время занимает вычисление очередных оценочных функций и приращений по ведомой координате – до 75...80 %. После этого определяется, соответствует ли полученное время допустимому времени реализации, если это выполняется, разрабатываются и отлаживаются полностью управляющие программы. В противном случае исследуется возможность повышения производительности данного МП (с учётом организации ввода-вывода) либо производится замена микроЭВМ на более мощную, после чего необходимо ещё раз повторить изложенный процесс.

Главным достоинством предложенной методики является небольшая трудоёмкость, поскольку вначале необходимо программировать лишь 20...30 % от полного состава ПО.

Аппаратная часть нижнего уровня управления многофункциональным РТК может быть реализована на микропроцессорах различных типов: восьмиразрядных микроЭВМ фирмы Intel семейства MCS-51 и их аналогов (Philips, Dallas, Atmel); шестнадцатиразрядных семейства MCS-96; микроконтроллерах Microchip PIC; сигнальных DSP-процессорах и т.д. [13].

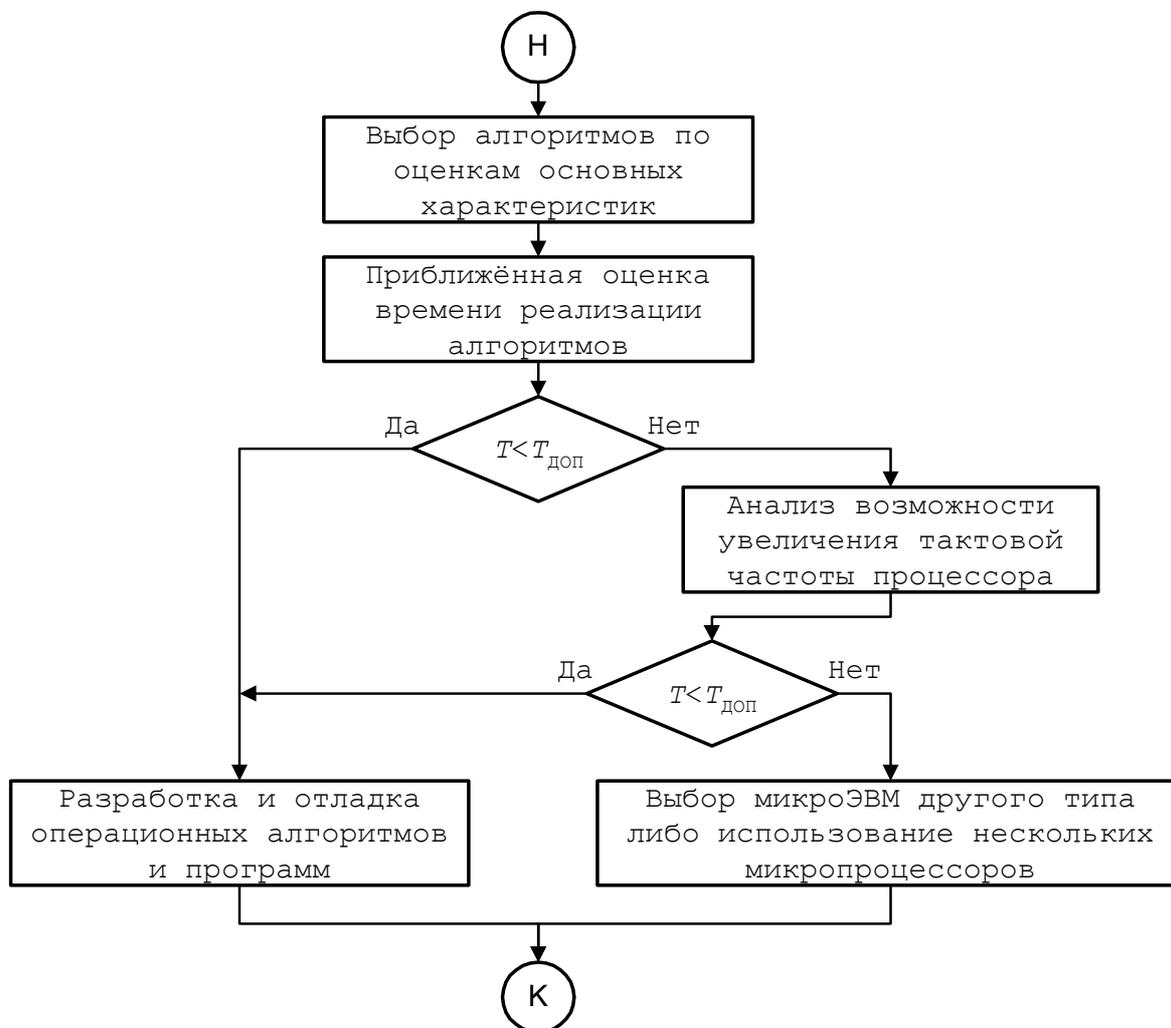


Рис. 5.10. Методика выбора необходимых алгоритмов и анализ возможности их реализации

Такие устройства имеют развитую систему ввода-вывода, а высокая производительность и аппаратная поддержка цифровой обработки сигналов позволяют реализовывать многоконтурную цифровую коррекцию управляемых объектов. Встроенные ШИМ-преобразователи могут быть применены для непосредственного управления электроприводами исполнительных механизмов, а наличие сетевых протоколов обмена легко позволяет объединить процессоры в локальную сеть.

### 5.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

При программной реализации большого числа алгоритмов управления РТК подачи ТВС в условиях распределённой многоуровневой многопроцессорной структуры системы управления и необходимости обеспечения согласованной работы различных процессорных узлов задача разработки, программирования и занесения в память каждого модуля управляющей программы резко усложняется. Кроме того, системы с переменной структурой должны иметь возможность автоматически изменять программное обеспечение под текущую задачу управления. С целью обеспечения максимальной эффективности кодов программирование выполняется на языке низкого уровня – ассемблере используемого микроконтроллера, а если в составе системы используются процессоры различных типов, то и ассемблер у каждого из них является уникальным.

Системы непосредственного управления исполнительными устройствами (СНУ) универсальной РТС с целью повышения живучести и надёжности функционирования объекта реализуются в виде локальных постов – концентраторов, или микроконтроллеров, содержащих несколько модулей и обслуживающих исполнительные и осведомительные устройства по территориальному признаку. С увеличением числа исполнительных устройств, управляющих и осведомительных сигналов усложняются состав СНУ, алгоритмы их взаимодействия и соответствующее им программное обеспечение. Для автоматизации процесса проектирования и отладки СНУ весьма эффективно использование САПР. Однако универсальные системы САПР здесь неприемлемы. Для решения отмеченной задачи предлагается специально ориентированная система автоматизированного программирования (САПР), предназначенная для разработки систем управления, выполненных по иерархической структуре: микроЭВМ верхнего уровня – локальная сеть – микроконтроллеры – исполнительные устройства (следящие приводы, устройства релейной автоматики) – устройства обратной связи (непрерывные датчики положения, скорости и сил; датчики типа вкл/выкл).

Система локализована на четыре концентратора по восемь модулей в каждом. Модули универсальны и могут устанавливаться в любой из концентраторов системы: адрес модуля и, соответственно, состав программного обеспечения, используемого в данной локализации, однозначно опреде-

ляется физическим местом расположения модуля. Состав системы представлен на рис. 5.11.

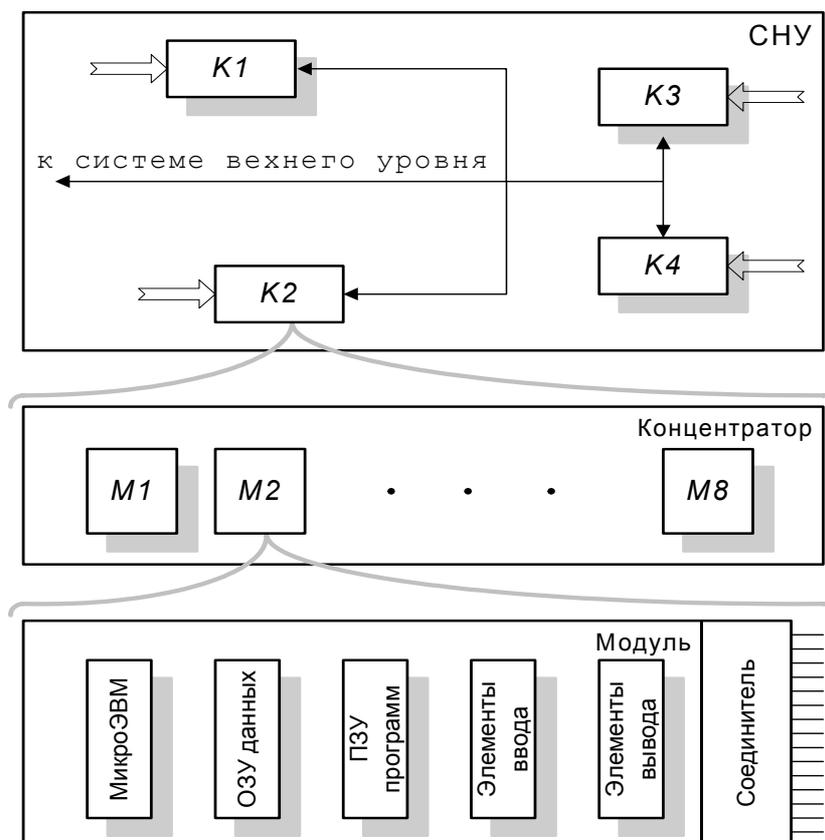


Рис. 5.11. Состав системы управления при автоматической генерации управляющих программ

Здесь показаны: K1...K4 – концентраторы сигналов; M1...M8 – интеллектуальные модули ввода-вывода.

Характеристики объектов, на которые распространяется САПР:

- большое число входных (осведомительных) и выходных (управляющих) – до 256/256 сигналов;
- высокая степень алгоритмической зависимости всех сигналов;
- ограниченное число модулей в концентраторе по теплоэнергетическим требованиям;
- обмен информацией с ЭВМ верхнего уровня по локальной сети с резервированием;
- управление следящими приводами;
- расположение исполнительных устройств и датчиков обратной связи по всему объему и составным частям объекта, в т.ч. связанных через гибкий токопереход;

– модули ввода–вывода имеют универсальность для установки в любое место любого концентратора.

Укрупнённая блок-схема алгоритма работы САПР представлена на рис. 5.12.

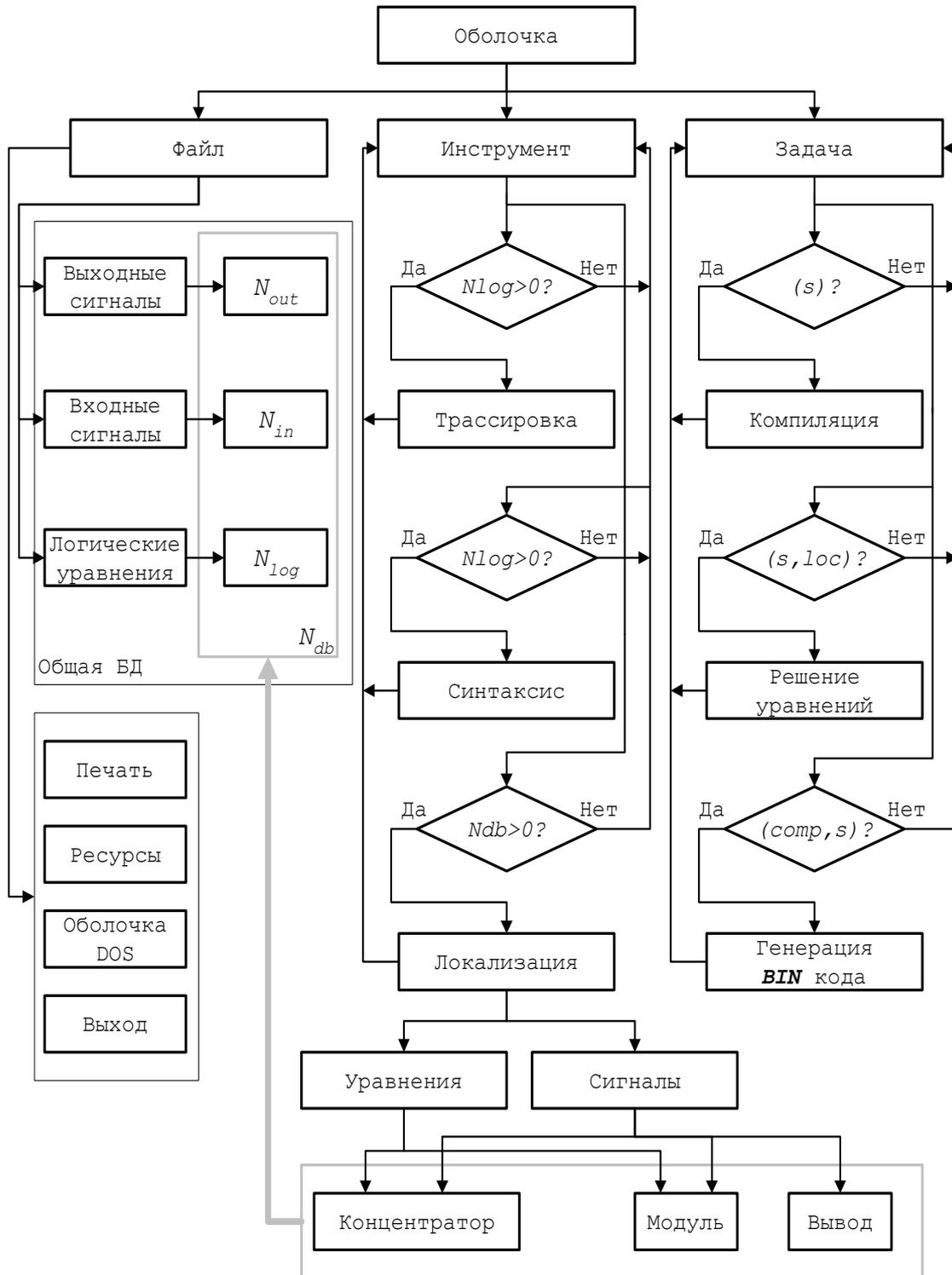


Рис. 5.12. Укрупнённая блок-схема работы алгоритма САПР

Система выполняет следующие функции:

- автоматическую группировку модулей в концентраторы сигналов в соответствии с локализацией источников и приемников сигналов;
- назначение входных и выходных сигналов на входы и выходы модулей при минимизации объема информации передаваемой между различными модулями и числа незадействованных входов и выходов;
- формирование логических функций управления для каждого модуля в каждом концентраторе;
- генерацию управляющего кода для каждого модуля в формате языка базовой оболочки системы;
- формирование загрузочных модулей управляющих программ каждого модуля концентратора;
- диагностику модуля на соответствие требованиям технических условий по выходным характеристикам, в том числе и функциям защиты;
- занесение объектного кода управляющей программы в память модуля с микроЭВМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассмотрены в основном системы позиционно-силового управления адаптивными роботами и робототехническими комплексами при выполнении сборочно-монтажных операций.

Практически не рассмотрены вопросы применения адаптивного позиционно-силового управления для решения задач дистанционного и дистанционно-автоматического управления манипуляционными роботами двустороннего действия, для решения задач компенсации динамического взаимовлияния и упругих деформаций, позиционно-силового программирования технологических роботов при выполнении широкого класса работ со связанным объектом и интеллектуального позиционно-силового управления в условиях неопределенности.

Авторы располагают научными результатами по принципам построения и позиционно-силового управления манипуляционными системами робототехнических лазерных комплексов, лазерных обрабатывающих центров и лазер-роботов при обработке плоских и пространственных объектов сложной конфигурации.

Решение перечисленных выше задач авторы предполагают отразить в последующих учебных пособиях, над которыми они работают в настоящее время.

Коллектив авторов учебного пособия выражает свою признательность его рецензентам – известным ученым в области мехатронных и робототехнических систем – профессору В.М. Лохину и профессору Ю.В. Подураеву.

Будем также благодарны всем читателям за отзывы и конструктивную критику и свои соображения по содержанию предлагаемого учебного пособия.

Замечания читателей просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, кафедра автоматических и мехатронных систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абильситов, Г. А.* Технологические лазеры : справ. пособие / Г. А. Абильситов [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1991. – 357 с.
2. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления / Я. Я. Алексанкин [и др.] ; под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1990. – 332 с.
3. Автоматизированный электропривод / под общ. ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
4. Автоматизированный электропривод : I Международ. (XII Росс.) конф. : тез. докл. СПб. : СПбГЭТУ, 1995. – 155 с.
5. Автоматы-настройщики следящих систем / Б. В. Новоселов [и др.] ; под ред. Б. В. Новоселова. – М. : Энергия, 1975. – 264 С.
6. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / под ред. П. Д. Крутько. – М. : Радио и связь, 1988. – 306 с.
7. Математическая модель вентильного двигателя / А. А. Афанасьев // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – № 5. – С. 21 – 27.
8. *Афанасьев, В. Н.* Электроприводы промышленных роботов с адаптивным управлением / В. Н. Афанасьев [и др.]. – Томск : ТГУ, 1987. – 165 с.
9. Технологические роботы для механической обработки. Механика и управление / В. Л. Афонин // Научно-технический прогресс в машиностроении; под ред. акад. К. В. Фролова. – Вып. 16. – М. : ИМАШ АН СССР, 1989. – 132 с.
10. Применение промышленных роботов в качестве технологического оборудования на отделочно-зачистных операциях / В. Л. Афонин [и др.]. – М. : ВНИИТЕМР. – № 1. – 1990. – 52 с.
11. *Байков, В. Д.* Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ / В. Д. Байков, С. Н. Вашкевич. – Л. : Машиностроение, 1986. – 106 с.
12. *Башарин, А. В.* Примеры расчёта автоматизированного электропривода на ЭВМ / А. В. Башарин, Ю. А. Постников. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 512 с.
13. *Боборыкин, А. В.* Однокристалльные микроЭВМ / А. В. Боборыкин [и др.]. – М. : МИКАП, 1994. – 400 с. – ISBN 5-85959-030-х.
14. *Бойчук, Л. М.* Синтез координирующих систем автоматического управления / Л. М. Бойчук. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 160 с. – ISBN 5-283-01521-1.

15. *Борцов, Ю. А.* Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 288 с. – ISBN 5-283-04544-7.

16. *Борцов, Ю. А.* Автоматические системы с разрывным управлением / Ю. А. Борцов, И. Б. Юнгер. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

17. Вентильные электрические машины робототехнических систем : аннотир. Указ. изобретений (1985 – 1993 гг.) / под ред. Г. А. Шаншурова, О. И. Новокрещёнова. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 1995. – 230 с. – ISBN 5-7623-0815-4 б.ц.

18. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / В. Д. Косулин, Г. Б. Михайлов, В. В. Омельченко, В. В. Пutnikов. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.

19. *Воробьёв, Е. И.* Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е. И. Воробьёв, Ю. Г. Козырев, В. И. Царенко. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.

20. *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. – ISBN 5-7038-2207-6.

21. *Вукобратович, М.* Управление манипуляционными роботами : теория и прил. / М. Вукобратович, Д. Стокич. – М. : Наука, 1985. – 384 с.

22. *Вукобратович, С.* Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / С. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански. – М. : Мир, 1989. – С. 376.

23. *Герасимов, М. И.* К вопросу выбора микропроцессорной базы управления роботом / М. И. Герасимов, Д. О. Верецкий // Электромеханические устройства и системы : межвуз. сб. науч. тр. Воронеж : ВГТУ, 1996. – С. 91 – 97.

24. *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, Е. А. Девянина. – М. : Физматлит, 1994. – 368 с. – ISBN 5-02-014589-0.

25. Динамика вентильного электропривода постоянного тока / под ред. А. Д. Поздеева. – М. : Энергия, 1975. – 224 с.

26. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Б. А. Ивоботенко [и др.]. – М. : Энергия, 1971. – 624 с.

27. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / В. С. Кулешов [и др.] ; под общ. ред. Е. П. Попова. – М. : Машиностроение, 1986. – 328 с.

28. *Егоров, И. Н.* Системы позиционно-силового управления технологическими роботами / И. Н. Егоров // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2003. – № 10 – С. 15 – 20.
29. *Егоров, И. Н.* Проектирование следящих систем двухстороннего действия / И. Н. Егоров [и др.] ; под ред. В. С. Кулешова. – М. : Машиностроение, 1980. – 302 с.
30. Привод сборочного робота / И. Н. Егоров, А.А. Кобзев, В.Н. Кравченко // Приборы и системы управления. – 1981. – № 5. – С. 35 – 37.
31. Управление робототехнической системой подачи тепловыделяющих сборок / И. Н. Егоров, В. А. Немонтов // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2004. – № 4. – С. 28 – 33.
32. Принципы построения и управления манипуляционных систем лазер-роботов / И. Н. Егоров, В. П. Умнов // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2004. – № 11 – С. 28 – 33.
33. *Ключев, В. И.* Теория электропривода : учеб. для вузов / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
34. *Кобзев, А. А.* Адаптация управляющего воздействия в приводах сборочного робота / А. А. Кобзев // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1991. – № 12. – С. 73 – 79.
35. *Он же.* Коррекция программного движения в системах управления сборочными роботами / А. А. Кобзев // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1992. – № 3 – 4. – С. 15 – 20.
36. *Он же.* Обеспечение четвертой формы инвариантности в технологических системах / А. А. Кобзев // Судостроительная промышленность. – Выпуск 33. – 1991. – С. 77 – 84. – (Серия общетехническая).
37. *Козырев, Ю. Г.* Промышленные роботы : справ. / Ю. Г. Козырев. – М. : Машиностроение, 1988. – 392 с.
38. *Коровин, Б. Г.* Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами / Б. Г. Коровин, Г. И. Прокофьев, Л. Н. Рассудов. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
39. *Крутько, П. Д.* Управление исполнительными системами роботов. – М.: Наука, 1991. – 332 с. – ISBN 5-02-014592-0.
40. *Кузнецов, Б. И.* Проектирование многоканальных систем оптимального управления / Б. И. Кузнецов, Б. В. Новосёлов, И. Н. Богаенко, Н. А. Рюмшин. – Киев : Техника, 1993. – 245 с. – ISBN 5-335-01088-6.
41. *Кузнецов, Б. И.* Микропроцессорное управление многоканальными системами высокой точности / Б. И. Кузнецов, В. Е. Сергеев, В. М. Чернышев. – Киев : Техника, 1990. – 208 с.

42. *Куо, Б.* Теория и проектирование цифровых систем управления : [пер. с англ.] / Б. Коу. – М. : Машиностроение, 1986. – 447 с.
43. *Лебедев, А. М.* Следящие электроприводы станков с ЧПУ / А. М. Лебедев, Р. Т. Орлова, А. В. Пальцев. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 222 с.
44. *Лебедевский, М. С.* Научные основы автоматической сборки / М. С. Лебедевский, В. Л. Вейц, А. И. Федотов. – Л. : Машиностроение, 1985. – 316 с.
45. *Макаров, И. В.* Нелинейная математическая модель насыщенного вентильного двигателя постоянного тока / И. В. Макаров, В. В. Сидельников // *Электротехника*, 1979. – № 5. – С. 14 – 17.
46. Манипуляционные системы роботов / А. И. Корендясев [и др.]; под общ. ред. А. И. Корендясева. – М. : Машиностроение, 1989. – 472 с.
47. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н. Д. Егунова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 744 с. – ISBN 5-7038-2030-8.
48. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьёва. Кн.1. Кинематика и динамика / Е. И. Воробьёв, С. А. Попов, Г. И. Шевелёва. – М. : Высш. шк., 1988. – 304 с.
49. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э. Л. Тихомиров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 320 с.
50. *Михайлов, О. П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М. : Машиностроение, 1990. – 304 с.
51. *Михелькевич, В. Н.* Автоматическое управление шлифованием / В. Н. Михелькевич. – М. : Машиностроение, 1975. – 304 с.
52. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления / под ред. Ю. И. Топчеева. – М. : Машиностроение, 1971. – 466 С.
53. *Новосёлов, Б. В.* Проектирование квазиоптимальных следящих систем комбинированного регулирования / Б. В. Новосёлов. – М. : Энергия, 1972. – 199 с.
54. Новые методы управления сложными системами. – М. : Наука, 2004. – 333 с. – ISBN 5-02-032787-5.
55. *Перельмутер, В. М.* Микропроцессорные системы управления электроприводами / В. М. Перельмутер // *Микропроцессорные средства и системы*, 1986. – № 5. – С. 59 – 62.
56. *Письменный, Г. В.* Системы силомоментного оучувствления роботов / Г. В. Письменный, В. И. Солнцев, С. А. Воротников. – М. : Машиностроение, 1990 – 96 с.

57. Повышение качества позиционирования электроприводов введением нелинейного элемента в прямой тракт / А. А. Кобзев [и др.] // Электротехника, 1994. – № 3. – С. 44 – 48.
58. Попов, Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления : учеб. пособие для вузов / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1989. – 304 с.
59. Попов, Е. П. Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы / Е. П. Попов, А. Ф. Верещагин, С. Л. Зенкевич. – М. : Наука, 1978. – 398 с.
60. Проектирование систем со сложными кинематическими связями / И. Н. Богаенко [и др.]. – Киев : Техника, 1996. – 232 с.
61. Сафонов, Ю. М. Электроприводы промышленных роботов / Ю. М. Сафонов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
62. Системы управления манипуляционных роботов / В. С. Медведев, А. Г. Лесков, А. С. Ющенко; под ред. Е. П. Попова. – М. : Наука, 1978. – 416 с.
63. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами / Б. Н. Петров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 254 с.
64. Тимофеев, А. В. Адаптивные робототехнические комплексы / А. В. Тимофеев. – Л. : Машиностроение, 1988. – 332 с.
65. Файнштейн, В. Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / В. Г. Файнштейн, Э. Г. Файнштейн. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
66. Хлыпало, Е. И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах / Е. И. Хлыпало. – Л. : Энергия, 1973. – 344 с.
67. Шевкопляс Б. В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения / Б. В. Шевкопляс. – М. : Радио и связь, 1993. – 256 с. – ISBN 5-256-00973-7.
68. Шиянов, А. И. Системы управления перегрузочных манипуляторов атомных электростанций с ВВЭР / А. И. Шиянов, М. И. Герасимов, И. В. Муравьев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 239 с.
69. Электроприводы манипуляционных роботов с силовомоментным очувствлением: учеб. пособие / И. Н. Егоров. – Владимир, 1990. – 96 с.
70. Эпштейн, И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И. И. Эпштейн. – М. : Энергоиздат, 1982. – 192 с.
71. Egorov I.N., Tarasenko V.I., Umnov V.P. Radiation transporting system of technological laser robots in position-and-force uncertainty conditions of interaction with object. PROCEEDINGS OF SPIE.1999.Vol. 3688. – P. 297 – 302.

Учебное издание

ЕГОРОВ Игорь Николаевич  
КОБЗЕВ Александр Архипович  
МИШУЛИН Юрий Евгеньевич  
НЕМОНТОВ Владимир Александрович

УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ  
С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ

Учебное пособие

Редакторы И.А. Арефьева, Е.В. Невская, Л.В. Пукова  
Технический редактор Н.В. Тупицына  
Корректоры Е.В. Афанасьева, В.В. Гурова  
Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 22.12.05.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.  
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 16,04. Уч.-изд. л. 17,13. Тираж 150 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.