

**Библиотека  
Инженера**



Будяков А. Г., Воробьев В. А.

# Промышленные роботы

Кинематика, динамика,  
контроль и управление

Роботизация строительства

Системы строительных роботов

Приводы промышленных роботов

Измерительные системы

Особенности управления

Находка для специалиста!



*Серия «Библиотека инженера»*

**Булгаков А. Г., Воробьев В. А.**

# **Промышленные роботы**

*Кинематика, динамика, контроль и управление*

**Москва  
СОЛОН-ПРЕСС  
2011**

УДК 621.39  
ББК 32.88+22.13  
Б 90

Булгаков А. Г., Воробьев В. А.

**Б90 Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление.** Серия «Библиотека инженера». — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 488 с.: ил.

**ISBN 978-5-91359-013-8**

В монографии изложены теоретические основы адаптации промышленных роботов для целей строительства. Рассмотрены технологические особенности строительных процессов и задачи их роботизации, сформулированы требования к роботизации строительных процессов и представлена структурная организация роботов и РТК для автоматизации строительных процессов. Описаны манипуляционные системы строительных роботов, алгоритмы решения задач кинематики и динамики манипуляторов и приводы промышленных роботов строительного назначения. Особое внимание уделено информационно-измерительным системам строительных роботов. Рассмотрены задачи планирования траекторий движений роботов при выполнении строительных операций и особенности управления строительными роботами.

Для инженерно-технических работников строительных, проектных и научных организаций, занимающихся вопросами механизации, роботизации и автоматизации в строительстве, а также для студентов и аспирантов вузов.

#### **КНИГА — ПОЧТОЙ**

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Оформить заказ можно на сайте [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru) в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (495) 254-44-10, 252-73-26.

**Бесплатно** высылается каталог издательства по почте. Для этого присылайте конверт с маркой по адресу, указанному в п. 1.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса [www.solon-press.ru/kat.doc](http://www.solon-press.ru/kat.doc).

**Интернет-магазин** размещен на сайте [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru).

По вопросам приобретения обращаться: **ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»**

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, [www.abook.ru](http://www.abook.ru)

Сайт издательства «СОЛОН-ПРЕСС»: [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru)

E-mail: [solon-avtor@coba.ru](mailto:solon-avtor@coba.ru)

**ISBN5-978-5-91359-013-8** © Макет и обложка «СОЛОН-ПРЕСС», 2011  
© Булгаков А. Г., Воробьев В. А., 2011

## Предисловие

Строительство представляет собой одну из важных областей применения промышленных роботов. Технологические особенности строительных процессов накладывают существенные ограничения на масштабы внедрения уже имеющихся роботов и манипуляторов и требуют значительной доработки существующих конструкций. Успешная роботизация строительства возможна лишь при адаптации промышленных роботов к условиям строительной площадки — с одной стороны, и при ее организации, изначально ориентированной на применение роботов для выполнения различных операций, с другой стороны, т. е. это улица с двусторонним движением. Попытки внедрения роботов в строительстве предпринимаются на протяжении около 20 лет в различных странах мира. Наиболее значительные достижения в этой области могут быть отмечены в Японии, где этой задаче присвоен ранг государственной и она уже в третий раз подряд вносится в пятилетний план развития отрасли. Конечной целью японского правительства является создание экспортного потенциала интеллектуальных строительных технологий, способного превысить объемы экспорта в электронной и автомобильной отраслях промышленности, доходы от которых из-за чрезвычайно высокой конкуренции постоянно снижаются. Интересно, что в США, пусть с существенной задержкой, также произошло осознание значимости этой проблемы на федеральном уровне. Правительство этой страны активно финансирует исследовательские и конструкторские разработки, выделяет крупные гранты для привлечения зарубежных специалистов для работы в перспективных проектах и стремится сохранить свои ведущие позиции в такой гигантской по объемам инвестиций отрасли, как строительство.

Ответ на вопрос, почему две страны с развитой рыночной экономикой, построенной, как известно, прежде всего, на бескомпромиссной и острой конкуренции частных фирм, вдруг вмешиваются в этот процесс и пытаются осуществить регулирующую роль, довольно прост. Практически, ни одному строительному концерну не под силу самостоятельно проводить длительные и дорогостоящие исследования и разработки, какими являются проекты по созданию строительных роботов. Долговременное отсутствие экономического эффекта, сложность всего комплекса мероприятий по

требуемой реорганизации строительства, необходимость значительных затрат на основные и быстро стареющие фонды, наличие дешевой рабочей силы — лишь некоторые из факторов, затрудняющих решение такой грандиозной задачи, как роботизация строительства. Однако, в силу того, что строительство, наряду с сельским хозяйством и военной отраслью, относится к основополагающим факторам жизнедеятельности людей и государств, работы в данном направлении будут вестись, углубляться и расширяться. Процесс автоматизации и роботизации может быть ускорен и проходить с меньшими финансовыми затратами при наличии системного подхода.

Достижения в области промышленной робототехники являются основой при роботизации строительства. Механический перенос существующих технических решений в совершенно иные условия по сравнению с машиностроением в подавляющем большинстве случаев невозможен. Поэтому необходимо заново решать задачи структурной организации роботов и робототехнических комплексов (РТК), искать оптимальные алгоритмы решения задач кинематики и динамики манипуляторов для целей строительства, осуществлять выбор информационно-измерительных систем и устройств, заниматься планированием траекторий движения роботов при выполнении различных операций, разрабатывать системы управления, функционирующие в условиях стохастической и недетерминированной среды.

Всем этим вопросам посвящена настоящая монография. Авторы надеются на заинтересованный отклик специалистов, фирм и организаций, а также преподавателей строительных вузов.

# **Глава 1. Особенности и эффективность роботизации в строительстве**

## **1.1. Технологические особенности строительных процессов и задачи их роботизации**

Роботизация строительного производства связана с целым рядом характерных особенностей. Объекты строительства отличаются большим разнообразием по назначению, объему, планировочным решениям, видам применяемых конструкций и материалов. В зависимости от конструктивных решений строятся монолитные, кирпичные, сборные и другие здания и сооружения. По строительно-технологическим признакам возводимые объекты могут быть однородными и неоднородными. Однородные объекты отличаются большей степенью унификации конструкций, имеют более стабильный технологический процесс, который характеризуется четко выраженными стадиями выполнения работ и наличием специализированных потоков. Отличительными особенностями неоднородных объектов являются индивидуальность конструктивных решений, использование разнохарактерных строительных конструкций, неравномерное распределение объемов работ, нестабильность строительной технологии и отсутствие четко выраженной стадии производства работ [7].

По сравнению с другими отраслями технологические процессы в строительстве характеризуются низкой производительностью, тяжелым, монотонным трудом, повышенной опасностью работ, загрязненностью рабочей зоны (табл. 1.1). Сложность строительного производства, разнообразие технологических операций и особые условия их выполнения обуславливают низкий уровень комплексной механизации и автоматизации строительных процессов. Рассмотренные особенности строительного производства наиболее четко проявляются в связи с необходимостью увеличе-

ния объема, повышения качества строительства и снижения его себестоимости. Это вызывает необходимость неотложного решения вопросов комплексной механизации и автоматизации строительных процессов, что позволит повысить технический уровень производства, поднять производительность труда, решить социально-экономические проблемы.

Важную роль в этом направлении призвана сыграть роботизация отдельных видов операций. На современной стадии развития робототехники могут быть автоматизированы многие виды строительных работ. Роботизация строительных операций позволяет устранить недостающие звенья в системе комплексной механизации и автоматизации строительного производства, по-новому взглянуть на особенности выполнения работ, выявить потенциальные возможности для значительного улучшения основных показателей, оказать стимулирующее влияние на совершенствование технологии. При этом необходимо подчеркнуть, что автоматизация многих сложных строительных операций, отличающихся повышенной трудоемкостью, возможна лишь благодаря использованию роботов. Масштаб строительной отрасли, ее зависимость от ручного труда создают явный экономический потенциал для автоматизации и роботизации строительных процессов.

*Таблица 1.1*

*Условия труда по различным видам строительных работ*

Вид работ	Условия труда									
	Опасные	Вредные	Физически тяжелые	Повышенной напряженности	Стесненные	Тяжелые грузы	Вибрация	Шум	Повышенная влажность	Большая загрязненность
Разработка грунтов				•	•		•	•		•
Бурение шпуров				•			•	•	•	
Сварные работы				•		•	•	•		
Кирпичная кладка			•		•				•	•
Укладка и уплотнение бетонной смеси			•		•		•	•	•	•
Установка арматуры				•	•					

Вид работ	Условия труда									
	Опасные	Вредные	Физически тяжелые	Повышенной напряженности	Стесненные	Тяжелые грузы	Вибрация	Шум	Повышенная влажность	Большая загрязненность
Монтаж и демонтаж опалубки, лесов			•		•					•
Монтаж панелей, колонн, металлоконструкций	•		•			•				
Штукатурные работы			•		•				•	•
Малярные работы		•		•	•			•	•	•
Облицовка плиткой				•	•				•	•
Оклеивания стен обоями					•				•	
Остекление витрин	•			•	•	•				
Устройство монолитных полов			•				•	•	•	•
Устройство кровель	•	•		•						•
Уборка помещений				•	•				•	•
Прокладка коммуникаций				•	•				•	•
Погрузочно-разгрузочные работы			•		•	•				

В мировой практике накоплен определенный опыт применения манипуляторов и роботов на строительных площадках при возведении различных объектов. В настоящее время исследования и разработки в области роботизации строительного производства выполняются во многих странах: Японии, США, Германии, Голландии, Франции, Англии, Польше и др. Положительную оценку российских и зарубежных строителей получили шарнирно-распределительные стрелы для подачи, распределения и укладки бетонной смеси. Рядом зарубежных фирм разработаны и внедрены в промышленное строительство многозвенные манипуляторы для горизонтального распределения, укладки и уплотнения бетонной смеси. Привлекает внимание строителей использование манипуляторов и роботов на погрузочно-разгрузочных операциях. Для этих целей созданы специализированные манипуляторы и роботы различной грузоподъемности.



Рядом зарубежных фирм получены обнадеживающие результаты по применению роботизированных средств на строительно-монтажных работах. Имеются предложения по использованию манипуляторов для выполнения монтажных операций: монтажа и демонтажа опалубок и инвентарных лесов, прокладки трубопроводов, установки внутренних перегородок зданий и др. Промышленные роботы начинают применяться для окрашивания строительных конструкций. Отечественные и зарубежные специалисты ведут разработку специализированных роботов с адаптивным управлением для нанесения малярных составов и лакокрасочных покрытий на вертикальные и горизонтальные поверхности. Интенсивно ведутся работы по роботизации штукатурных работ.

Однако для широкомасштабного внедрения средств робототехники на строительных площадках и создания на их основе комплексов строительного оборудования с автоматическим управлением требуется решение сложных инженерно-технических задач. Это связано с многообразием выполняемых операций, их повышенной сложностью, многофакторностью, частой сменяемостью, разнообразием условий окружающей среды. Способы и условия производства работ также подвержены частым изменениям, что существенно затрудняет их механизацию и роботизацию. Технология многих строительных операций и отдельных видов работ нуждается в усовершенствовании и изменении с целью получения при внедрении роботов и РТК высоких технико-экономических показателей. Особенности строительного производства ставят проблему комплексного подхода к решению вопросов автоматизации и роботизации рабочих операций. Эффективность внедрения в строительстве средств робототехники и автоматики прямо зависит от того, насколько рационально организован технологический процесс на строительной площадке, как комплексно и полно решаются вопросы технологии, механизации, роботизации и автоматизации. Проведенный авторами анализ строительных процессов позволил определить перспективные направления внедрения средств робототехники в строительстве (табл. 1.2).

Особое внимание необходимо уделять выбору технически и экономически целесообразных объектов роботизации, учитывая при этом как экономические, так и социальные факторы. В планы роботизации следует включать в первую очередь операции связанные с повышенной трудоемкостью, опасными и вредными услови-

ями, которые не могут быть механизированы и автоматизированы более простыми и дешевыми средствами.

Таблица 1.2

*Основные направления применения средств робототехники в строительном производстве*

Вид работ	Область применения робототехники	Объекты строительства			
		Ж	Г	П	И
Земляные	Бурение и закладка шпуров			•	•
	Разработка и закрепление грунтов	•		•	•
Свайные	Подача свай в сваебойное оборудование	•	•	•	•
	Обрезка свай	•	•	•	
Каменные	Подача и расстиление раствора	•	•		
	Укладка кирпича	•	•		
Монтажные	Установка оконных и дверных блоков	•	•	•	
	Монтаж колонн		•	•	•
	Монтаж стальных конструкций		•	•	•
	Установка панелей и перегородок	•		•	
	Герметизация и заделка стыков	•	•	•	
	Сварка конструкций при монтаже	•	•	•	•
	Крепление конструкций при монтаже		•	•	•
Бетонные	Очистка и окраска металлоконструкций		•	•	•
	Укладка бетонной смеси	•	•	•	•
	Уплотнение бетонной смеси	•			
	Установка и крепление арматурных элементов	•	•	•	•
	Монтаж и демонтаж щитов опалубки	•	•	•	•
	Очистка и смазка щитов опалубки	•	•	•	•
	Установка закладных деталей	•	•	•	•
Отделочные	Установка преобразователей	•	•	•	•
	Нанесение и разравнивание штукатурных составов	•	•	•	•
	Затирка поверхности	•	•	•	•

Вид работ	Область применения робототехники	Объекты строительства			
		Ж	Г	П	И
Отделочные	Подготовка поверхности под окраску	•	•	•	•
	Нанесение грунтовок, окрасочных составов	•	•	•	•
	Оклеивание стен обоями	•			
	Облицовка стен плиткой	•	•	•	•
	Облицовка стен декоративными плитами		•		
	Монтаж подвесных потолков		•	•	
	Покрытие полов плиткой		•	•	
	Остекление витрин		•	•	
	Уборка помещений	•	•	•	
Кровельные	Подготовка поверхности	•	•	•	
	Нанесение мастичных покрытий			•	
Специальные	Клейка рулонного ковра	•	•	•	
	Прокладка инженерных коммуникаций	•	•	•	•
	Монтаж технологического оборудования			•	•
	Разборка зданий и сооружений	•		•	
	Теплоизоляция трубопроводов	•		•	•
	Монтаж и демонтаж лесов	•	•		
Погрузочно-загрузочные	Заделка оконных и дверных блоков	•	•		
	Погрузка и разгрузка конвейеров и поддонов, строительных конструкций	•	•	•	•
Ремонтные	Транспортировка и подача конструкций в рабочую зону	•	•	•	•
	Окрашивание фасадов	•	•	•	•
	Очистка фасадов	•	•	•	•
	Ремонт и окрашивание швов между панелями	•		•	
	Очистка и окраска стальных конструкций			•	•
Испытательные и проверочные работы		•	•	•	

\* Ж — жилые; Г — гражданские; П — промышленные;  
И — инженерно-технические

## 1.2. Требования к роботизации строительных процессов

Роботизация технологических процессов на строительных площадках и предприятиях стройиндустрии проводится с учетом большого числа разнообразных требований: технологических, конструктивных, эргономических, эксплуатационных, социальных и экономических. Эти требования учитывают целенаправленное назначение средств робототехники, условия их эксплуатации, особенности технологии и организации производства, перспективы его развития, опыт роботизации в других отраслях народного хозяйства, а также нормативы и рекомендации нормативно-технической документации и техники безопасности.

Эффективность роботизации в первую очередь определяется, насколько полно учтены технологические требования, которые формируются на основании анализа технологии выполнения отдельных операций и роли в ней средств робототехники. В ходе анализа устанавливаются следующие основные показатели технологического процесса: состав и временные параметры производственных операций; состав и расположение оборудования в зоне обслуживания; его конструктивно-технологические характеристики; порядок взаимодействия оборудования и средств роботизации; предполагаемое расположение роботизируемых позиций; технические показатели объектов манипулирования. Эта информация позволяет сформулировать объективные требования к содержанию манипуляционных действий, параметрам зоны обслуживания, статическим и динамическим нагрузкам на рабочие органы манипуляторов, быстродействию и точности позиционирования, особенностям взаимодействия рабочего органа с объектом роботизации. Технологические требования служат основанием для определения целого ряда технических характеристик манипуляторов и роботов: числа степеней подвижности; структурных и кинематических схем; степени универсальности; грузоподъемности; усилий захвата, скорости перемещения объекта манипулирования, погрешности позиционирования.

Необходимым условием создания РТК является автоматизация сопрягаемого с роботами технологического оборудования и вспомогательных операций. Поэтому в состав технологических требований для РТК следует включать пункты по модернизации и переводу оборудования на автоматическое управление, а также условия

его переналадки в процессе функционирования комплекса. Важную роль в составе роботизированных комплексов, линий и участков играют транспортно-накопительные системы. Они обеспечивают накопление, хранение, ориентацию, выдачу и транспортировку конструкций, изделий и материалов как внутри РТК, так и между ним и окружающей техносредой. Это требует при выборе и разработке транспортно-накопительных систем обязательно учитывать способ хранения и выдачи конструкций, изделий и материалов, особенности их ориентации и комплектации на начальной позиции РТК, вместимость накопителей, транспортные связи. Требования к вспомогательному оборудованию, включаемому в состав комплексов, определяются конструкцией комплекса, типом, формой, материалом и размерами деталей, изделий и конструкций, составом технологического оборудования. Технологическая оснастка РТК выбирается с учетом необходимого взаимодействия с объектом роботизации, требуемой точности базирования объекта манипулирования и необходимой надежности.

Важную роль при роботизации производственных процессов играют конструктивные требования, которые устанавливают совокупность условий, нормативов и рекомендаций для номенклатуры основных параметров, компоновочных и конструктивных решений показателей надежности и долговечности. Эти требования позволяют обеспечить соответствие средств роботизации современному уровню развития робототехники и технологии строительного производства, их унификацию и стандартизацию, удобство технического обслуживания, необходимую степень устойчивости и подвижности оборудования, взаимозаменяемость составных частей, узлов и блоков.

В соответствии с конструктивными требованиями при роботизации строительного производства необходимо максимально использовать стандартные и разработанные ранее компоновочные, кинематические и структурные решения, а также агрегатно-модульный принцип построения с учетом особенностей строительных площадок. Разработку и проектирование средств робототехники следует выполнять в соответствии с действующими государственными и отраслевыми стандартами, строительными нормами и правилами, а также с учетом технических условий на конкретные модели манипуляторов и роботов. Значения параметров должны выбираться исходя из технологических требований и типоразмерных рядов, установленных стандартами. Грузоподъемность средств

роботизации должна не менее чем на 10% превышать предельную массу объекта манипулирования с технологической оснасткой и учитывать действия ветровой нагрузки. Окончательное значение грузоподъемности выбирается из типоразмерного ряда, задаваемого ГОСТ 25204-82, а основные показатели линейных и угловых перемещений и абсолютной погрешности позиционирования должны отвечать ГОСТ 26050-89. Скорость перемещения рабочего органа определяется технологическими параметрами или производительностью работы технологического оборудования. Основные параметры составных частей строительных манипуляторов и роботов должны удовлетворять требованиям стандартов, перечисленных в табл. 1.3. Конструкция манипуляторов, роботов и РТК должна обеспечивать удобство монтажа агрегатов и узлов, доступ к местам крепления, контроль регулировки и смазки, а также ремонтпригодность. Узлы и элементы должны заменяться без регулировки других функциональных частей.

Таблица 1.3

*Перечень стандартов, регламентирующих требования к составным частям манипуляторов и роботов*

Стандарт	Устанавливаемые параметры
ГОСТ 25204-82 ГОСТ 26050-89 ГОСТ 26063-84 ГОСТ 27122-86 ГОСТ 26055-84 ГОСТ 24505-80	Номинальная грузоподъемность Максимальные угловые и линейные перемещения, абсолютная погрешность позиционирования Присоединительные размеры захватных устройств Основные параметры электромеханических модулей Требования к строительно-монтажным манипуляторам Символы на пультах управления

Робототехнические устройства, внедряемые в строительное производство, должны иметь не только необходимые технические показатели, но и удовлетворять основным эргономическим требованиям, которые обеспечивают целесообразное распределение функций и удобство взаимодействия человека-оператора и системы управления, а также безопасность условий труда. Эргономические требования формируются на основе системного подхода. Эти требования наряду с техническими и технологическими требованиями определяют выбор пульта управления, место его расположения, состав и форму органов контроля, управления и сигнализации. Требования эргономики составляют в соответствии с

ГОСТ 22269-76. Символы, наносимые на пульта управления и шкафы автоматизации, и другое оборудование, должны быть едиными для строительной отрасли. Больше внимания при создании средств строительной робототехники следует уделять их дизайну, а также обеспечению нормальных условий освещенности и обзора оператора при работе оборудования.

Особое значение в строительной робототехнике отводится удовлетворению эксплуатационных требований, которые учитывают условия работы оборудования, удобство его монтажа, наладки, ремонта и транспортировки, требования техники безопасности. Сложные условия строительной площадки, возможность наличия в зоне расположения манипуляторов и роботов пыли, высокой влажности, брызг растворов, аэрозольных частиц малярных составов, выдвигают повышенные требования к воздействию внешней среды. Они должны отвечать требуемым условиям запыленности, влажности, виброустойчивости, температурного диапазона. При этом должна предусматриваться пылезащита шарнирных соединений и подвижных штоков исполнительных органов манипулятора, местная герметизация отдельных блоков, узлов и элементов. Особое внимание необходимо уделять защите от воздействия окружающей среды систем управления. Выполнение требований, продиктованных внешней средой, создает условия повышенной надежности работы строительных манипуляторов и роботов. С учетом внешней среды выбирают конструкционные материалы, покрытия, смазки, электронное и другое оборудование. Конструкция окрасочных роботов должна обеспечивать надежную работу в условиях мелкодисперсной аэрозольной среды, образованной при распылении лакокрасочных и малярных составов. При работе с лакокрасочными материалами робот должен иметь искробезопасное исполнение.

Температурный диапазон работы роботов и манипуляторов, предназначенных для использования на строительных площадках, выбирается в соответствии со строительными нормами и правилами на производство определенного вида работ. Робототехнические устройства обыкновенного исполнения могут работать в условиях вибрации с амплитудой не более 0,1 мм и частотой до 25 Гц. При повышенных уровнях вибрации они должны изготавливаться в виброустойчивом исполнении.

Учитывая условия работы манипуляторов, роботов и РТК в строительстве, в оценку их надежности включаются такие показа-

тели, как безотказная наработка, срок службы до первого капитального ремонта, средний срок службы до списания, средняя оперативная трудоемкость выполнения капитального ремонта. Требования на показатели надежности устанавливаются в соответствии с ГОСТ 27.003-90, а также строительными нормами. К робототехническим устройствам предъявляются жесткие требования по безопасности обслуживания, которые подлежат обязательному выполнению в процессе проектирования, монтажа и эксплуатации оборудования. По условиям безопасности конструкция манипуляторов и роботов выполняется с учетом удобства управления, необходимой степени защиты обслуживающего персонала от различного рода травм, свободного доступа к механизмам и блокам при наладочных, профилактических и ремонтных работах. При этом особое внимание необходимо обращать на обеспечение свободного и быстрого доступа к органам аварийного отключения. Пульты управления следует размещать вне рабочей зоны оборудования, в месте, обеспечивающем хорошее наблюдение за действиями исполнительных органов. Для исключения присутствия человека в рабочей зоне манипулятора в стационарных условиях обязательно предусматривается установка ограждения, а в условиях строительных площадок следует применять фотоэлектрические или сенсорные датчики контроля. Появление человека в рабочей зоне должно вызывать блокировку работы манипулятора, снятие которой может быть выполнено только оператором. Средства робототехники, размещаемые на строительных площадках, должны снабжаться устройствами защиты, исключающими их использование посторонними лицами.

Для передвижных манипуляторов и роботов предусматривается необходимый запас устойчивости при работе с номинальными грузами, поднятыми на предельную высоту на любом радиусе действия. При этом у роботов, предназначенных для работы на открытом воздухе, устойчивость должна сохраняться при скоростном напоре ветра, допустимые значения которого определяются СНиП III-4-80.

Все работы по роботизации строительного производства выполняются с учетом социальных и экономических требований. Социальные требования направлены на улучшения условий труда рабочих. В связи с этим при решении вопросов роботизации важное значение отводится реализации таких требований, как исключение участия людей из тяжелых, монотонных, вредных и напря-



женных технологических операций, вывод их из опасных зон, сокращение рабочих на отдельных видах работ и общей их численности. Достичь минимальной стоимости производства работ возможно только при соблюдении основных экономических требований. При роботизации производственных процессов выбираются такие технические решения, которые обеспечивают при определенном соотношении производительности оборудования, его стоимости, затрат на эксплуатацию и прочих капиталовложениях наименьшую стоимость производства работ. На опасных и вредных видах работ предпочтение может быть отдано роботизации даже при некотором повышении стоимости продукции в виду улучшения социальных факторов.

### **1.3. Структурная организация роботов и РТК для автоматизации строительных процессов**

Промышленным и строительным роботам свойственно активное и целенаправленное взаимодействие с внешней средой. Это достигается за счет структурной организации робота, определяемой назначением, характером технологических операций, видом движений, требованиями к грузоподъемности и точности позиционирования [15]. Промышленный робот для строительного производства в общем случае можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 1.1. Основными составляющими робота являются исполнительное устройство, устройство управления и датчики состояния.

Основу любого робота составляет исполнительное устройство, которое обеспечивает выполнение всех его двигательных функций и взаимодействие с объектами роботизации на базе управляющих воздействий, формируемых устройством управления. Для большинства строительных роботов исполнительное устройство, кроме манипулятора с рабочим органом, включает механизм передвижения. Манипуляторы перемещают рабочие органы в соответствии с заданными законами движения, определяемыми технологическими требованиями. Манипуляторы строительных роботов представляют многозвенные механизмы, состоящие из ряда кинематических пар с поступательным или вращательным движением, и отличаются значительными зонами обслуживания, большими

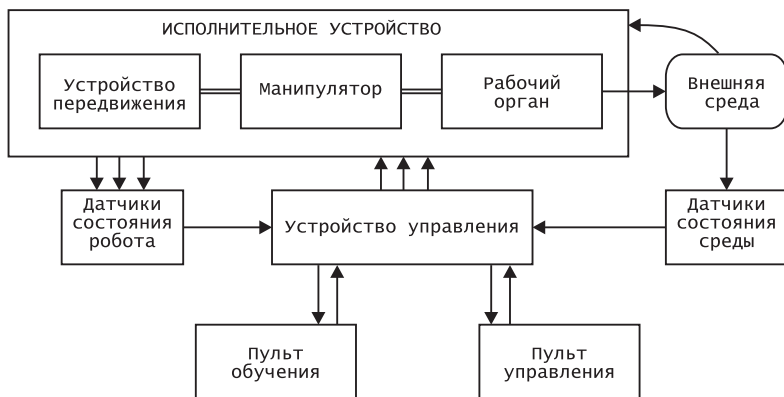


Рис. 1.1. Структурная схема промышленного робота

длинами звеньев. Для приведения в действия звеньев манипулятора этих роботов в основном используются гидравлические и электромеханические приводы. В отдельных видах отделочных роботов возможно использование пневматических приводов. В качестве основных характеристик манипуляторов в первую очередь следует рассматривать число степеней подвижности, грузоподъемность, зону обслуживания и его динамические свойства. Манипуляторы для строительного производства в большинстве случаев должны обеспечивать поступательные движения рабочих органов по трем координатам и их поворот вокруг одной, двух или трех осей, вращательные движения относительно одной оси с одновременным поступательным перемещением относительно двух других или два вращательных и одно поступательное в радиальном направлении. Манипуляторы снабжаются рабочим органом, который непосредственно взаимодействует с объектом роботизации или выполнения различных технологических операций. В строительных роботах в качестве рабочего органа могут быть специализированные захватные устройства либо специальный рабочий инструмент.

Захватные устройства строительно-монтажных роботов, кроме обычных функций взятия и удержания в определенном положении объектов манипулирования, могут выполнять ориентацию объекта в одной или нескольких плоскостях. Принцип действия и конструкция захватных устройств строительных роботов весьма разнообразны. Они определяются формой, размерами и весом строительных конструкций и деталей, используемыми материалами, конструктивными особенностями. В зависимости от выбран-

ного способа захвата и удержания объектов могут быть использованы механические, электромагнитные, вакуумные или комбинированные захватные устройства. Захватные устройства строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных роботов могут снабжаться дополнительными приводами, осуществляющими самостоятельные поступательные и вращательные движения. При выполнении целого ряда строительных операций целесообразно использовать очувствленные захватные устройства, снабженные специальными датчиками, дающими информацию о взятии и установке предмета, усилия сжатия, скорости перемещения, положении охвата относительно объекта манипулирования и др. В строительных роботах используются как универсальные, так и специальные захватные устройства. Во многих специализированных строительных роботах рабочим органом служит технологический инструмент: сварочные клещи, краскопульты, затирочный, шлифовальный или сборочный инструмент.

Устройство передвижения мобильных строительных роботов отличаются принципом действия и могут иметь самую разнообразную конструкцию. В строительных роботах наряду с традиционными движителями: колесными и гусеничными, перспективно использование движителей на воздушной подушке, шагового типа, многозвенных гусеничных и др. При создании передвижных строительных роботов обязательно предусматриваются устройства фиксации его положения, которые позволяют сохранять неизменными его положение при воздействии на рабочий орган возмущающих усилий. Представляет интерес создание устройств передвижения, обеспечивающих перемещение робота по лестничным переходам с этажа на этаж. При комплексной механизации и автоматизации промышленного строительства для роботизации технологических операций возможно использование монорельсовых и мостовых устройств передвижения. Особый интерес для промышленного строительства вызывает применение в качестве устройства передвижения платформы на воздушной подушке. Важное значение для строительных роботов имеет компоновка исполнительного устройства. При размещении манипуляторов на устройстве передвижения обязательно учитываются особенности технологии выполнения работ, ограниченность пространства на строительных объектах, необходимость перемещения через узкие дверные проемы и ряд других факторов.

Устройство управления строительных роботов обеспечивает формирование и выдачу в соответствии с управляющей программой управляющих воздействий манипулятору, устройству передвижения, технологическому инструменту. Оно обеспечивает логическую последовательность действий робота и обслуживаемого им оборудования. Кроме того, учитывая условия работы роботов в строительстве, их системы управления должны обеспечить управление работой всего комплекса сопрягаемого оборудования. Устройства управления отличаются способом управления, степенью участия в управлении оператора. Уровень сложности управляющих устройств определяется режимом работы роботов и задачами управления. В зависимости от выполняемых операций и уровня их автоматизации, в строительстве необходимы устройства управления, обеспечивающие дистанционный, интерактивный или программный режим работы роботов. Для строительного-монтажных и отделочных роботов перспективным является использование адаптивного и интеллектуального управления. Устройства управления целесообразно реализовывать на основе промышленных модульных компьютеров, многофункциональных плат обработки сигналов и модулей для распределенных систем сбора данных и управления. Последние позволяют передавать управляющие сигналы на исполнительные устройства технологического оборудования и контролировать его состояние. Управление роботом осуществляется на основании управляющей программы, подготовку которых лучше выполнять в лабораторных условиях с использованием кросс-систем.

Устройства управления строительных роботов должны иметь пульта управления, программирования и обучения. Пульты управления обеспечивают ввод в управляющее устройство заданий в виде программы или отдельных команд, дистанционное и ручное управление манипулятором, рабочим органом и устройством передвижения, а также контроль правильности выполнения задания. Общение оператора с устройством управления выполняется с помощью элементарных команд с пульта управления либо с помощью специального языка. Для подготовки управляющих программ роботов удобно использовать специальные пульты обучения, которые значительно упрощают процесс программирования.

Измерительные устройства строительных роботов, кроме сбора, преобразования и первичной обработки информации о параметрах состояния робота, должны обеспечивать управляющее устройство

информацией о состоянии окружающей среды. В состав датчиков внутренней информации входят преобразователи, измеряющие положение и скорости перемещения звеньев манипулятора, состояние рабочего органа и объекта манипулирования, статические и динамические нагрузки, а также состояние технологического оборудования. Для сбора внешней информации следует использовать различного рода сенсорные устройства: осязательные (тактильные), световые, локационные, силоизмерительные, визуальные и др. Для строительно-монтажных работ представляют интерес системы технического зрения.

Специализированные строительные роботы, в зависимости от своего назначения, могут иметь структурную организацию отличную от рассмотренной. В них могут включаться различного рода дополнительные устройства. Строительные роботы наряду с основным манипулятором могут иметь один или несколько вспомогательных манипуляторов или иметь два и более синхронно работающих манипулятора, выполняющих операции с одним и тем же объектом манипулирования. Для выполнения отделочных работ строительные роботы могут содержать несколько манипуляторов с различными рабочими органами, работающих по общей программе или независимым программам управления. Кроме того, специализированные строительные роботы для монтажных и отделочных работ должны снабжаться набором сменного рабочего инструмента и технологической оснастки.

Требования к стандартизации и унификации ставят задачу построения роботов и манипуляторов на агрегатно-модульной основе [10]. Такой принцип построения средств робототехники заключается в использовании унифицированных деталей, узлов, агрегатов и модулей. Различают агрегатные, агрегатно-модульные и модульные конструкции манипуляторов и роботов. В агрегатном роботе исполнительное устройство изготавливается путем сборки из деталей, узлов и агрегатов, входящих в унифицированный набор для построения определенных модификаций роботов. Агрегатно-модульные манипуляторы и роботы в отличие от агрегатных реализуются на базе исполнительных модулей, которые представляют собой агрегаты, входящие в унифицированный набор или образуемые из деталей и узлов этого набора и способные самостоятельно выполнять функцию реализации движений по одной или нескольким степеням подвижности. Модульный принцип построения подразумевает создание роботов из функциональных моду-

лей, имеющих все необходимые элементы, включая приводы и датчики. Это направление представляет определенный интерес при разработке строительных роботов, однако его реализация связана с разработкой специального типового ряда модулей с учетом требований строительства.

## **1.4. Эффективность роботизации в строительстве**

Целесообразность роботизации технологических процессов в строительстве обуславливается определенными экономическими и социальными эффектами, получаемыми при ее внедрении. Технические, технологические, организационные и социальные преимущества применения роботов и РТК, должны в конечном итоге материализоваться в реальное повышение производительности труда, увеличение объема производства, снижение себестоимости выполняемых работ и повышение рентабельности. Главным аргументом внедрения средств робототехники служит существенное улучшение экономических показателей при производстве работ. В связи с этим при определении целесообразности роботизации технологических операций и процессов анализируют основные источники экономической эффективности и все статьи расходов, связанных с роботизацией.

Экономический эффект от внедрения роботов и роботизированных комплексов на строительных площадках в первую очередь достигается за счет снижения трудоемкости, сокращения времени выполнения операций, улучшения качества производства работ, экономии материалов. Повышение производительности труда связано как с сокращением численности рабочих, так и с увеличением объема производства. В условиях роботизации сокращаются непроизводительные потери рабочего времени, увеличивается ритмичность работ и коэффициент использования оборудования. Росту производительности труда также способствует повышение качества производства работ. Сокращение численности рабочих дает реальный экономический эффект за счет экономии заработной платы и снижения расходов на социальную защиту работников. Повышение производительности труда, увеличение объема производства работ, уменьшение численности рабочих приводит к выполнению строительных работ. Кроме того, снижению себестоимости

мости работ способствует сокращение доли накладных и непроизводственных расходов [15, 64].

Внедрение роботов и манипуляторов в строительстве имеет социальный эффект, заключающийся в изменении характера труда, снижении доли тяжелого, монотонного и вредного труда, повышении уровня безопасности, сокращении травматизма и профессиональных заболеваний, повышении уровня квалификации и технической культуры работников. Все перечисленное позволяет получить реальный экономический эффект за счет сокращения внутрисменных потерь, вследствие утомляемости рабочих, потерь, связанных с текучестью кадров и с временной нетрудоспособностью, сокращения затрат на социальное обеспечение, а также уменьшения доплат и льгот в связи с улучшением условий труда и уменьшением численности рабочих.

Однако роботизация технологических операций и процессов наряду с улучшением целого ряда производственных показателей требует значительных капитальных затрат на ее реализацию. При расчете экономического эффекта необходимо учитывать все расходы, связанные с техническими и организационными мероприятиями. К ним относятся затраты на проведение научно-исследовательских и проектных работ, технологическую подготовку, модернизацию основного технологического оборудования, создание специального и специализированного оборудования, технологической оснастки и инструмента, средств контроля и диагностирования. Внедрение роботизации также связано с дополнительными капитальными вложениями на приобретение нового оборудования и оснастки. При внедрении роботов и РТК в состав капвложений включаются расходы на подготовку комплектов программ управления.

Годовой экономический эффект от внедрения средств робототехники определяется путем сопоставления приведенных затрат потребителя по базовому варианту и при использовании новой техники:

$$\mathcal{E}_c = (Z_1 - Z_2) = (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2),$$

где  $Z_1, Z_2$  и  $C_1, C_2$  — приведенные затраты потребителя и себестоимости работ по базовому варианту и при использовании новой техники, рассчитанные в строительстве на годовой объем работ;  $K_1, K_2$  — капитальные вложения потребителя по базовому варианту и при использовании новой техники;  $E_n$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ( $E_n = 0,15$ ).

Себестоимость годового объема производства работ представляет собой сумму годовых текущих затрат  $I_i$  и амортизационных отчислений  $I_a$ :

$$C = \sum I_i + I_a.$$

Годовые эксплуатационные издержки потребителя равны сумме изменяющихся прямых затрат и расходов на содержание и эксплуатацию оборудования. В их состав включаются годовая заработная плата со всеми начислениями  $I_з$ , годовые затраты на материалы и различные виды энергии  $I_м$ , на ремонт и техническое обслуживание оборудования  $I_р$ , годовые затраты на ремонт технологической оснастки и инструмента  $I_о$ , годовые затраты на подготовку программ управления  $I_{пу}$ :

$$\sum I_i = I_з + I_м + I_р + I_о + I_{пу}.$$

Для средств робототехники, используемой на строительных площадках, в состав эксплуатационных издержек включаются также затраты, связанные с перебазировкой оборудования с одного объекта на другой и подготовкой на новом месте.

Повышение качества производства работ отражается на прибыли предприятия за счет сокращения затрат на последующих строительных операциях. Этот фактор учитывается при расчете годового экономического эффекта путем введения в расчетную формулу показателей прибыли

$$\mathcal{E}_c = (C_1 - C_2) = (P_1 - P_2) - E_n (K_1 - K_2),$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  — прибыль от сокращения затрат на последующих строительных операциях.

Годовые амортизационные отчисления включают отчисления на полное восстановление оборудования и на его капитальный ремонт. Отчисления на восстановление оборудования определяют в процентах от балансовой стоимости, а на капремонт — в зависимости от ремонтной сложности оборудования и установленных нормативов. Капитальные вложения составляют сумму единовременных затрат потребителя, включаемых в основные и оборотные фонды. В их состав входят балансовая стоимость оборудования  $K_б$ , стоимость научно-исследовательских и проектных работ  $K_{пр}$ , стоимость работ по привязке оборудования  $K_{тех}$ , затраты на установку и доставку оборудования  $K_м$ , оборотные средства в незавершенном производстве  $K_{нез}$ , стоимость специальной технологической



оснастки и инструмента  $K_{\text{то}}$ , стоимость комплекта программ управления  $K_{\text{пу}}$ :

$$K = K_{\text{б}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{тех}} + K_{\text{м}} + K_{\text{нез}} + K_{\text{пу}}.$$

В каждом конкретном случае состав единовременных расходов может изменяться в соответствии с реальными затратами потребителя.

Если в процессе роботизации происходит высвобождение части действующих фондов, которые не могут быть использованы или проданы в дальнейшем и подлежат списанию, в этом случае неамортизированная часть их стоимости должна добавляться к дополнительным капиталовложениям

$$\mathcal{E}_c = (C_1 - C_2) - E_n (K_y - K_d),$$

где  $K_y$  — неамортизированная часть стоимости списанных фондов.

Внедрение роботов и РТК во многих случаях ведет к увеличению объема выполненных работ. В этом случае расчет выполняют с учетом роста объема работ и годовой эффект выражается формулой

$$\mathcal{E}_c = (C_1 - E_n K_d) B_1 / B_2 - (C_2 - E_m K_2),$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  — соответственно годовые объемы работ по базовому варианту и при применении средств робототехники.

Оценку экономической эффективности внедрения манипуляторов, роботов и РТК необходимо выполнять на двух этапах: при оценке целесообразности внедрения и после внедрения для определения фактического эффекта. Решение о целесообразности роботизации тех или иных операций принимается на основании сравнения показателей экономической эффективности нескольких вариантов: роботизированный комплекс, современное типовое технологическое оборудование, заменяемое оборудование. Для строительного производства важное значение имеет оценка экономической целесообразности создания и внедрения специальных и специализированных роботов и РТК для выполнения различного вида строительных работ. В этом случае экономическая эффективность оценивается на нескольких стадиях: при разработке технико-экономического обоснования (ТЭО), технического задания (ТЗ), технического проекта (ТП), при приемке опытного образца и постановке созданного оборудования на производство. При этом расчеты на стадиях разработки ТЭО и ТЗ являются предварительными, на всех последующих стадиях уточняющими. В качестве ба-

зовых вариантов для экономических расчетов вновь создаваемых роботов и РТК принимают передовое специализированное технологическое оборудование, используемое для выполнения аналогичных видов строительных работ, а в случае его отсутствия — передовые технологические приемы, осуществляемые с помощью ручных машин и инструмента. Для строительных роботов и РТК, предназначенных для выполнения группы отделочных, вспомогательных, монтажных и других операций, экономический эффект рассчитывают с учетом всех видов работ и их объемов.

Целесообразность создания специализированных роботов и РТК для определенного вида работ принимается на основе расчета экономического эффекта для одного комплекта оборудования и эффекта от производства и использования годового выпуска в расчетном году:  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{ед}} N$ , где  $\mathcal{E}_{\text{ед}}$  — экономический эффект от использования одного комплекта оборудования;  $N$  — число выпускаемых в год комплектов оборудования. За расчетный год принимается второй, а для сложных РТК — третий год после включения нового оборудования в план мелкосерийного и серийного выпусков. Экономический эффект на один комплект оборудования определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ед}} = \frac{(I_1 - I_2) - E_n(K_2 - K_1)}{(P_{\text{ам}} + E_n)} + C_1 \frac{B_1(1/T_1 + E_n)}{B_2(1/T_2 + E_n)} - C_2,$$

где  $I_1, I_2$  — годовые эксплуатационные издержки потребителя (без учета отчислений на реновацию);  $K_1, K_2$  — сопутствующие капитальные вложения (без стоимости оборудования);  $C_1, C_2$  — стоимость оборудования;  $T_1, T_2$  — срок службы оборудования;  $B_1, B_2$  — годовой объем работ или продукции в натуральных единицах;  $P_{\text{ам}}$  — коэффициент отчислений на амортизацию при использовании нового оборудования. При этом индексы 1 и 2 относятся соответственно для базового и нового оборудования, а расчеты  $I_1, I_2, K_1$ , и  $K_2$  ведутся для годового объема работ, производимого с помощью новой техники.

# **Глава 2. Манипуляционные системы строительных роботов**

## **2.1. Принципы построения кинематических схем строительных роботов**

Строительное производство характеризуется множеством технологических операций, роботизация которых требует использования специализированных роботов, отличающихся разнообразием кинематических схем. Кроме того, роботизация строительных операций связана с низким уровнем организации рабочей среды в рабочей зоне. Поэтому кинематические схемы манипуляторов строительных роботов отличаются большим разнообразием, что связано с различными областями их применения и функциональными задачами (рис. 2.1) [45]. Число, вид, и взаимное расположение степеней подвижности строительных роботов определяется особенностями выполняемой технологической операции, требуемой зоной обслуживания и необходимой ориентирующей способностью.

Выбор кинематической схемы определяет двигательные возможности робота, при этом разнообразие движений зависит не только от числа степеней подвижности, но и от взаимного их расположения. Построение кинематической схемы манипулятора строительного робота выполняется исходя из заданных технологических требований, условий его работы при соблюдении наибольшей простоты конструкции, удобства обслуживания и минимальных затрат на эксплуатацию. Важным фактором при этом является вид рабочей зоны, которая определяется кинематической структурой и зависит от числа кинематических пар и взаимного их расположения. Основными задачами построения кинематических схем строительных роботов являются:

- формулирование требований к манипуляционной системе;
- выбор рабочей системы координат;
- выбор критериев оценки функциональных возможностей и качества структуры;
- выбор метода построения кинематической схемы;
- предварительный выбор структуры;
- выполнение структурного и кинематического анализа схемы;

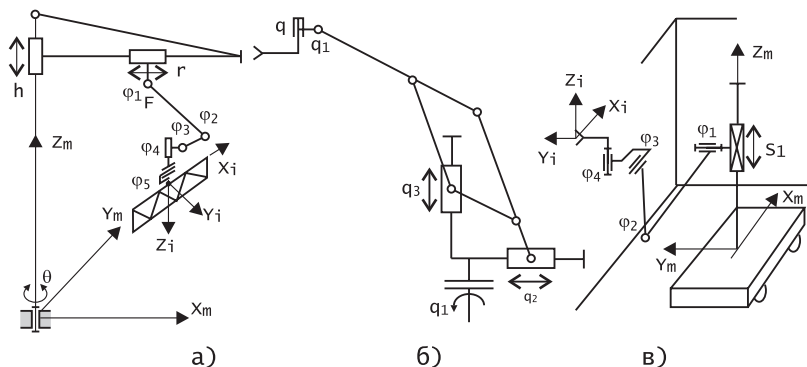


Рис. 2.1. Примеры кинематических схем строительных роботов  
 а — строительно-монтажного; б — для торкретбетонирования;  
 в — окрасочного

— синтез параметров кинематической схемы и оптимизация ее структуры.

Построение манипуляционных систем строительных роботов следует начинать с тщательного анализа роботизируемого строительного процесса, оценки необходимой зоны обслуживания и определения требуемых видов движений робота, разделив их на глобальные, региональные, локальные. Региональные и локальные движения обеспечивают перемещение захватного устройства и его ориентацию в зоне обслуживания, а глобальные движения позволяют расширить зону обслуживания робота и позволяют перемещать его в рабочем пространстве. Анализ этих типов движений и их характеристик дает возможность разделить задачу построения кинематических схем строительных роботов на составляющие, обеспечивающие передвижение робота, перемещение схвата и его ориентацию.

Построение кинематических схем выполняется на основе сформулированных функциональных, конструктивных и эксплуатационных требований. Из функциональных требований в первую очередь учитываются те, которые определяют формы, размеры и расположение рабочей зоны, возможные технологические усилия на рабочих органах, необходимые диапазоны изменения скоростей и ускорений рабочих органов. Для строительно-монтажных роботов следует дополнительно учитывать особенности форм, размеров и массы монтируемых конструкций. Из конструктивных требований при разработке кинематических схем следует использовать ха-

характеристики определяющие форму и размеры рабочего пространства, в котором должен функционировать робот, допустимую величину податливости, допустимые статические и динамические погрешности. Из эксплуатационных требований следует учитывать показатели надежности и компактности манипуляционной системы в рабочем и транспортном положении.

Выбор структуры кинематической схемы обусловливается принадлежностью манипулятора к конкретной системе координат: прямоугольной, цилиндрической, сферической или ангулярной, определяемой переносными степенями подвижности. Для количественной оценки функциональных возможностей и качества манипуляционной системы и ее кинематической структуры следует использовать специальные критерии и характеристики. На стадии выбора и разработки кинематических схем строительных роботов следует использовать такие структурные характеристики, как порядок структуры, сложность структуры, структурная значимость кинематической пары, информационный критерий структуры. Порядок структуры определяется числом кинематических пар манипулятора. Манипулятор  $n$ -го порядка состоит из конечного множества  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  кинематических пар. Взаимные соединения в кинематических парах характеризуется связью  $c_{ij}$ . Кинематическая цепь манипулятора может содержать кинематические пары одного или различных видов. В связи с этим, важной является характеристика, оценивающая однородность структуры. Эта характеристика определяет маневренность манипуляционной системы. Маневренность однородной кинематической цепи постоянна, а манипулятора с неоднородной цепью может быть изменена в зависимости от взаимного расположения кинематических пар. Однородность структуры манипулятора строительного робота можно оценивать коэффициентом однородности, определяемым отношением числа вращательных кинематических пар к их общему числу.

Сложность структуры манипулятора обычно оценивается интуитивно, что не всегда объективно. В [21] предложен критерий для количественной оценки сложности структуры. Сложность структуры строительного манипулятора с разомкнутой структурой достаточно эффективно можно оценивать отношением:

$$\xi(P) = \frac{1}{3} \left( \sum_{i=1}^P p_i + \sum_{j=1}^n n_j + \omega \right), \quad (2.1)$$

где  $\sum_{i=1}^P p_i$  — число кинематических пар в кинематической цепи;

$\sum_{j=1}^n n_j$  — число подвижных звеньев;  $w$  — число степеней свободы.

Структурная сложность манипулятора представленного на рис. 2.3 равна

$$\xi(P) = \frac{1}{3} \left( \sum_{i=1}^P p_i + \sum_{j=1}^n n_j + w \right) = \frac{1}{3} (7 + 7 + 7) = 7$$

При построении структуры манипулятора необходимо учитывать, что перемещение рабочего органа между точками осуществляется переносными степенями подвижности, а ориентирующие степени подвижности незначительно влияют на форму и размеры рабочей зоны робота.

Структурная значимость кинематической пары  $p_i$  оценивается рангом  $G(p_i)$ , который характеризует структурную и функциональную значимость пары в кинематической цепи манипулятора. Для нахождения рангов пар необходимо записать комплексные матрицы смежности  $C_k$ , диагональные элементы  $c_{ii}$  которых являются степенями свободы кинематических пар  $\omega(p_i)$ , а недиагональные  $c_{ij}$  отображают локальные степени пар  $v(p_i)$ :

$$C = \begin{bmatrix} \omega(p_1) & v(c_{12}) & \dots & v(c_{1n}) \\ v(c_{21}) & \omega(p_2) & \dots & v(c_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v(c_{n1}) & v(c_{n2}) & \dots & \omega(p_n) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ранг кинематической пары  $G(p_i)$  определяется как сумма членов соответствующей строки:

$$G(p_i) = \sum_{i=1}^n c_i \rightarrow j = \text{const.}$$

Функциональные возможности строительного робота определяются показателями маневренности и коэффициентом сервиса.

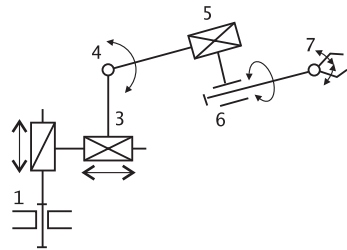


Рис. 2.2. Кинематическая схема манипулятора

Маневренность оценивается числом степеней подвижности манипулятора при фиксированном положении рабочего органа. Она определяет возможность обхода препятствия в рабочей зоне и способность манипулятора к выполнению сложных строительных операций. Важное значение для строительно-монтажных, отделочных и землеройных роботов имеет оценка возможности подхода рабочего органа к заданной точке с различных направлений, которая характеризуется коэффициентом сервиса, определяемым пространственным углом обслуживания (углом сервиса)  $\theta$ :  $\xi = \theta/4\pi$ . Телесный угол  $\theta$  определяет совокупность возможных положений оси рабочего органа, при которых его центр находится в заданной точке. Для сравнительной оценки функциональных возможностей строительных роботов удобно использовать коэффициенты линейного, углового, пространственного и объемного сервиса:

$$\xi_l = \frac{l_i}{L}; \xi_y = \frac{\alpha}{2\pi}; \xi_n = \frac{s_i}{S}; \xi_o = \frac{v_i}{V}, \quad (2.3)$$

где  $l_i$ ,  $\alpha$ ,  $s_i$ ,  $v_i$  — величины линейного, углового, пространственного и объемного сервиса;  $L$  — величина линейного перемещения в базовой системе координат;  $S$ ,  $V$  — площадь и объем, описываемый схватом в базовой системе координат.

Анализ и синтез кинематических схем манипуляторов строительных роботов не возможен без использования компьютерных методов, применение которых требует аналитического отображения структуры манипулятора. В теории машин и механизмов нашли применение различные методы отображения структуры механизмов, из которых для строительной робототехники представляют интерес отображения структуры в форме отношений и в форме матриц [21]. При отображении структуры в форме отношений составляется матрица отношений для ориентированной структуры манипулятора, элементами которой служат отношения  $s_{ij}$  в множестве кинематических пар  $P = \{p_i^i, p_n^j, \dots, p_m^k\}$ . Если кинематические пары  $p_i^i, p_n^j$  соединены между собой связью, то между ними существует отношения  $p_i^i S_{ij}^\perp p_n^j \leftrightarrow (p_i^i, p_n^j) \in P$ . Для кинематической цепи, состоящей из совокупности соединенных между собой кинематических пар, имеет место отношение

$$p_i^i S_{ij}^H p_n^j S_{jl}^\perp p_c^l \dots p_d^{k-i} S_{k,k-i}^\angle p_n^k, \quad (2.4)$$

при этом верхний индекс при  $S_{ij}$  указывает на форму соединения или ориентации звенья относительно друг друга:  $S_{ij}^H$  — параллель-

но;  $S_{ij}^{\perp}$  — перпендикулярно;  $S_{ij}^{\angle}$  — под углом;  $S_{ij}^o$  — коллинеарно. Для схемы, представленной на рис. 2.2 структура манипулятора в форме отношений отобразится в виде:

$$p_5^1 S_{21}^{\parallel} p_5^2 S_{32}^{\perp} p_5^3 S_{43}^o p_5^4 S_{54}^{\perp} p_5^5 S_{65}^{\parallel} p_5^6 S_{76}^{\perp} p_5^7 \quad (2.5)$$

Для кинематических пар не находящихся в отношении  $S_{ij}=0$ , матрица отношений для манипуляционных структур, составленная на основе отношений  $S_{ij}$ , записывается в виде:

$$S = \begin{bmatrix} S_{21} & \dots & 0 \\ & S_{32} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & S_{n,n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Отображение структуры в форме матриц отличается от предыдущего метода тем, что структура манипулятора однозначно описывается матрицей смежности  $C$ , элементы которой  $C_{ij}=1$ , если кинематические пары соединены, и  $C_{ij}=0$ , если не соединены:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Матрицы смежности устанавливают взаимные отношения между кинематическими парами манипулятора. Сумма элементов столбца  $\sum_{j=1}^n C_{ij}$  или строки  $\sum_{i=1}^n C_{ij}$  указывает, сколько звеньев кинематической цепи соединено с данной кинематической парой.

Другим способом описания структуры манипулятора являются матрицы инцидентности  $J$ , которые позволяют описывать состав кинематических пар и связи между ними. Элементы матрицы  $i_{kl}=1$ , если кинематическая пара  $p^i \in P$  имеет связь  $S_{ij}$ , в противном случае  $i_{kl}=0$ . Строки матрицы инцидентности соответствуют кинематическим парам, а столбцы — связям. Описанные матрицы  $C$  и  $J$  позволяют построить кинематическую схему манипулятора, удобны при выполнении структурного синтеза и компьютерного моделирования структур.

Для обеспечения оптимальной кинематической структуры робота следует выявить условия взаимного расположения пар, обес-



печивающих объемные движения и влияние соотношения длин звеньев и ограничений в степенях подвижности на конфигурацию зоны обслуживания. Для выполнения объемных движений манипулятор строительного робота строиться по одной из следующих структур: три вращательные пары, у двух из которых оси перпендикулярны; две вращательные пары с параллельными осями и одна поступательная; две поступательные пары с непараллельными осями и одна вращательная. Выполнение роботом технологических и транспортных операций требует определенной ориентации объекта в процессе движения. При выполнении роботом строительных операций требуется обеспечение определенного подхода рабочего органа к объекту обслуживания. Ориентирующие движения в первую очередь определяются структурой ориентирующих степеней подвижности. Для обеспечения полной ориентации объекта используется три ориентирующих степени подвижности вращательного типа, оси которых последовательно развернуты на  $90^\circ$ . Специализация строительных роботов позволяет в отдельных случаях упростить эту компоновку, в частности для окрасочных и бетоноукладочных роботов возможно использования двух ориентирующих степеней подвижности. Для удобства анализа ориентирующих свойств робота следует пользоваться коэффициентом сервиса. Использование этой интегральной оценки позволяет свести задачу выбора параметров манипуляционной системы к задаче параметрической оптимизации коэффициента сервиса. Решение таких задач проводится на основе численных методов.

В монтажных роботах в условиях больших статических и динамических нагрузок и небольших диапазонов смещений и поворотов объекта манипулирования могут быть использованы структуры с параллельными кинематическими цепями. При решении задачи построения кинематических схем строительных роботов следует учитывать упругие свойства звеньев манипулятора. Структурный анализ манипуляционной системы должен учитывать не только кинематическую структуру манипулятора и его геометрические размеры, но и наличие препятствий в зоне обслуживания и ограничения в степенях подвижности. В связи со сложностью аналитического решения задач анализа ориентирующих способностей манипулятора, их лучше проводить методами компьютерного моделирования.

Решение задач построения структурных схем манипулятора осуществляется в следующей последовательности: на первом этапе

проводится детальный анализ ориентирующих возможностей манипулятора при известном расположении препятствий и их размерах; после этого выполняется синтез кинематической схемы манипулятора и формирование компоновок оборудования при заданных диапазонах ориентации схвата в заданных точках зоны обслуживания.

## **2.2. Кинематические структуры строительных роботов и их специализация**

Рассмотрим кинематические структуры, полученные в результате кинематического синтеза для различных видов строительных роботов. Выбор структуры кинематической схемы робота, определение числа степеней подвижности, оптимальных длин звеньев и их предельных перемещений составляет одну из важнейших задач проектирования специализированных строительных роботов. Решение этой задачи базируется на оптимизационных методах, обеспечивающих минимизацию рабочего пространства робота при заданной зоне обслуживания.

Опыт, накопленный различными научными коллективами техническими и строительными фирмами, в области монтажных работ показывает, что успешное решение задач их роботизации в первую очередь связано с разработкой оригинальных кинематических структур и грамотным проведением структурного анализа. Выполненный анализ роботизации строительно-монтажных работ показал, что в связи со спецификой и разнообразием монтажных операций, сложностью их выполнения, значительными габаритами и массой монтируемых конструкций, необходимы специализированные средства робототехники. Среди них можно выделить три основных направления:

- создание специализированных монтажных роботов;
- создание кранов-манипуляторов с программным управлением;
- разработка роботов для позиционирования строительных конструкций в процессе их монтажа.

Для строительно-монтажных роботов первого типа предлагается структурная схема с 6-ю степенями подвижности, представленная на рис. 2.3. Структурный анализ этой схемы показал, что она обеспечивает транспортировку, установку и ориентацию элемен-

тов и конструкций на объектах высотой до 10—15 м при минимальных затратах энергетических и временных ресурсов. Основу таких роботов могут составить самоходные краны с телескопической стрелой, на которой устанавливается дополнительное поворотное звено с ориентирующим модулем и захватной траверсой.

Основное назначение таких роботов — монтаж коттеджей, административных зданий, промышленных объектов и павильонов различного назначения. Структура переносных степеней подвижности  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $S_3$  обеспечивает перемещение элементов в зону монтажа по прямолинейным или криволинейным траекториям движения с учетом технологических маршрутов и ограничений на них. Такая кинематическая структура позволяет легко реализовать такие технологические операции, как вертикальный подъем элемента, его горизонтальное перемещение, перемещение элемента по наклонной прямолинейной траектории. Вертикальность конструкции в ходе транспортирования обеспечивается за счет синхронного изменения положения степеней подвижности  $\varphi_2$  и  $\varphi_4$ . Ориентация относительно вертикальной оси и устранение крена монтируемых деталей осуществляется степенями подвижности ориентирующего модуля  $\varphi_5$  и  $\varphi_6$ . К недостаткам такой кинематической структуры следует отнести ограниченные возможности по высоте и ширине монтируемых объектов.

При выполнении монтажных работ на объектах высотой 10—15 м целесообразно использовать башенные краны-манипуляторы. Кинематическая структура таких монтажных роботов может отличаться составом и реализацией отдельных модулей, однако во всех их конструкциях в качестве базовой кинематической схемы используется структура, представленная на рис. 2.4. Башня со стрелой, установленная на подвижной тележке имеет три степени подвижности: поворот башни  $\theta$ , подъем стрелы  $h$ , и перемещение тележки по стреле  $r$ . На тележке устанавливается манипулятор с двумя поворотными звеньями и ориентирующий модуль с тремя степенями подвижности.

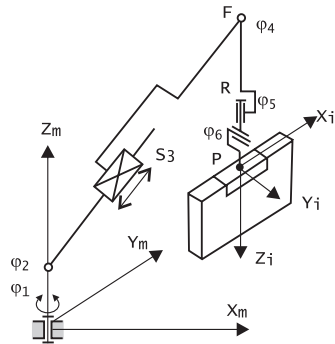


Рис. 2.3. Структурная схема стрелового монтажного робота

В случае выполнения работ в стесненных условиях рекомендуется устанавливать на горизонтальной траверсе ориентирующий модуль, имеющей жесткую или гибкую связь со стрелой и башней. Одним из применений кранов-манипуляторов является монтаж коттеджей и сборных жилых домов. Выполненные авторами работы показывают возможность программного управления всем процессом при условии использования автоматизированных систем контроля положения и ориентации монтируемых конструкций.

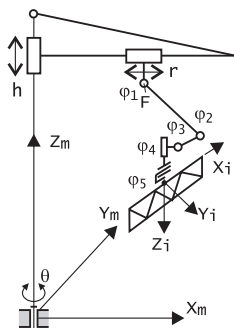


Рис. 2.4. Структурная схема башенного крана-манипулятора

При монтаже высотных зданий одним из перспективных направлений является создание роботизированных монтажных комплексов, выполненных на базе башенного крана с программным управлением и монтажного робота (рис. 2.5). Кран обеспечивает перемещение конструкции в зону монтажа, ее предварительную установку и удержание в процессе ориентации. Монтажный робот обеспечивает корректировку положения и точную ориентацию детали при монтаже. Структурный анализ показал целесообразность использования двурукого манипулятора, установленного на самоходной платформе и имеющего в основании поступательную степень подвижности. Платформа снабжается выдвижными управляемыми опорами. Контроль положения монтируемых деталей обеспечивается лазерными приборами ориентирования, что позволяет обеспечить непрерывный контроль положения и автоматизировать процесс монтажа.

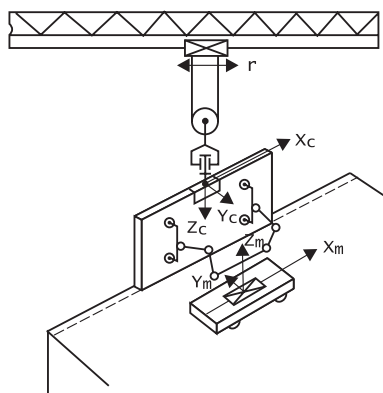


Рис. 2.5. Роботизированный монтажный комплекс

При создании отделочных работ главной проблемой сле-

дует считать построение оптимальных кинематических структур и выработку критериев параметрического синтеза манипуляционной системы. Анализ технологии выполнения отделочных работ и сформулированные требования к их роботизации позволили определить несколько базовых кинематических структур окрасочных роботов. Для грунтовки и окрашивания стен и потолков жилых помещений целесообразно использовать кинематическую схему, представленную на рис. 2.6, а. Ее отличительной особенностью является компактность манипуляционной системы в рабочем и транспортном положении. Длина звеньев может составлять 1,0—1,5 м, что обеспечивает окрашивание помещений с высотой потолков 3,0—4,0 м. Перемещение манипулятора вдоль стен обеспечивается транспортной платформой. Особенностью этой структуры является расположение осей переносных степеней подвижности ( $\varphi_1, \varphi_2$ ) перпендикулярно окрашиваемой поверхности. Перемещение  $S_1$  является позиционным и обеспечивает установку манипулятора на требуемую высоту, определяемую высотой окрашиваемого помещения.

Отделочные работы в помещениях большой площади и высоты целесообразно выполнять с помощью полустационарных роботов, монтируемых на телескопической штанге и имеющих 6 степеней подвижности (рис. 2.6, б). Анализ этой кинематической структуры показал, что при оптимальном выборе длин звеньев она обеспечивает с одной установки окрашивание стен и потолков площадью 30—50 м<sup>2</sup>.

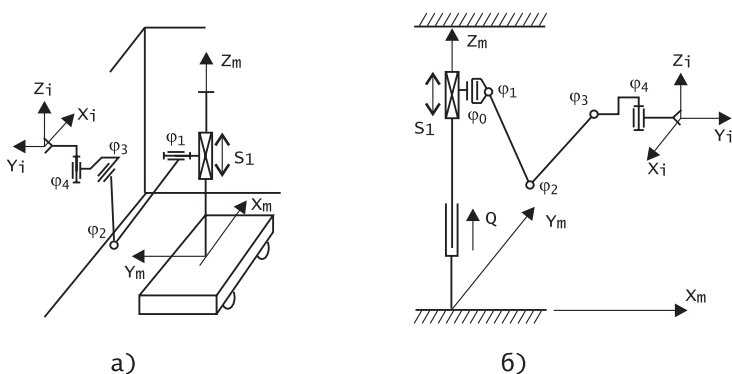


Рис. 2.6. Структурные схемы малярных роботов

а) для жилых помещений; б) для помещений большой площади и высоты

При выполнении различного рода ремонтных работ внутри помещений необходимы легкие передвижные манипуляторы, обеспечивающие очистку поверхности, нанесение различного рода покрытий. Для этих целей могут использоваться манипуляторы с 5—6 степенями подвижности, имеющих кинематические структуры представленные на рис. 2.7.

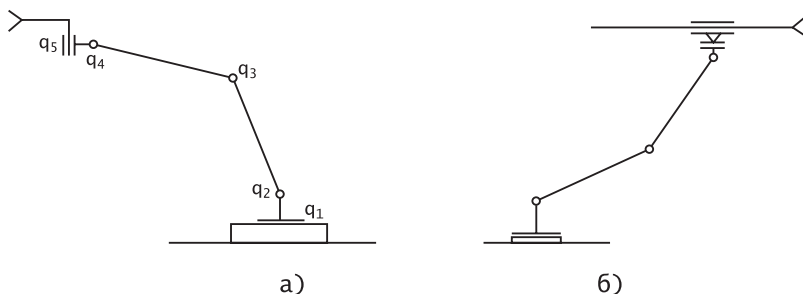


Рис. 2.7. Структурные схемы роботов для ремонтных работ а) с 5-ю степенями подвижности; б) с 6-ю степенями подвижности

Преимуществом этих кинематических структур является возможность выполнения необходимых командных движений инструмента относительно стен и потолков помещения при максимальном соотношении площади обрабатываемой поверхности и требуемого объема рабочего пространства. Кроме того, эти структуры обеспечивают минимальный объем конструкции робота в транспортном положении.

Роботизацию процессов очистки и окрашивания наружных стен зданий рекомендуется выполнять на основе кинематических структур, приведенных на рис. 2.8. Одна из них предназначена для зданий малой и средней высоты, а вторая — для высотных зданий и сооружений. Основу первой манипуляционной схемы (рис. 2.8, а) составляет самоходная платформа с поворотной плитой и двухзвенная рука. Движения  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  обеспечивают попадание рабочего инструмента в заданную точку окрашиваемой поверхности и его перемещение по заданной траектории. Степени подвижности  $\varphi_4$ ,  $\varphi_5$  выполняют необходимую ориентацию инструмента относительно поверхности. Включение между ними поступательной степени подвижности ( $S_1$ ) обеспечивает удобство окрашивания широких полос, обход препятствий при движении по заданной траектории.

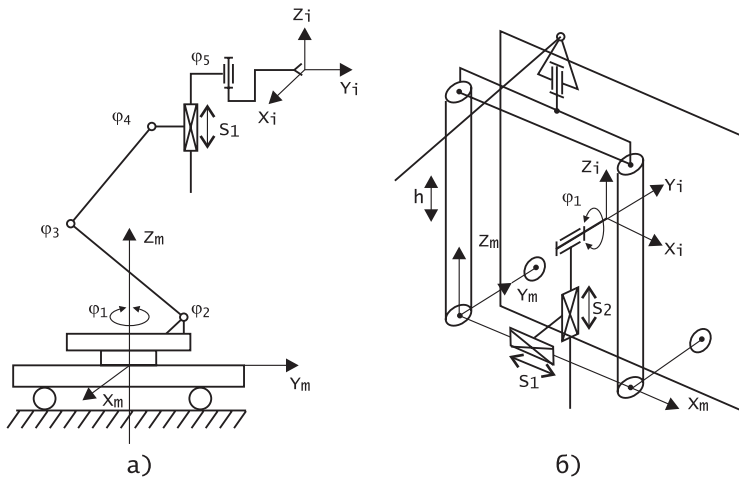


Рис. 2.8. Структурные схемы роботов для очистки и окрашивания наружных стен зданий  
 а) для зданий малой и средней высоты; б) очистки и окрашивания фасадов

Роботизация процесса очистки фасадов и окрашивания наружных стен высотных зданий возможно реализовать путем использования подвесных двухкоординатных тележек (рис. 2.8, б). Третья степень подвижности обеспечивает необходимые вращательные движения инструмента, предусмотренные технологией. Перемещения тележки по вертикали ( $h$ ) выполняется программно-управляемыми лебедками, оснащенные датчиками положения.

Широкое применение в практике строительства находят роботы для набрызга бетонов и растворов. Главным направлением роботизации этого вида работ является использование манипуляторов с программным управлением, способных обеспечить оптимальные условия набрызга. При выполнении этого вида работ требуется обеспечить траекторное перемещение рабочего инструмента (сопла), поддержания перпендикулярности оси сопла обрабатываемой поверхности и выполнения кругового движения сопла относительно продольной оси. Стремление обеспечить более простое управление движением робота и обеспечить необходимую устойчивость и точность манипуляционной системы привели к использованию в ней пантографных механизмов. На рис. 2.9. представлены кинематические структуры двух типов роботов,

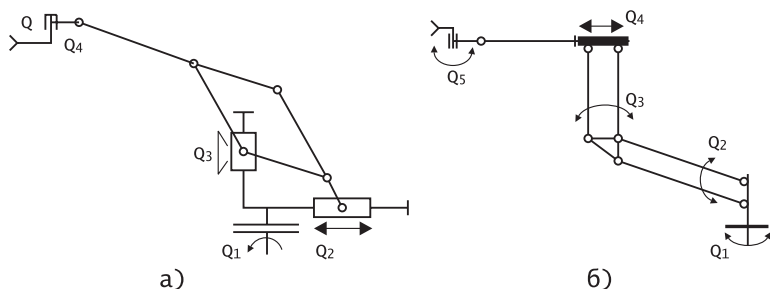


Рис. 2.9. Структурные схемы роботов для набрызга бетона а) для зданий малой и средней высотности; б) для очистки и окрашивания фасадов

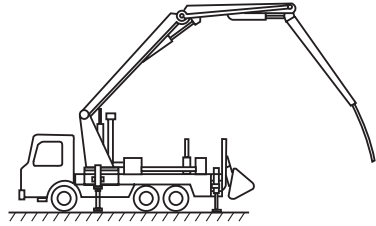
предназначенных для набрызга бетона. Их можно рассматривать как базовые структуры для данного вида работ.

Особенностью первой структуры (рис. 2.9, а) является обеспечение линейной зависимости между координатными перемещениями кисти и обобщенными координатами  $q_2$  и  $q_3$  с помощью приводов, размещаемых в основании манипулятора. Эта структура позволяет работать в цилиндрической системе координат. Вторая структура (рис. 2.9, б) отличается наличием двух звеньев пантографного типа (звенья  $q_2$  и  $q_3$ ) и наличием телескопического лафета (звено  $q_4$ ), обеспечивающего получения наибольшего рабочего объема. Применение параллелограммного механизма способствует сохранению горизонтального положения каретки с рабочим инструментом. Такая конструкция позволяет иметь только одну ориентирующую степень подвижности (звено  $q_4$ ).

Технология бетонных работ предусматривает решение задач комплексной механизации подачи, распределения и укладки бетонной смеси. На строительных площадках требуются механизмы, обеспечивающие непрерывную подачу и укладку бетонной смеси в конструкции, расположенные как ниже нулевой отметки, так и на значительной высоте от нее. Анализ роботизации бетонных работ показывает, что для распределения и укладки бетонной смеси целесообразно использовать шарнирно-распределительные стрелы (рис. 2.10), имеющие 4—5 степеней подвижности вращательного типа. Такая структура обеспечивает доставку бетона в любую точку бетонируемого объекта и позволяет обходить различного рода встречающиеся препятствия.



Анализ кинематических схем строительных роботов позволяет сделать ряд выводов. Особенности строительных технологий и условия их выполнения требуют разработки специализированных робототехнических средств, кинематические схемы которых должны наиболее полно учитывать все особенности роботизируемых операций, условия рабочей среды, требования транспортирования и установки в рабочее состояние. Число степеней подвижности окрасочных, малярных, бетоноукладочных и ряда других строительных роботов менее 6, так как при выполнении этих операций не требуется ротации инструмента относительно нормали к рабочей поверхности. Выбор структуры манипуляционной системы следует проводить с учетом предполагаемых траекторий движения.



*Рис. 2.10.*  
*Шарнирно-распределительные стрелы для укладки бетона*

При проектировании строительных роботов одной из основных задач является структурный синтез манипуляционной системы, в результате которого определяется оптимальное число и вид кинематических пар, их расположение. В процессе решения задач синтеза определяются параметры кинематических структур. Сложность решения задач синтеза зависит от числа звеньев, вида целевой функции и введенных ограничений. В качестве целевой функции используется функция, характеризующая отклонение положения и ориентации схвата от заданного. При этом могут быть ограничения на относительные длины звеньев или на максимальную длину звена. Сложность решения задачи синтеза зависит от числа параметров, вида целевой функции и ограничений. Для строительного-монтажных роботов наиболее целесообразно при структурном синтезе использовать методы случайного или направленного поиска, а также методы приближения функций. Метод случайного поиска позволяет обследовать всю область допустимых

значений параметров, однако требует большого объема вычислений. Для ускорения вычислений необходимо использовать направленное движение в пространстве параметров. Это позволяет выполнить метод направленного поиска, при котором задается целевая функция, и направление поиска ее экстремума производится на основе частных производных по параметрам синтеза.

При сравнении кинематических структур манипуляторов строительных роботов, в качестве оценочного показателя можно применить коэффициент эффективности использования рабочего пространства:

$$K_{кз}(x) = V_{рз}(x)/V_{тз}(x) \quad (2.8)$$

где  $V_{рз}(x)$  — объем рабочей зоны манипулятора;  $V_{тз}(x)$  — объем технологической зоны обслуживания. Для окрасочных роботов в качестве оценки оптимальности кинематической схемы и выбора параметров звеньев предлагается использовать коэффициент компактности рабочей зоны:

$$K_{кз}(x) = S_{обс}(x)/d_{рз}^2(x), \quad (2.9)$$

где  $S_{обс}(x)$  — площадь обслуживания манипулятора;  $d_{рз}(x)$  — максимальная глубина рабочей зоны. Синтез структуры и параметров звеньев манипулятора в этом случае выполняется на основе целевой функции  $I = \min K(x)$ .

## 2.3. Кинематические модели строительных роботов

На различных этапах проектирования строительных роботов, решения задач управления ими, подготовке алгоритмического и программного обеспечения используются кинематические модели, включающие алгоритмы решения прямых и обратных задач кинематики о положениях, скоростях и ускорениях. Кинематическая модель робота позволяет описать движение робототехнической системы в трехмерном пространстве в зависимости от времени без учета сил и моментов, вызывающих это движение. Кинематические структуры большинства строительных роботов имеют разомкнутую цепь с последовательно соединенными звеньями, причем каждая кинематическая пара имеет одну степень подвижности, обеспечивающую вращательное или поступательное движение. Эти

особенности значительно упрощают построение кинематических моделей, однако при этом необходимо учитывать различного рода ограничения по степеням подвижности. Кинематическая модель робота создается для конкретного манипулятора и позволяет по известному вектору обобщенных координат определить положение и ориентацию рабочего органа относительно базовой системы координат. Кроме того, она позволяет найти всевозможные векторы обобщенных координат, обеспечивающие заданные положение и ориентацию схвата в абсолютной системе координат [17, 27, 42].

Алгоритмы решения прямой задачи о положении и ориентации на основании информации, получаемой с датчиков положения звеньев манипулятора, определяют положение рабочего органа и его ориентацию в базовой системе координат робота. Информация, снимаемая с датчиков скорости каждой степени подвижности, позволяет рассчитать фактическую скорость движения рабочего органа и в случае необходимости его ускорение. Алгоритмы решения прямых задач кинематики обеспечивают оценку положения и ориентации любого промежуточного звена манипулятора в основной системе координат. Если обобщенные координаты робота заданы функциями времени  $G(t)=[q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ , то алгоритмы решения прямой задачи о положении позволяют получить закон движения рабочего органа  $X(t)=[x(t), y(t), z(t), \theta(t), \beta(t), \alpha(t)]$ . Используя алгоритмы решения прямой задачи о положении и компьютерную графику можно смоделировать рабочую зону управляемого манипулятора при наличии ограничений на перемещение каждой обобщенной координаты.

При управлении манипулятором решаются обратные задачи о положениях, скоростях и ускорениях. Обратная задача о положении заключается в определении обобщенных координат звеньев  $G=[q_1, q_2, \dots, q_6]$ , обеспечивающих заданное положение и ориентацию схвата  $X_{\text{зад}}=[x, y, z, \theta, \beta, \alpha]$ . Обратная задача о скоростях и ускорениях позволяет определить требуемые скорости перемещения звеньев манипулятора, обеспечивающие необходимую технологическую скорость и ускорение перемещения рабочего органа манипулятора. При проектировании строительных роботов алгоритмы решения обратных задач позволяют на основе требований к движению объекта манипулирования или инструмента сформулировать требования к перемещениям, скоростям и ускорениям в кинематических парах. Решение обратных задач кинематики дает возможность сформулировать требования к приводам по скорости

и передаточному отношению. При управлении строительными роботами в ходе планирования траекторий движения и формирования управляющих воздействий на приводы, алгоритмы решения обратных задач позволяют определять законы изменения во времени обобщенных координат  $G(t)$ , обеспечивающих требуемый закон движения схвата по траектории  $X(t)$ . Решая обратные задачи, получают программные значения обобщенных координат, которые обрабатываются приводами. Причем в качестве программных воздействий могут использоваться как дискретные последовательности, так и их интерполяция с помощью непрерывных функций времени. Существует множество методов построения кинематических моделей роботов: на основе геометрического подхода, векторный, матричный, метод винтов и дуальных матриц. Анализ этих методов показал, что для строительных роботов целесообразно использовать алгоритмы решения прямых и обратных задач кинематики основанные на геометрическом подходе или использующие матрицы преобразований, обеспечивающие проектирование быстродействующих алгоритмов управления. Основу многих монтажных, отделочных и бетоноукладочных роботов составляет трехзвенный механизм (рис. 2.11), для которого построение кинематических моделей можно выполнить на основе геометрического подхода. В этом случае координаты точки  $P$  последнего звена связаны с обобщенными координатами уравнениями:

$$\begin{cases} x_p = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \cos \varphi_1, \\ y_p = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \sin \varphi_1, \\ z_p = l_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3). \end{cases} \quad (2.10)$$

Если в систему уравнений ввести законы движения степеней подвижности:

$$\varphi_1(t) = \varphi_{10} + \omega_1(t), \quad \varphi_2(t) = \varphi_{20} + \omega_2(t), \quad \varphi_3(t) = \varphi_{30} + \omega_3(t).$$

получим уравнения, описывающие закон изменения положения точки  $P$  манипулятора в базовой системе координат:

$$\begin{cases} x_p(t) = [l_2 \sin \varphi_2(t) + l_3 \sin(\varphi_2(t) + \varphi_3(t))] \cos \varphi_1(t), \\ y_p(t) = [l_2 \sin \varphi_2(t) + l_3 \sin(\varphi_2(t) + \varphi_3(t))] \sin \varphi_1(t), \\ z_p(t) = l_1 + l_2 \cos \varphi_2(t) + l_3 \cos(\varphi_2(t) + \varphi_3(t)). \end{cases} \quad (2.11)$$

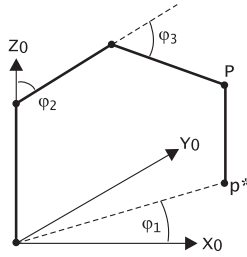


Рис. 2.11. Трехзвенный манипулятор типа BBB

Дифференцирование системы уравнений (2.10) позволяет получить систему уравнений для оценки скоростей перемещения точки  $P$  в проекциях на координатные оси  $x_0, y_0, z_0$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_p = -[l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)]\dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \\ + [l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)](\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cos \varphi_1 \\ \dot{y}_p = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)]\dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + \\ + [l_2 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)](\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \sin \varphi_1, \\ \dot{z}_p = -l_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 - l_3 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \sin(\varphi_2 + \varphi_3). \end{cases} \quad (2.12)$$

Решение обратной задачи кинематики в данном случае можно получить на основе преобразования системы уравнений (2.10). Результатом этих действий является определение обобщенных координат  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , обеспечивающие заданное положение точки  $x_p, y_p, z_p$ :

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arctg(y_p/x_p), \\ \varphi_2 = \pi - [\arctg[r_p/(z_p - l_1)] + \\ + \arccos \left[ \frac{1}{2 \cdot l_2 \cdot [(z_p - l_1)^2 + r_p^2]^{\frac{1}{2}}} (l_3^2 - l_2^2 - (z_p - l_1)^2 - r_p^2) \right], \\ \varphi_3 = \arccos \left[ \frac{1}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} (r_p^2 + z_p^2 + (l_1^2 - l_2^2 - l_3^2) - 2 \cdot z_p \cdot l_1) \right] \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $r_p^2 = x^2 + y^2$ .

На основе уравнений (2.13) записываются законы изменения фазовых координат, обеспечивающих реализацию заданного движения:

$$x_p(t) = x_{p0} + v_{px}t, \quad y_p(t) = y_{p0} + v_{py}t, \quad z_p(t) = z_{p0} + v_{pz}t, \quad (2.14)$$

где  $v_{px}, v_{py}, v_{pz}$  — проекции на оси координат скорости движения точки  $P$ ;  $x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}$  — начальные значения фазовых координат.

Законы изменения обобщенных координат, реализующих траекторные движения (2.14) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \operatorname{arctg} \left( \frac{y_p(t)}{x_p(t)} \right), \\ \varphi_2(t) &= \pi - \left[ \operatorname{arctg} \frac{[(x_p(t)^2 + (y_p(t)^2)^{\frac{1}{2}}]}{z_p(t) - l_1} + \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{arccos} \frac{l_3^2 - l_2^2 - (z_p(t) - l_1)^2 - [x_p(t)^2 + y_p(t)^2]}{2l_2[(z_p(t) - l_1)^2 + x_p(t)^2 + y_p(t)^2]} \right], \\ \varphi_3(t) &= \operatorname{arccos} \left[ \frac{1}{2 \cdot l_2 \cdot l_3} (x_p(t)^2 + y_p(t)^2 + z_p(t)^2 + (l_1^2 - l_2^2 - l_3^2) - 2z_p(t)l) \right], \end{aligned} \quad (2.15)$$

Дифференцируя уравнения (2.13), получаем законы изменения обобщенных скоростей, обеспечивающих движение точки  $P$  со скоростью  $v_{px}, v_{py}, v_{pz}$ . Полученные системы уравнений (2.10)—(2.13) и (2.15) составляют кинематическую модель трехзвенного манипулятора.

Перспективным является использование в строительстве манипуляционных систем на основе пантографных механизмов, обеспечивающих линейную зависимость между координатами перемещения рабочего инструмента и обобщенными координатами [2]. Построение кинематической модели таких манипуляторов также удобно выполнять на основе геометрического подхода. Рассмотрим манипуляционную систему с пантографным механизмом, приведенную на рис. 2.12. Перемещение точки  $F$  звена, на котором закреплена ориентирующая головка с двумя степенями подвижности, можно получить, если предварительно выразить углы  $\alpha_1, \alpha_2$  через обобщенные координаты  $q_1, q_2$ :

$$\begin{cases} l_{11} \cos \alpha_1 + l_{21} \cos \alpha_2 = d_1, \\ l_{11} \sin \alpha_1 + l_{21} \sin \alpha_2 = d_2. \end{cases} \quad (2.16)$$

и ввести коэффициент усиления пантографного механизма

$$k_{н.м.} = l_1/l_{11} = l_2/l_{21}.$$

В этом случае положение точки  $F$  в базовой системе координат описывается системой уравнений вида:

$$\begin{cases} x_F = (d_1(1 - k_{n.m.}) - c) \cos \varphi_1, \\ y_F = (d_1(1 - k_{n.m.}) - c) \sin \varphi_1, \\ z_F = z_0 + k_{n.m.} d_2, \end{cases} \quad (2.17)$$

где  $z_0$  — смещение системы координат  $x, y, z$  относительно базовой системы  $x_0, y_0, z_0$ .

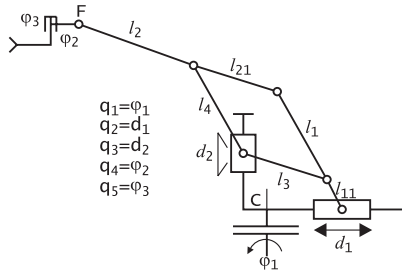


Рис. 2.12. Манипуляционная система с пантографным механизмом

С учетом ориентирующих степеней подвижности положение форсунки в базовой системе координат описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} x_p &= (d_1(1 - k_{n.m.}) - c) \cos \varphi_1 + (l_3 \cos \varphi_1 + l_4 \cos(\varphi_1 + \varphi_3)) \cos(\alpha_2 + \varphi_2), \\ y_p &= (d_1(1 - k_{n.m.}) - c) \sin \varphi_1 + (l_3 \sin \varphi_1 + l_4 \sin(\varphi_1 + \varphi_3)) \cos(\alpha_2 + \varphi_2), \\ z_p &= z_0 + k_{n.m.} \cdot d_2 + (l_3 + l_4) \sin(\alpha_2 + \varphi_2). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Эту систему уравнений можно упростить, если учесть технологические требования к ориентации рабочего инструмента:  $\varphi_2 = -\alpha_2$ ,  $\varphi_3 = -\varphi_1$ , т. е. ось форсунки должна быть расположена горизонтально и перпендикулярно к рабочей поверхности. В этом случае система уравнений (2.18) примет вид:

$$\begin{cases} x_p = (d_1(1 - k_{n.m.}) - c + l_3) \cos \varphi_1 + l_4, \\ y_p = (d_1(1 - k_{n.m.}) - c + l_3) \sin \varphi_1 + l_4, \\ z_p = z_0 + k_{n.m.} d_2. \end{cases} \quad (2.19)$$

Линейную скорость форсунки в проекции на координатные оси можно получить, если продифференцировать функцию положения:

$$\begin{cases} v_{px} = -(d_1(1 - k_{n,m}) - c + l_3)\dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{d}_1(1 - k_{n,m}) \cos \varphi_1, \\ v_{py} = (d_1(1 - k_{n,m}) - c + l_3)\dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + \dot{d}_1(1 - k_{n,m}) \sin \varphi_1, \\ v_{pz} = k_{n,m} \cdot \dot{d}_2, \end{cases} \quad (2.20)$$

где  $\dot{\varphi}_1, \dot{d}_1, \dot{d}_2$  — скорости перемещения звеньев манипулятора.

Полученные выражения (2.20) позволяют контролировать фактическую скорость движения форсунки. На основе системы уравнений (2.19) легко получить уравнения решения обратной задачи о положении:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arctg(y_p/x_p - l_4), \\ d_1 = (1 - k_{n,m})^{-1} \left[ \sqrt{(x_p - l_4)^2 + y_p^2} + d_1 - l_3 \right], \\ d_2 = k_{n,m}^{-1} (z_p - z_0), \\ \varphi_2 = -\alpha_2, \\ \varphi_3 = -\varphi_1 \end{cases} \quad (2.21)$$

Многие кинематические структуры строительных роботов сложно описывать на основе геометрического подхода. В этих случаях предпочтение следует отдавать матричным методам [27]. Это позволяет получить системы уравнений в компактной форме, требующие наименьших затрат времени и памяти при машинной обработке информации системой управления робота. Кроме того, используя матричное представление и вводя однородные координаты, получаем возможность единообразного представления кинематики манипулятора и алгоритмов обработки визуальной информации. Использование однородных координат позволяет в компактной форме записывать различные геометрические, кинематические и динамические соотношения для сложных манипуляционных систем. В однородных координатах любое преобразование из одной системы координат в другую представляется матрицей вида:

$$T = T_r T_\alpha = \begin{bmatrix} E & \vdots & r \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_\alpha & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\alpha & \vdots & r \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

где  $E$  — единичная матрица размером  $3 \times 3$ ;  $r$  — вектор переноса;  $A_\alpha$  — матрица вращения.



В качестве основной системы координат удобно выбирать декартову систему  $X_0Y_0Z_0$  (рис. 2.13), связанную с основанием робота, которая служит основой задания траекторий движения технологического инструмента при выполнении различных строительных операций. С целью описания конфигурации механизма в основной системе координат необходимо ввести для каждой степени подвижности локальную систему координат  $X_iY_iZ_i$ , которая строится по определенным правилам с учетом особенностей кинематики манипулятора. При выборе базовой и локальных систем координат строительных роботов следует придерживаться следующих правил [48]. Центр базовой системы координат располагается на стойке робота, при этом ось  $Z_0$  направляется вертикально по оси поворота манипулятора или вдоль его стойки, а ось  $X_0$  удобно направлять вдоль платформы. Анализ различных способов построения локальных систем координат показал, что для строительных роботов наиболее удобно использовать следующие правила. Для вращательных степеней подвижности, оси которых перпендикулярны звеньям, вдоль них следует направлять ось  $X_i$ , а ось  $Z_i$  проводить вдоль звена (рис. 2.13). В случае вращательных степеней подвижности, ось поворота которых направлена вдоль звеньев, и поступательных степеней подвижности необходимо вдоль оси поворота или направления поступательного движения направлять ось  $Z_i$ . Ось  $X_i$  в этом случае должна совпадать по направлению с осью  $X_{i-1}$  предыдущей системы координат. Оси  $Y_i$  во всех случаях достраиваются до получения правой системы координат. При построении системы координат схвата и технологического инструмента следует придерживаться следующих рекомендаций. В строительно-монтажных роботах ось  $Z_c$  системы координат схвата следует направлять вдоль последнего звена, а ось  $X_c$  — вдоль траверсы захватного устройства. В отделочных роботах рекомендуется вдоль последнего звена направлять ось  $Y_c$ , а ось  $Z_c$  располагать в плоскости механизма. В бетоноукладочных роботах ось  $Z_c$  следует направлять вдоль последнего

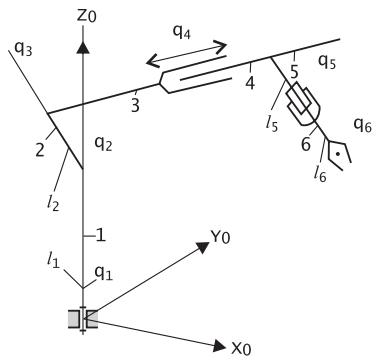


Рис. 2.13. Системы координат строительных роботов

звена, а ось  $X_c$  — параллельно оси  $X_{n-1}$  предыдущей системы координат. Изложенный подход к построению систем координат позволяет получить минимальное число преобразований при переходе из одной системы координат в другую. Кроме того, описанная методика выбора систем координат обеспечивает более естественное представление состояния механизмов в локальных системах координат и удобную графическую интерпретацию при использовании компьютерной графики.

Использование матричных методов построения кинематических моделей рассмотрим на примере отделочного робота, приведенного на рис. 2.14. Системы локальных координат построены в соответствии с описанными выше правилами, предложенными авторами.

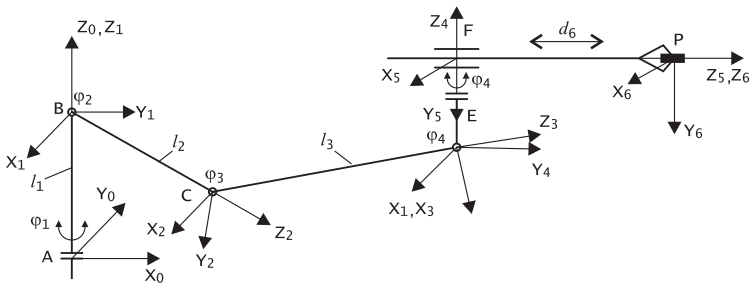


Рис. 2.14. Кинематическая схема и системы координат малярного робота

В соответствии с локальными системами координат  $X_i Y_i Z_i$ , запишем матрицы преобразования  $T_{01}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{23}$ ,  $T_{34}$ ,  $T_{45}$ ,  $T_{56}$ , в результате перемножения которых получим результирующую матрицу перехода  $T_{06}$  из системы координат инструмента  $X_6 Y_6 Z_6$  в базовую систему координат  $X_0 Y_0 Z_0$ :

$$T_{06} = \prod_{i=1}^6 T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & n_x \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & n_y \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & n_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

На основании матрицы  $T_{06}$  записываем выражения для определения координат инструмента в функции обобщенных координат:

$$\begin{aligned}
 x_p = n_x &= d_6(C\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - S\varphi_1 \cdot S\varphi_5 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) + \\
 &+ [l_3 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3) + l_2 \cdot S\varphi_2] \cdot S\varphi_1 + (l_4 + l_5) \cdot S\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 y_p = n_y &= d_6(S\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - C\varphi_1 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \cdot C\varphi_5 - \\
 &- [l_3 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3) + l_2 \cdot S\varphi_2] \cdot C\varphi_1 - (l_4 + l_5) \cdot C\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 z_p = n_z &= l_1 + l_2 \cdot C\varphi_2 + l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3) + (l_4 + l_5) \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \\
 &- d_6 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \cdot C\varphi_5,
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Направляющие косинусы, определяющие ориентацию форсунки в базовой системе координат, опишем системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{11} &= C\varphi_1 \cdot C\varphi_5 + S\varphi_1 \cdot S\varphi_5 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{12} &= S\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{13} &= C\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - S\varphi_1 \cdot C\varphi_5 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{21} &= S\varphi_1 \cdot C\varphi_5 + C\varphi_1 \cdot S\varphi_5 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{22} &= -C\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{23} &= S\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - C\varphi_1 \cdot C\varphi_5 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{31} &= S\varphi_5 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{32} &= C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4), \\
 \alpha_{33} &= -C\varphi_5 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4).
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

где введены обозначения  $C\varphi_i = \cos \varphi_i$ ,  $S\varphi_i = \sin \varphi_i$ .

На основании направляющих косинусов  $\alpha_{ij}$  вычисляются углы Эйлера, определяющие ориентацию окрасочного инструмента в системе координат робота. Для этого необходимо воспользоваться известными соотношениями [24], связывающими направляющие косинусы с углами Эйлера.

Решение обратной задачи о положении в данном случае удобно провести на основе использования матриц преобразования. Это позволит получить решения в явном виде, что обеспечит возможность проектирования быстродействующих алгоритмов управления. Трудоемкость данного метода решения обратных задач кинематики во многом определяется выбором локальных систем координат. Описанный в данном разделе способ построения систем координат позволяет получить наиболее простые уравнения связей. Для нахождения решения обратной задачи о положении необходимо записать матричные уравнения перехода для 5-ой степени подвижности в следующем виде:

$$T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdot T_{45} = T_{06} \cdot T_{56}^{-1}. \quad (2.27)$$

При этом матрица  $T_{06}$  при определении относительного положения звеньев по заданному положению инструмента известна:

$$T_{06} = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{(p)} & \alpha_{12}^{(p)} & \alpha_{13}^{(p)} & x_p \\ \alpha_{21}^{(p)} & \alpha_{22}^{(p)} & \alpha_{23}^{(p)} & y_p \\ \alpha_{31}^{(p)} & \alpha_{32}^{(p)} & \alpha_{33}^{(p)} & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Перемножив матрицы левой и правой частей уравнения, получим:

$$t_{05} = \left[ \begin{array}{c|c|c} C_1 \cdot C_5 + S_1 \cdot S_5 \cdot C_{234} & S_1 S_{234} & C_1 S_5 - S_1 C_5 C_{234} \\ S_1 \cdot C_5 + C_1 \cdot S_5 \cdot C_{234} & -C_1 S_{234} & S_1 S_5 - C_1 C_5 C_{234} \\ S_5 S_{234} & C_{234} & -C_5 S_{234} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} (l_2 \cdot S_2 + l_3 \cdot S_{23})S_1 + (l_4 + l_5)S_1 \cdot S_{234} \\ -(l_2 \cdot S_2 + l_3 \cdot S_{23})C_1 - (l_4 + l_5)C_1 \cdot S_{234} \\ l_1 + l_2 \cdot C_2 + l_3 \cdot C_{23} + (l_4 + l_5)C_{234} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

$$T_{06} \cdot T_{56}^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & x_p - d_6 \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & y_p - d_6 \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & z_p - d_6 \alpha_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

обозначения в матрицах  $C_i = \cos \varphi_i$ ,  $S_i = \sin \varphi_i$ ,

$C_{ijk} = \cos(\varphi_i + \varphi_j + \varphi_k)$ ,  $S_{ijk} = \sin(\varphi_i + \varphi_j + \varphi_k)$ .

Приравнявая соответствующие элементы в левой и правой частях полученных матриц, запишем уравнения связи между параметрами, описывающими положение и ориентацию инструмента в системе координат  $x_0 y_0 z_0$  и обобщенными координатами:

$$\begin{aligned} S\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) &= C\alpha_p S\psi_p + S\alpha_\pi C\psi_p C\theta_p, \\ C\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) C\varphi_5 &= S\alpha_p S\theta_p, \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} S\varphi_1 \cdot S\varphi_5 - C\varphi_1 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) \cdot C\varphi_5 &= C\alpha_p + S\theta_p, \\ (l_2 \cdot S\varphi_2 + l_3 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3))S\varphi_1 + (l_4 + l_5)S\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) &= x_p - d_6 \alpha_{13}, \\ -(l_2 \cdot S\varphi_2 + l_3 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3))C\varphi_1 - (l_4 + l_5)C\varphi_1 \cdot S(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) &= t_p - d_6 \alpha_{23}, \end{aligned}$$

$$l_1 + l_2 \cdot C\varphi_2 + l_3 \cdot C(\varphi_2 + \varphi_3) + (l_4 + l_5)C(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) = z_p - d_6\alpha_{33}.$$

В этой системы уравнений известными являются заданные положение  $x_p, y_p, z_p$  и ориентация инструмента  $\alpha_p, \psi_p, \theta_p$ , а определяются положения звеньев  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$ , обеспечивающие такое положение и ориентацию.

Построение кинематических моделей строительно-монтажных роботов имеет свои особенности. В этом случае удобно вначале определить матрицы преобразования отдельно для переносных и ориентирующих степеней подвижности, а затем получить общую матрицу преобразования. Рассмотрим методику получения уравнений кинематики монтажного робота, структурная схема которого приведена на рис. 2.15. В этом случае положение и ориентация точки  $F$ , с помощью которой задаются транспортные траектории движения, описывается матрицей вида:

$$T_F = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} C\varphi_1 & -S\varphi_1 C\varphi_2 & S\varphi_1 S\varphi_2 & d_3 S\varphi_1 S\varphi_2 \\ S\varphi_1 & C\varphi_1 C\varphi_2 & -C\varphi_1 S\varphi_2 & -d_3 C\varphi_1 S\varphi_2 \\ 0 & S\varphi_2 & C\varphi_2 & l_1 + d_3 C\varphi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

В состав кинематической модели монтажного робота необходимо также включать математическое описание положения и ориентации точки  $R$ , определяющей исходное расположение ориентиру-

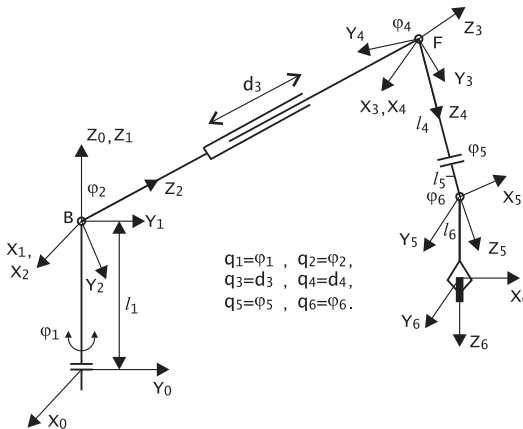


Рис. 2.15. Кинематическая схема и системы координат монтажного робота

ющего модуля в базовой системе координат. Для рассматриваемой кинематической структуры положение и ориентация точки  $R$  описывается матрицей преобразования  $T_R$ , имеющий следующий вид:

$$T_R = T_F \cdot T_4 = \begin{bmatrix} C\varphi_1 & -S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_4) & S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_4) & d_3 S\varphi_1 S\varphi_2 \\ S\varphi_1 & C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_4) & -C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_4) & -d_3 C\varphi_1 S\varphi_2 \\ 0 & S(\varphi_2 + \varphi_4) & C(\varphi_2 + \varphi_4) & l_1 + d_3 C\varphi_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

Изменение положения и ориентации детали при работе ориентирующих степеней подвижности описывается матрицей преобразований вида:

$$T_{or} = T_{45} T_{56} = \begin{bmatrix} C\varphi_5 & -S\varphi_5 C\varphi_6 & S\varphi_5 S\varphi_6 & -l_6 S\varphi_5 S\varphi_6 \\ S\varphi_5 & C\varphi_5 C\varphi_6 & -C\varphi_5 S\varphi_6 & -l_6 C\varphi_5 S\varphi_6 \\ 0 & S\varphi_6 & C\varphi_6 & l_4 + l_5 + l_6 C\varphi_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Используя эти матрицы, определяются положение и ориентация монтируемой детали с помощью матрицы преобразований:  $T_p = T_R T_{or}$ . На основе этой матрицы получаем систему уравнений для описания координат точки  $P$ :

$$\begin{aligned} x_p &= -l_6 \cdot C\varphi_1 S\varphi_5 S\varphi_6 + l_6 \cdot S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_4) C\varphi_5 S\varphi_6 + \\ &+ (l_4 + l_5 + l_6 C\varphi_6) S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_4) + d_3 S\varphi_1 S\varphi_2; \\ y_p &= -l_6 \cdot S\varphi_1 S\varphi_5 S\varphi_6 - l_6 \cdot C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_4) C\varphi_5 S\varphi_6 - \\ &- (l_4 + l_5 + l_6 C\varphi_6) C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_4) - d_3 C\varphi_1 C\varphi_2; \\ z_p &= l_1 + d_3 C\varphi_2 + (l_4 + l_5 + l_6 C\varphi_6) C(\varphi_2 + \varphi_4) - l_6 C\varphi_5 C\varphi_6 S(\varphi_2 + \varphi_4) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Ориентация схвата или грузозахватной траверсы в базовой системе координат объекта определяется углами Эйлера, которые могут быть получены на основании матрицы  $T_p$ . При управлении движением робота необходима информация о скоростях перемещения захватного устройства и точки, определяющей транспортные траектории движения. Это вызывает необходимость включения в состав кинематических моделей строительно-монтажных роботов уравнений, определяющих проекции линейной скорости схвата на оси  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ . Эти уравнения легко получить путем диф-

ференцирования уравнений, описывающих положение интересующих точек манипулятора:

$$\begin{aligned}
 v_x^{(p)} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial x_p}{\partial \varphi_i} \dot{\varphi}_i + \frac{\partial x_p}{\partial d_3} \dot{d}_3; \\
 v_y^{(p)} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial y_p}{\partial \varphi_i} \dot{\varphi}_i + \frac{\partial y_p}{\partial d_3} \dot{d}_3; \\
 v_z^{(p)} &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial z_p}{\partial \varphi_i} \dot{\varphi}_i + \frac{\partial z_p}{\partial d_3} \dot{d}_3.
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

Для кинематической структуры, приведенной на рис. 2.13, скорость перемещения верхней точки стрелы (точка  $F$ ) в проекциях на координатные оси системы  $X_0Y_0Z_0$  описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} v_x^{(F)} = \dot{d}_3 S\varphi_1 S\varphi_2 + d_3 C\varphi_1 S\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_1 + d_3 S\varphi_1 C\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2; \\ v_y^{(F)} = -\dot{d}_3 C\varphi_1 S\varphi_2 + d_3 S\varphi_1 S\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_1 - d_3 C\varphi_1 C\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2; \\ v_z^{(F)} = \dot{d}_3 C\varphi_2 - d_3 S\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2. \end{cases} \tag{2.37}$$

Полученные системы уравнений для строительно-монтажного робота составляют первую часть решаемой задачи. Вторая часть построения кинематической модели связана с нахождением систем уравнений для определения положения степеней подвижности и скоростей их перемещения, обеспечивающих заданное положение конструкции и требуемую скорость ее движения. Эти уравнения в данном случае можно получить на основе элементов матриц преобразования  $T_F$ ,  $T_R$ ,  $T_{or}$  путем совместного решения систем уравнений и их многократного преобразования.

Для большой группы строительных роботов аналитическое решение обратной задачи кинематики представляет значительные трудности. В этом случае можно использовать итерационный метод вычислений, в основу которого положено разложение матричной функции  $T_{06}(q_i)$  в степенной ряд Тейлора, ограниченного линейными членами [27]. Центр разложения выбирается в точке, соответствующей приближенному значению обобщенных координат  $q_i^{(k-1)}$ , полученному на  $k-1$  шаге. Система уравнений для определения уточненных значений обобщенных координат  $q_i^{(k)}$  на  $k$ -ом шаге строится на основе матричного выражения вида:

$$T_{06} = T_{06}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \frac{dT_6^{(k-1)}}{dq_j} (q_j^{(k)} - q_j^{(k-1)}), \quad (2.38)$$

где  $T_{06}$  — матрица с известными значениями элементов, которых определяют заданное положение и ориентацию схвата в системе координат робота;  $T_{06}^{(k-1)}$  — матрица преобразований, элементы которой выражены через приближенные значения обобщенных координат  $q_1^{(k-1)}$ ;  $q_j^{(k)}$  — уточненные значения обобщенных координат, вычисляемые на очередном шаге. Определив производные  $U_{06j}^{(k-1)} = dT_{06}^{(k-1)}/dq_j$ , составляется система линейных уравнений для нахождения уточненных значений обобщенных координат:

$$t_{ij}^{(p)} = t_{ij}^{(k-1)} + \sum_{l=1}^6 (U_{6l}^{(k-1)})_{ij} (q_l^{(k)} - q_l^{(k-1)}), \quad (2.39)$$

где  $t_{ij}^{(p)}$  — заданные значения элементов матрицы  $T_{06}$ , определяющие положение и ориентацию схвата (точка  $P$ ). Процесс нахождения обобщенных координат начинается с задания их произвольных начальных значений  $q_1^{(0)}$ ,  $q_2^{(0)}$ , ...,  $q_6^{(0)}$  и продолжается до достижения заданной точности:

$$(q_j^{(k)} - q_j^{(k-1)}) < (\epsilon_j)_{\text{доп}}, \quad (2.40)$$

где  $(\epsilon_j)_{\text{доп}}$  — допустимая ошибка определения  $l$ -ой обобщенной координаты.

Воспользуемся методом последовательных приближений для решения обратной задачи о положении для трехзвенной бетоноукладочной стрелы-манипулятора (рис. 2.16). В соответствии с локальными системами координат, приведенными на рисунке, составляются матрицы перехода  $T_{i-1, i}$ . На основании их записываются матрицы перехода из локальных систем координат в базовую и определяется матрица перехода из системы схвата в базовую систему координат. Для рассматриваемого примера матрица  $T_{03}$  имеет следующий вид:

$$T_{03} = \begin{bmatrix} C\varphi_1 & -S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & [l_2 S\varphi_2 + l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3)] S\varphi_1 \\ S\varphi_1 & C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & -C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & -[l_2 S\varphi_2 + l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3)] C\varphi_1 \\ 0 & S(\varphi_2 + \varphi_3) & -C(\varphi_2 + \varphi_3) & l_1 + l_2 C\varphi_2 + l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $C(\varphi_2 + \varphi_3) = \cos(\varphi_2 + \varphi_3)$ ,  $S(\varphi_2 + \varphi_3) = \sin(\varphi_2 + \varphi_3)$ .



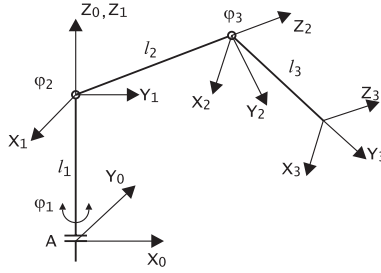


Рис. 2.16. Структура и системы координат трехзвенного манипулятора

На основе матрицы  $T_{03}$  записываем частные производные по каждой обобщенной координате  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ :

$$\begin{aligned}
 U_{31} &= \begin{bmatrix} -C\varphi_1 & -C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & [l_2 S\varphi_2 + l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3)] C\varphi_1 \\ C\varphi_1 & -S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & [l_2 S\varphi_2 + l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3)] S\varphi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \dot{\varphi}_1 \\
 U_{32} &= \begin{bmatrix} 0 & S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & [l_2 C\varphi_2 + l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3)] S\varphi_1 \\ 0 & -C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & -C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & -[l_2 C\varphi_2 + l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3)] C\varphi_1 \\ 0 & C(\varphi_2 + \varphi_3) & S(\varphi_2 + \varphi_3) & -l_2 S\varphi_2 - l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \dot{\varphi}_2 \\
 U_{33} &= \begin{bmatrix} 0 & S\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & S\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3) S\varphi_1 \\ 0 & -C\varphi_1 S(\varphi_2 + \varphi_3) & -C\varphi_1 C(\varphi_2 + \varphi_3) & -l_3 C(\varphi_2 + \varphi_3) C\varphi_1 \\ 0 & C(\varphi_2 + \varphi_3) & S(\varphi_2 + \varphi_3) & -l_3 S(\varphi_2 + \varphi_3) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \dot{\varphi}_3. \quad (2.41)
 \end{aligned}$$

Последний столбец матрицы  $T_{03}$  и последние столбцы матриц  $U_{31}, U_{32}, U_{33}$  дают возможность составить систему уравнений для определения обобщенных координат методом итераций:

$$\begin{cases}
 x_p = (l_3 S_{23}^{(k-1)} + l_2 S_2^{(k-1)}) S_1^{(k-1)} + (l_3 S_{23}^{(k-1)} + l_2 S_2^{(k-1)}) C_1^{(k-1)} (q_1^{(k)} - q_1^{(k-1)}) + \\
 + (l_3 C_{23}^{(k-1)} + l_2 C_2^{(k-1)}) S_1^{(k-1)} (q_2^{(k)} - q_2^{(k-1)}) + l_3 C_{23}^{(k-1)} S_1^{(k-1)} (q_3^{(k)} - q_3^{(k-1)}), \\
 y_p = -(l_3 S_{23}^{(k-1)} + l_2 S_2^{(k-1)}) C_1^{(k-1)} + (l_3 S_{23}^{(k-1)} + l_2 S_2^{(k-1)}) S_1^{(k-1)} (q_1^{(k)} - q_1^{(k-1)}) - \\
 - (l_3 C_{23}^{(k-1)} + l_2 C_2^{(k-1)}) C_1^{(k-1)} (q_2^{(k)} - q_2^{(k-1)}) - l_3 C_{23}^{(k-1)} C_1^{(k-1)} (q_3^{(k)} - q_3^{(k-1)}), \\
 z_p = l_1 + l_2 C_2^{(k-1)} + l_3 C_{23}^{(k-1)} - (l_2 S_2^{(k-1)} + l_3 S_{23}^{(k-1)}) (q_2^{(k)} - q_2^{(k-1)}) - \\
 - l_3 C_{23}^{(k-1)} (q_3^{(k)} - q_3^{(k-1)}),
 \end{cases} \quad (2.41)$$

где  $S_i = \sin \varphi_i$ ,  $C_i = \cos \varphi_i$ ,  $S_{23} = \sin(\varphi_2 + \varphi_3)$ ,  $C_{23} = \cos(\varphi_2 + \varphi_3)$ ,  $q_i = \pi\varphi_i/180$ .

Полученная система уравнений позволяет для заданных значений координат точки  $P(x_p, y_p, z_p)$ , используя значения обобщенных координат на предыдущем шаге  $q_i^{(k-1)}$ , определить уточненные значения обобщенных координат  $q_i^{(k)}$ . Итерационный процесс продолжается до получения необходимой точности. Метод последовательных приближений рекомендуется использовать при построении кинематических моделей малярных, бетоноукладочных, землеройных и др. строительных роботов, когда не предъявляется жестких требований к точности и результат может быть получен за 3—4 итерации.

## 2.4. Динамические модели строительных роботов

При проектировании строительных роботов, решении задач управления манипулятором, анализе кинематической структуры возникает необходимость рассмотрения динамики манипулятора и построения динамических моделей. В робототехнике предложено несколько методов математического описания движений роботов, которые ориентированы на применение компьютерных моделирующих программ. Эти методы основаны на использовании классических принципов и уравнений механики: принципы Гаусса и Даламбера, уравнения Лагранжа и Ньютона, метод связанных графов [32, 44]. Наиболее эффективными и проработанными являются методы, использующие уравнения Лагранжа 2-го рода, которые позволяют получить необходимые уравнения движения в явном виде. Вывод уравнений динамики движения манипулятора методом Лагранжа отличается простотой и единством подхода, что имеет существенное значение для динамических моделей строительных роботов. Уравнения Лагранжа 2-го рода обеспечивают строгое описание динамики манипулятора с учетом инерционных сил и моментов, сил и моментов реакций, вызванных ускорениями других сочленений. Они позволяют учесть центробежные и кориолисовы силы и моменты между сочленениями, а также гравитационные и нагрузочные силы и моменты в звеньях. Динамическая модель, построенная на основе уравнений Лагранжа—Эйлера, в основном используется для разработки усовершенствованных за-

конов управления в пространстве обобщенных координат. На основе этих уравнений можно получить достаточно простые законы управления манипулятором в реальном времени. Высокое быстроедействие средств современной вычислительной техники позволяет использовать в строительной робототехнике, несмотря на значительный объем вычислений, динамические модели, построенные на основе уравнений Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^k Q_{ij}, \quad (2.43)$$

где  $K = K(q_j, \dot{q}_j, t)$  — кинетическая энергия системы;  $\Pi = \Pi(q_j, t)$  — потенциальная энергия манипуляционной системы;  $Q_j$  — обобщенные силы и моменты, приложенные к  $j$ -приводе.

В качестве обобщенных сил в динамических моделях рассматриваются силы управляющих приводов, а также действие внешних сил на  $i$ -ое звено. Для получения динамической модели строительного робота следует иметь матрицы преобразования однородных координат  $T_i$  и определить кинетические и потенциальные энергии звеньев манипулятора и всей системы [44].

Уравнение кинетической энергии  $i$ -го звена манипулятора имеет вид:

$$K_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_i \cdot H_i \cdot \dot{T}_i^T), \quad (2.44)$$

где  $T_i$  — матрица преобразования из  $i$ -ой системы координат в основную,  $H_i$  — матрица инерции, характеризующая инерционные свойства  $i$ -го звена, записывается в виде:

$$H_i = \int R_i \cdot R_i^T dm = \begin{bmatrix} J_{xx}^{(i)} & J_{xy}^{(i)} & J_{xz}^{(i)} & S_x^{(i)} \\ J_{yx}^{(i)} & J_{yy}^{(i)} & J_{yz}^{(i)} & S_y^{(i)} \\ J_{zx}^{(i)} & J_{zy}^{(i)} & J_{zz}^{(i)} & S_z^{(i)} \\ S_x^{(i)} & S_y^{(i)} & S_z^{(i)} & m_i \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

где  $J_{xx}^{(i)} = \sum m_v x_v^2$ ;  $J_{yy}^{(i)} = \sum m_v y_v^2$ ;  $J_{zz}^{(i)} = \sum m_v z_v^2$  — главные моменты инерции;  $J_{xy}^{(i)} = J_{yx}^{(i)} = \sum m_{vi} x_{vi} y_{vi}$ ;  $J_{xz}^{(i)} = J_{zx}^{(i)} = \sum m_{vi} x_{vi} z_{vi}$ ;  $J_{zy}^{(i)} = J_{yz}^{(i)} = \sum m_{vi} y_{vi} z_{vi}$  — центробежные моменты инерции;  $S_x = \sum m_v x_v$ ;  $S_y = \sum m_v y_v$ ;  $S_z = \sum m_v z_v$  — статические моменты;  $m_i$  — масса  $i$ -го звена.

Полная кинетическая энергия манипулятора с  $n$  степенями подвижности равна сумме кинетических энергий ее звеньев:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i U_{ij} \cdot H_i \cdot U_{ik}^T \right) \cdot \dot{q}_j \cdot \dot{q}_k, \quad (2.46)$$

где  $U_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial q_j}$  — производная матрицы  $T_i$  по  $j$ -й обобщенной координате.

Потенциальная энергия манипулятора в поле сил тяжести равна:

$$\Pi = \sum \Pi_i = - \sum_{i=1}^n m_i \cdot G^T \cdot T_i \cdot R_i^*, \quad (2.47)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -го звена,  $G^T = [0, 0, g, 0]$  — вектор ускорения силы тяжести;  $R_i^*$  — вектор центра масс  $i$ -го звена в  $i$ -ой системе координат.

Подставив выражения для кинетической (2.46) и потенциальной (2.47) энергий в уравнения (2.45), получаем выражения для определения обобщенной силы  $Q_j$ , которую должен развивать привод  $i$ -го сочленения:

$$Q_j = \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^i \operatorname{tr}(U_{ij} \cdot H_i \cdot U_{ikl}^T) \cdot \dot{q}_l \cdot \dot{q}_k + \sum_{i=j}^n \sum_{k=1}^i \operatorname{tr}(U_{ij} \cdot H_i \cdot U_{ik}^T) \cdot \ddot{q}_k - \sum_{j=i}^n m_i \cdot G^T \cdot T_i \cdot R_i^* - Q_{jF}, \quad (2.48)$$

где  $Q_{jF}$  — действие внешних сил (нагрузки) на  $j$ -е звено.

Последнее выражение преобразуем к векторно-матричному виду:

$$Q(t) = A(q(t)) \cdot \ddot{q}(t) + B(q(t), \dot{q}(t)) + C(\dot{q}(t)) - Q_F(t), \quad (2.49)$$

где  $Q(t)$  — вектор обобщенных сил, действующих в степенях подвижности манипулятора;  $q(t)$  — вектор обобщенных координат;  $\dot{q}(t)$ ,  $\ddot{q}(t)$  — вектора обобщенных скоростей и ускорений;  $A(q)$  — матрица размерностью,  $n \times n$  элементы которой определяют инерционные свойства звеньев;  $B(\dot{q}, q)$  — вектор кориолисовых и центробежных сил;  $C(q)$  — вектор гравитационных сил;  $Q_F$  — вектор внешних возмущающихся сил.

Обобщенная сила,  $Q_j$  отнесенная к обобщенной координате  $q_j$  определяется через вектора силы  $F_0$  или момента  $M_0$ , которые должны быть приложены к рабочему органу:

$$Q_j = (M_j + n_{i,n} \times F_i) \cdot z_i^0 \rightarrow \text{ось вращения } z_i; \quad (2.50)$$

$$Q_j = (M_j + n_{i,n} \times F_i) \cdot x_i^0 \rightarrow \text{ось вращения } x_i,$$

где  $M_j = T_j^{-1} \cdot M_0$ ;  $F_j = T_j^{-1} \cdot F_0$  — заданные моменты и силы в системе координат  $j$ .

При формировании динамических законов управления определяются законы изменения скоростей  $\dot{q}_j(t)$  и ускорений  $\ddot{q}_j(t)$ . При этом используются законы изменения во времени обобщенных координат. На основе  $\dot{q}_j(t)$ ,  $\ddot{q}_j(t)$  вычисляются обобщенные силы  $Q_j$ . На стадии проектирования динамические модели позволяют определить законы изменения во времени обобщенных координат  $q_j(t)$ . Известными параметрами в данном случае являются обобщенные силы  $Q_j(t)$  и начальные значения обобщенных координат  $g_j(t_0)$  и скоростей  $\dot{q}_j(t_0)$ . При составлении динамических моделей строительных роботов должна учитываться кинетическая энергия не только звеньев, но и вращающихся приводов. При этом инерция вращательного движения зависит от конструктивного расположения приводов манипуляционной системы. В кинематическую энергию манипулятора включается кинетическая энергия звеньев передаточных механизмов, передающих движение от двигателей к несущим звеньям. Характерной особенностью строительно-монтажных и отделочных роботов является то, что в большинстве случаев их оси вращения являются одновременно осями их динамической симметрии. В таких роботах работа привода практически не изменяет положения общего центра масс и тензора инерции несущего звена.

Динамическая модель манипуляционной системы, кроме описанных уравнений динамики, должна включать уравнения динамики приводов, которые устанавливают соответствие между моментами, развиваемыми приводами, и вектором управляющих воздействий. Динамика привода обычно описывается системой уравнений, включающей уравнения двигателя и уравнения баланса моментов на его валу [29]. Независимо от вида привода уравнение моментов на валу двигателя записывается в виде:

$$J_j \frac{d\omega_j(t)}{dt} = M_{jd}(t) - M_{jn}(t), \quad (2.51)$$

где  $J_j$  — момент инерции вращающихся частей двигателя;  $M_{jd}$  — момент, развиваемый двигателем;  $M_{jn}$  — момент нагрузки, приведенный к валу двигателя. При описании динамики привода скоро-

сти, моменты инерции и моменты нагрузки приводятся к валу двигателя в соответствии с уравнениями:

$$J_{npj} = J_{\kappa j} / i_{pj}^2; \omega_j(t) = \omega_{\kappa j}(t) \cdot i_{pj}; M_{ндj}(t) = M_{nj} / (i_{pj} \cdot \eta_j), \quad (2.52)$$

где  $\eta_j$  — коэффициент полезного действия редуктора.

В общем случае момент нагрузки  $M_{nj}$  на валу двигателя  $j$ -го привода создается за счет действия последующих звеньев и объекта манипулирования:

$$M_{nj}(t) = M_{динj}(t) + M_{mj}(t) + M_{cmj}(t) + M_{енj}(t), \quad (2.53)$$

где  $M_{динj}(t)$  — динамический момент, связанный с инерционностью нагрузки;  $M_{mj}(t)$  — момент, создаваемый силами трения на валу нагрузки;  $M_{cmj}(t)$  — статический момент, обусловленный весом нагрузки;  $M_{енj}(t)$  — момент, создаваемый действием внешних сил.

Таким образом, любая динамическая модель робота включает в себя систему уравнений, описывающих динамику манипулятора и систему уравнений, описывающих динамику приводов. Так как приводы манипулятора имеют общую нагрузку, то математическую модель динамики строительных роботов следует рассматривать как единую многосвязанную систему дифференциальных уравнений, описывающих управляемые движения приводов и манипуляционной системы в целом. В общем случае динамическая модель любого строительного робота может быть представлена в виде векторных дифференциальных уравнений [22]:

$$\begin{aligned} A(g) \cdot \ddot{g}(t) + B(g(t), \dot{g}(t)) + C(g(t)) &= \sum M(t); \\ \dot{g}(t) &= F[g(t), U(t), \xi] + H(t); g(t_0) = g_0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

где  $M(t)$  — вектор моментов развиваемых приводами;  $x(t)$  —  $n$ -мерный вектор состояний исполнительных приводов;  $U(t)$  —  $m$ -мерный вектор управлений, вырабатываемый управляющей системой;  $\xi$  —  $p$ -мерный вектор параметров двигательной системы;  $x_0$  — вектор начального состояния;  $H(t)$  — вектор функции постоянно-действующих возмущений.

Методику построения динамических моделей строительных роботов рассмотрим на примерах. Причем, в виду громоздкости выражений, ограничимся фрагментом кинематической структуры (рис. 2.16), которая наиболее часто встречается в манипуляторах строительного-монтажных роботов. Для записи уравнений динамики используются матрицы перехода из локальных координат в ба-

зовую систему координат  $T_{01}, T_{02}, T_{03}$ , полученные при построении кинематической модели манипулятора. Кинетическую энергию манипулятора вычисляем, считая известными массы звеньев и моменты инерции. При этом будем считать, что центры тяжести звеньев лежат на осях поворота кинематических главные оси инерции совпадают с координатными осями. В этом случае кинетическая энергия первого звена равна

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 0.5tr(\dot{T}_1 H_1 \dot{T}_1^T) = \\
 &= 0.5 \begin{bmatrix} -S\varphi_1 & -C\varphi_1 & 0 & 0 \\ C\varphi_1 & -S\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{xx}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz}^{(1)} & m_1 z_1^* \\ 0 & 0 & m_1 z_1^* & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -S\varphi_1 & C\varphi_1 & 0 & 0 \\ -C\varphi_1 & -S\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \dot{\varphi}_1^2 = \\
 &= 0.5(J_{xx}^{(1)} + J_{yy}^{(1)}) \cdot \dot{\varphi}_1^2 = 0.5J_z^{(1)} \dot{\varphi}_1^2, \tag{2.55}
 \end{aligned}$$

где  $J_{xx}^{(1)}, J_{yy}^{(1)}, J_{zz}^{(1)}$  — моменты инерции звена 1 относительно осей  $x_1, y_1$  и  $z_1$ ;  $m_1$  — масса 1-го звена.

Аналогично получим кинетическую энергию второго и третьего звеньев:

$$\begin{aligned}
 K_2 &= 0.5tr(\dot{T}_2 H_2 \dot{T}_2^T) = \\
 &= \frac{1}{2} tr \left[ \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{T}_2}{\partial \varphi_1} \dot{\varphi}_1 + \frac{\partial \dot{T}_2}{\partial \varphi_2} \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} J_{xx}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy}^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz}^{(2)} & m_2 z_2^* \\ 0 & 0 & m_2 z_2^* & m_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{T}_2^T}{\partial \varphi_1} \dot{\varphi}_1 + \frac{\partial \dot{T}_2^T}{\partial \varphi_2} \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix} \right], \tag{2.56}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_3 &= 0.5tr(\dot{T}_3 H_3 \dot{T}_3^T) = \\
 &= \frac{1}{2} tr \left[ \left( \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \dot{T}_3}{\partial \varphi_i} \dot{\varphi}_i \right) \begin{bmatrix} J_{xx}^{(3)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy}^{(3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz}^{(3)} & m_3 z_3^* \\ 0 & 0 & m_3 z_3^* & m_3 \end{bmatrix} \left( \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \dot{T}_3^T}{\partial \varphi_i} \dot{\varphi}_i \right) \right], \tag{2.57}
 \end{aligned}$$

где  $J_{xx}^{(2)}, J_{yy}^{(2)}, J_{zz}^{(2)}$  — моменты инерции звена 2 относительно осей  $x_2, y_2$  и  $z_2$ ;  $J_{xx}^{(3)}, J_{yy}^{(3)}, J_{zz}^{(3)}$  — моменты инерции звена 1 относительно осей  $x_3, y_3$  и  $z_3$ ;  $m_2, m_3$  — масса 2-го и 3-го звеньев.

Полная кинетическая энергия манипулятора равна сумме кинетических энергий (2.55), (2.56) и (2.57):

$$K = 0.5[tr(\dot{T}_1 H_1 \dot{T}_1^T) + tr(\dot{T}_2 H_2 \dot{T}_2^T) + tr(\dot{T}_3 H_3 \dot{T}_3^T)]. \tag{2.58}$$

Потенциальная энергия манипулятора определяется на основе уравнения (2.46), как сумма потенциальных энергий звеньев. Потенциальная энергия первого звена равна

$$\Pi_1 = -m_1 G^T T_1 R_1^* = m_1 g (z_1^* + l_1). \quad (2.59)$$

Используя матрицы  $T_{02}$  и  $T_{03}$ , аналогичным образом получим выражения вычисления потенциальной энергии второго и третьего звеньев:

$$\Pi_2 = -m_2 G^T T_{02} R_2^* = -m_2 g (z_2^* \cos \varphi_2 + l_1 + l_2 \cos \varphi_2). \quad (2.60)$$

$$\Pi_3 = -m_3 G^T T_{03} R_3^* = -m_3 g (z_3^* \cos(\varphi_2 + \varphi_3) + l_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)) \quad (2.61)$$

Полную потенциальную энергию манипулятора получим про- суммировав выражения (2.58), (2.59) и (2.60):

$$\Pi = -(m_1 G^T T_1 R_1^* + m_2 G^T T_{02} R_2^* + m_3 G^T T_{03} R_3^*) \quad (2.62)$$

Используя уравнения для кинетической (2.58) и потенциальной (2.62) энергий, определяем составляющие уравнения (2.42) для каждой обобщенной координаты. В результате получим систему уравнений, составляющую динамическую модель рассматриваемо- го манипулятора:

$$\begin{cases} A_1(J_j^{(k)}, m_2, m_3, \varphi_2, \varphi_3) \ddot{\varphi}_1 + B_1(m_2, m_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) = Q_1 \\ A_2(J_j^{(l)}, m_2, m_3, \varphi_2, \varphi_3) \ddot{\varphi}_2 + B_2(m_2, m_3, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) + C_2(\varphi_2, \varphi_3) = Q_2 \\ A_3(J_j^{(3)}, m_3, \varphi_3) \ddot{\varphi}_3 + B_3(m_3, \dot{\varphi}_3) + C_3(\varphi_3) = Q_3 \end{cases} \quad (2.63)$$

На основе этих уравнений формируются законы изменения обобщенных сил, обеспечивающие требуемые законы изменения ускорений по каждой степени подвижности при обработке задан- ных траекторий.

## 2.5. Приводы строительных роботов и их динамические свойства

Приводы строительных роботов представляют собой систему технических средств, включающих двигатели, редукторы, датчики положения и скорости, регуляторы. Главными параметрами, определяющими свойства того или иного привода, являются: мощность, диапазон регулирования скорости, пределы изменения обобщен- ной координаты, точность обработки управляющих сигналов, бы-



стродействие [36]. Требования, предъявляемые к приводам роботов, в первую очередь определяются назначением робота. К основным особенностям приводов строительно-монтажных роботов следует отнести широкий диапазон изменения нагрузок, высокую точность выполнения установочных и ориентирующих движений манипулятора, возможность работы в заторможенном режиме, высокие требования к динамическим нагрузкам. Приводы бетоноукладочных роботов также должны обеспечивать устойчивую работу при значительных статических и динамических нагрузках, однако к точности позиционирования здесь не предъявляется столь жестких требований. Приводы отделочных роботов характеризуются достаточно узким диапазоном изменения нагрузок и относительно невысокой точностью позиционирования. Они должны обладать компактностью, малым весом, а приводы малярных роботов, кроме того, должны иметь искробезопасное или закрытое исполнение.

Анализ приводов строительной техники и промышленных роботов показал, что в строительных роботах, в зависимости от их назначения и специализации, могут применяться электрические, гидравлические и пневматические приводы. Для строительно-монтажных роботов наиболее подходящими являются электрические и гидравлические приводы, в то время как для отделочных роботов — электрические и пневматические. В бетоноукладочных роботах предпочтение следует отдавать гидравлическим приводам. Кроме того, если электрические приводы являются основным типом в роботах с контурным и адаптивным управлением, то гидравлические следящие привода применяются лишь в роботах большой грузоподъемности, выполняющих транспортные и монтажные операции. Пневматические приводы могут использоваться лишь в роботах небольшой грузоподъемности (до 10 кг) с цикловым управлением. В данном разделе рассмотрим особенности и динамические свойства каждого вида привода.

Электропривод является основным приводом строительных роботов. Он имеет следующие преимущества: компактность, доступность энергии на строительных площадках, легкость регулирования, высокое стродействие, жесткость нагрузочной характеристики, широкий диапазон изменения моментов нагрузки, высокая точность позиционирования, способность к динамическим нагрузкам, возможность длительной работы в заторможенном режиме и высокий показатель надежности. В манипуляторах строительных

роботов рекомендуется использовать электродвигатели постоянного тока и асинхронные двигатели с частотным регулированием.

Из электродвигателей постоянного тока предпочтение отдается двигателям с независимым возбуждением и полым или дисковым якорем. Такие конструкции якоря снижают инерционность двигателя и значительно улучшают его динамические свойства. Двигатели с дисковым якорем, кроме того, имеют наиболее компактную конструкцию. К основным недостаткам такого привода следует отнести наличие коллектора и зависимость скорости от нагрузки. Эта зависимость может быть значительно снижена введением дополнительных обратных связей по току и скорости [29].

В общем случае следящий электропривод постоянного тока можно представить в виде физической модели, приведенной на рис. 2.17. Он состоит из двигателя 1, развивающего вращающий электромагнитный момент  $M$ , редуктора 2 с коэффициентом передачи  $k_n$  и нагрузки 3, к которой прикладывается со стороны двигателя момент  $M_n$ . Система привода характеризуется углами поворота вала двигателя  $\varphi$  и вала нагрузки  $\varphi_n$ , а также моментами инерции: якоря двигателя  $J_y$ , редуктора  $J_p$ , нагрузки  $J_n$ . Электродвигатель развивает вращающий момент  $M$ , который через редуктор преобразуется в момент  $M_n$ , прикладываемый к нагрузке. Силы сопротивления в двигателе и редукторе создают момент  $M_c$ , приведенный к валу двигателя, а на валу нагрузки действует момент сил сопротивления  $M_{cn}$ . При этом на систему действует возмущающий момент  $M_B$ . В качестве управляющего сигнала удобно использовать напряжение питания якорной цепи  $U_y$ . Движение рассматриваемой системы опишем уравнением вида:

$$[J_y + (J_p + J_n)i^{-2}] \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M - [M_c + (M_{cn} + M_e)k_n^{-1}]. \quad (2.64)$$

Момент нагрузки зависит от параметров движения и в основном определяется силами сухого трения. В приводах строительных

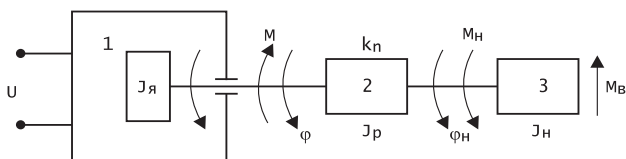


Рис. 2.17. Физическая модель двигателя постоянного тока

роботов его можно аппроксимировать функцией вида  $M_n = M(\omega) = c \operatorname{sign} \omega$ , где  $\omega$  — угловая скорость.

Основными параметрами электропривода постоянного тока являются момент  $M$ , развиваемый двигателем, и угловая скорость  $\omega$ . Момент двигателя  $M$  определяется током якоря  $I_a$ :  $M = C_m I_a$ , где  $C_m$  — коэффициент момента. Угловая скорость якоря в установившемся режиме определяется из уравнения электрического равновесия:  $\omega = (U_y - I_a R_a) / C_e$ , где  $C_e$  — коэффициент противоЭДС,  $R_a$  — активное сопротивление якоря.

Выбор привода и построение алгоритмов управления производятся на основе механических и регулировочных характеристик. Механическая характеристика  $M = f(U, \omega)$  (рис. 2.18) является обобщенной характеристикой двигателя и позволяет оценить влияние на скорость двигателя  $\omega$  момента нагрузки  $M_n$  и зависимость ее от напряжения управления  $U_y$ . Используя приведенные соотношения, механическую характеристику можно описать уравнением вида:

$$M = \frac{C_m}{R_a} U_y - \frac{C_e C_m}{K_a} \omega = M_n - k_d \omega, \quad (2.65)$$

где  $M = (C_m / R_a) U_y$  — пусковой момент при  $\omega = 0$ ;  $k_d = (C_e C_m / R_a)$  — коэффициент демпфирования, определяющий наклон (жесткость) механической характеристики.

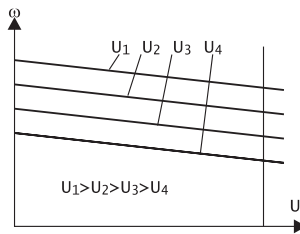


Рис. 2.18. Механические характеристики двигателя постоянного тока

Устойчивость двигателя повышается при увеличении коэффициента демпфирования  $k_d$ . Это связано с увеличением жесткости механических характеристик, т. е. уменьшением зависимости угловой скорости от изменения внешней нагрузки. Управления роботом может осуществляться на базе регулировочных характеристик по скорости  $\omega = f(U)$  и по моменту  $M = f(U)$ . Регулировочная характеристика по скорости  $\omega = f(U)$  (рис. 2.19) описывается уравнением:

$$\omega = \frac{1}{C_e} \cdot U_y - \frac{1}{F} \cdot M = k_\delta \cdot U_y - \frac{1}{F} \cdot M_n / k_n, \quad (2.66)$$

где  $k_\delta$  — коэффициент передачи двигателя по скорости,  $k_n$  — передаточное отношение редуктора. При отсутствии нагрузки регулировочная характеристика проходит через начало координат, а при действии момента нагрузки  $M_n$  она смещается на расстояние, определяемое величиной  $M_n$ . Так как в двигателе существует момент статического трения  $M_{mp}$ , то интерес представляет напряжение трогания  $U_{mp}$ , определяющее статическую ошибку регулирования:  $U_{mp} = C_e \cdot M_m / F$ . Для управления монтажными и др. роботами, выполняющими силовые операции, интерес представляют регулировочные характеристики по моменту:

$$M = (C_m / R_\alpha) U_y = (k_\delta / C_e) U_y. \quad (2.67)$$

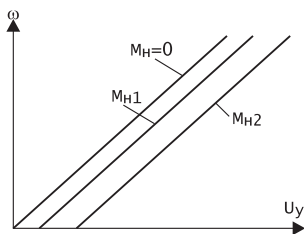


Рис. 2.19. Регулировочные характеристики двигателя постоянного тока

Динамические свойства двигателей постоянного тока описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} C_e \cdot \omega + i_\alpha \cdot R_\alpha + L_\alpha \dot{i}_\alpha = U_y \\ J \dot{\omega} = M - M_n' \\ \alpha_\delta = \int \omega \cdot dt \end{cases} \quad (2.68)$$

где  $L$  — индуктивность обмотки якоря;  $J$  — полный момент инерции, приведенный к валу двигателя;  $M$  — вращающий момент;  $M_n'$  — приведенный момент нагрузки. Первое уравнение является уравнением электрического равновесия якорной цепи двигателя, а второе — уравнением механического равновесия. При этом эквивалентный момент инерции  $J$  привода имеет вид:

$$J = J_\alpha + (J_p + J_n) \cdot k_n^{-2}, \quad (2.69)$$

где  $J_y$  — момент инерции якоря;  $J_p$  — момент инерции редуктора;  $J_n$  — момент инерции нагрузки;  $k_n = n_1/n_2$  — коэффициент передачи.

Результирующий момент сопротивления  $M_c$ , приведенный к валу двигателя, составляет

$$M_c = M_{cd} + (M_{cp} + M_n) \cdot k_n^{-1}, \quad (2.70)$$

где  $M_{cd}$  — момент сил сопротивления двигателя и редуктора;  $M_{cp}$  — момент сил сопротивления на валу нагрузки;  $M_n$  — момент внешних сил. Моменты сил сопротивления с достаточной степенью точности определяются из выражений:

$$M_{cd} = M_{mpoz} \operatorname{sign}(\omega) = I_{xx} M_{ном} / I_{ном}; \quad (2.71)$$

$$M_{cp} = M_{px} + k_{mp} M / i + k_{ze} M / k_n, \quad (2.72)$$

где  $\omega$  — скорость вала двигателя;  $M_{mpoz}$  — момент трогания вала двигателя;  $I_{xx}$  — ток холостого хода;  $I_{ном}$ ,  $M_{ном}$  — номинальные ток и момент двигателя;  $k_{mp}$  и  $k_{ze}$  — коэффициенты трения редуктора и кинематической пары.

Момент нагрузки или момент внешних сил  $M_n$  обычно определяется через модуль результирующего вектора  $F_e$  внешних сил:  $M_n = F_e r_e$ , где  $r_e$  — расстояние до вектора  $F_e$  от оси вращения. К внешним силам относятся силы, прикладываемые к кинематической паре при взаимодействии с деталями и другими звеньями.

На основе приведенных соотношений получим дифференциальное уравнение, описывающее динамику двигателя как объекта управления:

$$\frac{J \cdot L_y}{C_e \cdot C_m} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{J \cdot R_y}{C_e \cdot C_m} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{C_e} U_y + \frac{R_y}{C_e \cdot C_m} M_c + \frac{1}{C_e \cdot C_m} \cdot \frac{dM_c}{dt}. \quad (2.73)$$

Обычно, в рассмотрение динамики привода вводят постоянные времени: электромагнитную  $T_\omega = L_y/R_y$ , характеризующую скорость нарастания момента в заторможенном режиме; механическую  $T_m = J \cdot R_y / (C_e \cdot C_m)$ , характеризующую нарастание скорости. С учетом постоянных времени  $T_\omega$  и  $T_m$  уравнение (2.73) примет вид

$$T_\omega \cdot T_m \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_c \cdot U_y + \frac{1}{F_i} \cdot M_c + \frac{T_\omega}{F_i} \cdot \frac{dM_c}{dt}, \quad (2.74)$$

где  $k_c$  — коэффициент передачи двигателя по скорости.

Для анализа динамики и синтеза управляющего воздействия лучше использовать передаточные функции. Передаточная функ-

ция двигателя постоянного тока по управляющему воздействию (при  $M_c = 0$ ) равна:

$$W_\alpha(s) = \frac{\alpha(s)}{U_y(s)} = \frac{k_\partial}{(T_\partial \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1) \cdot s}. \quad (2.75)$$

Влияние внешних сил на работу привода оценивается с помощью динамической модели, включающую передаточную функцию по возмущающему воздействию:

$$W_f(s) = \frac{\alpha}{M_c} = \frac{(1/F_i)(1 + T_\partial s)}{(T_\partial T_M s^2 + T_M s + 1)s}. \quad (2.76)$$

В строительных роботах для большинства используемых двигателей постоянного тока  $T_M \gg T_\partial$ . Это дает возможность пренебречь постоянной времени  $T_\partial$  и использовать передаточные функции вида

$$W_\omega(s) = \frac{k_\partial}{T_M s + 1}; W_\alpha(s) = \frac{k_\partial}{(T_M s + 1)s}; W_f(s) \approx \frac{1/F_i}{(T_M s + 1)s}. \quad (2.77)$$

При выполнении роботом силовых операций дифференциальное уравнение для момента двигателя определяется из выражения

$$T_\partial \frac{dM}{dt} + M = \frac{C_M}{R_\partial} U - \frac{C_e C_M}{R_\partial} \omega, \quad (2.78)$$

в соответствии с которым передаточная функция для момента двигателя при работе манипулятора на упор при выполнении силовых операций имеет вид:

$$W_M(s) = \frac{M(s)}{U_y(s)} = \frac{C_M/R_\partial}{T_\partial s + 1}. \quad (2.79)$$

Улучшение динамических свойств привода можно достичь введением обратной связи по току. Это позволяет стабилизировать характеристики привода в широком диапазоне изменения нагрузок, что характерно для большинства видов строительных роботов.

В строительных роботах рекомендуется использовать сервоприводы постоянного тока с обратными связями по скорости, току и положению [36]. Общая схема такого электропривода включает регуляторы тока РТ, скорости РС и положения РП (рис. 2.20). Обратные связи обеспечиваются датчиками тока ДТ, скорости ДС и

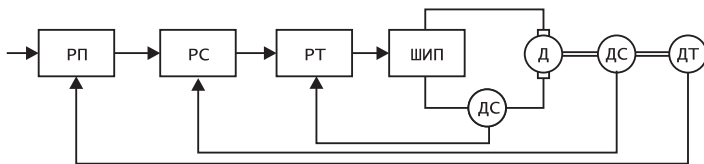


Рис. 2.20. Структурная схема сервопривода постоянного тока

положения ДП. В состав регулятора привода включается широтно-импульсный преобразователь ШИП.

При этом необходимо отметить, что сервоприводы с обратными связями по скорости и току в большинстве случаев представляют аналоговые устройства подчиненного регулирования, а внешний контур по положению с цифровым регулированием реализуется на тактическом уровне и обеспечивает требуемую точность перемещения звеньев. В качестве датчиков скорости лучше использовать тахогенераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Измерение перемещения звеньев выполняется с помощью инкрементных или кодовых фотоэлектрических датчиков. Современные приводы роботов конструктивно объединяют двигатель с датчиками скорости и положения. В качестве закона управления рекомендуется использовать ПИД-регуляторы.

Электрогидравлический привод применяется для строительных роботов большой грузоподъемности, в которых кроме значительной полезной нагрузки имеют место значительные инерционные нагрузки от подвижных звеньев манипуляционной системы. Использование гидропривода позволяет получить необходимые динамические характеристики, обеспечить значительное снижение массы робота и достичь наилучших энергетических показателей. Гидравлические приводы позволяют развивать большие крутящие моменты и усилия, обладают высоким быстродействием и точностью, имеют простую реализацию возвратно-поступательного движения. Основными направлениями применения гидроприводов в строительной робототехнике являются манипуляторы и роботы для выполнения строительного-монтажных, бетоноукладочных, землеройных работ, порталные роботы для погрузочно-разгрузочных работ на предприятиях стройиндустрии. Анализ особенностей строительных роботов показал, что в них могут использоваться линейные гидроцилиндры двухстороннего действия и поворотные гидродвигатели с ограниченным углом поворота выходного вала. Скорость перемещения исполнительных гидродвигателей регули-

руются дросселями. Для запираания полостей при выключении гидропривода следует использовать гидрозамки или блокирующие золотники с электроуправлением.

Весьма эффективно в промышленных роботах применяется следящий гидропривод. Следящий гидропривод может также успешно использоваться в строительных роботах с позиционным и с контурным управлением. В качестве гидравлических следящих систем в роботах применяются гидроприводы с дроссельным и объемным регулированием скорости выходного звена. По виду управляющего сигнала следящие гидроприводы с дроссельным управлением делятся на две группы: с непрерывным и дискретным управляющим сигналом. В строительных роботах предпочтение следует отдавать следящему дроссельному гидроприводу с непрерывным управлением, а также гидроприводу с широтно-импульсным управлением. Типовая схема следящего гидропривода с непрерывным управляющим сигналом и двухкаскадным электрогидравлическим усилителем, представлена на рис. 2.21. При поступлении на вход элемента сравнения ЭС управляющего сигнала  $U_y$  происходит его сравнение с сигналом обратной связи. Сигнал рассогласования поступает на вход преобразующего устройства ПР, которое формирует необходимый закон управления. Сформированное регулирующее воздействие через усилитель мощности УМ подается на электромеханический преобразователь ЭМП гидравлического усилителя типа сопло-заслонка с пружинной обратной связью. Выходным каскадом гидравлического усилителя является золотниковый распределитель ЗР. В соответствии со знаком и уровнем управляющего сигнала  $U_y$  золотниковый гидрораспределитель смещается относительно нейтрального положения на определенную величину в ту или иную сторону. Это вызывает движение в соответствующую сторону поршня гидроцилиндра и изменение положения датчика Д обратной связи. Движение поршня гидроцилиндра будет происходить до тех пор, пока сигнал отрицательной обратной связи  $U_{oc}$  не сравняется по модулю с управляющим сигналом  $U_y$ . В этом случае золотниковый распределитель займет нейтральное положение и движение поршня гидроцилиндра прекратится.

Учитывая предпочтительные стороны следящего гидропривода с дроссельным управлением для строительной робототехники, остановимся на рассмотрении его статических и динамических характеристик, математическом описании [36]. Основной статиче-



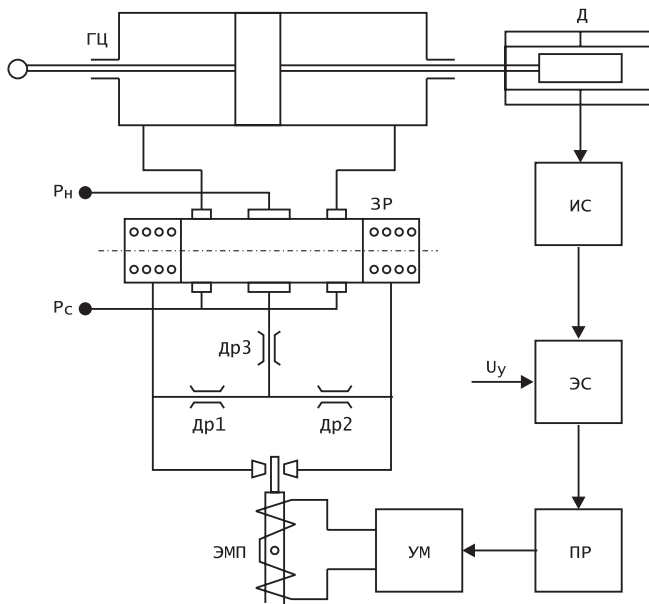


Рис. 2.21. Типовая схема следящего гидропривода

ской характеристикой является зависимость скорости перемещения подвижного элемента от рассогласования. В относительных единицах статическая характеристика имеет вид:

$$\bar{V} = 0,5 \left[ (1 + \bar{h}) \sqrt{1 - \bar{F}} - (1 - \bar{h}) \sqrt{1 - \bar{F}} \right], \quad (2.80)$$

где  $\bar{V} = V/V_{\max}$  — относительная скорость;  $\bar{h} = h/h_{\max}$  — относительное рассогласование;  $\bar{F} = F/F_{\max}$  — относительная нагрузка.

При постоянном коэффициенте расхода и идеальном золотнике нагрузочная характеристика выражается упрощенной характеристикой:

$$V = V_{\max} \sqrt{1 - \bar{m}/F_{mp}}, \quad (2.81)$$

где  $V$  — текущее значение скорости подвижного элемента;  $V_{\max}$  — скорость подвижного элемента без нагрузки;  $F$  — текущее значение усилия, развиваемое поршнем;  $F_{mp}$  — тормозное усилие, развиваемое на подвижном элементе.

Зона нечувствительности определяется значением рассогласования, необходимого для начала движения привода, и ее относительная величина равна

$$\bar{h}_o = 2(1 + \sqrt{1 - \bar{F}_o}), \quad (2.82)$$

где  $\bar{F}_o$  — относительная сила трения покоя.

Анализ статических и динамических характеристик следящего гидропривода производится на основании значений коэффициентов усиления по скорости и нагрузке и по постоянной времени. Коэффициент усиления по скорости характеризует зависимость рассогласования от скорости слежения при отсутствии нагрузки:

$$k_v = \left. \frac{dV}{dh} \right|_{P=0} = \frac{2b\mu n}{S} \sqrt{\frac{g}{\gamma}} P_n, \quad (2.83)$$

где  $b$  — длина рабочей щели золотника;  $S$  — площадь поршня гидроцилиндра;  $\mu$  — коэффициент расхода;  $n$  — передаточное отношение между рассогласованием следящего привода и смещением золотника;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\gamma$  — плотность рабочей жидкости. Относительное значение коэффициента усиления по скорости составляет  $\bar{k}_v = \left. \frac{d\bar{V}}{d\bar{h}} \right|_{\bar{P}=0} = 1$ , а при изменении нагрузки этот коэффициент изменяется не более чем на 10%.

Коэффициент усиления по нагрузке характеризует зависимость рассогласования от нагрузки и определяется по формуле:

$$\bar{k}_p = \left. \frac{d\bar{F}}{d\bar{h}} \right|_{V=0} = \frac{P_n S n}{\delta_o} \sqrt{1 - \bar{F}^2} (1 + \sqrt{1 + \bar{F}^2}), \quad (2.84)$$

где  $\delta_o$  — линейный зазор между рабочими кромками золотника и золотниковой втулки в нейтральном положении.

Постоянная времени рассматриваемого гидропривода определяется по формулам:

$$T = \frac{1}{b\mu} \sqrt{\frac{S_1^3 + S_2^3}{S_2 P_n - S_1 P_c}} \cdot \frac{\rho}{2} \rightarrow S_1 \neq S_2 \quad \text{или} \quad T = \frac{1}{b\mu} \sqrt{\frac{\rho}{P_n - P_c}} \rightarrow S_1 = S_2, \quad (2.85)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей жидкости.

Рассмотренные параметры используются при построении динамических моделей и проектировании гидроприводов строительных роботов. Из характеристик при выборе привода и его расчете в первую очередь представляет интерес группа статических характе-

ристик гидропривода, включающая механическую, регулировочную скоростную и регулировочную по перепаду давлений. Механическая нагрузочная характеристика для гидропривода с дроссельным регулированием определяет функциональную зависимость скорости выходного звена  $V$  от перемещения золотникового распределителя  $\delta$  и от перепада давлений  $\Delta P$ :

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{dx}{dt} = f(\delta, \Delta P) = \\
 &= k_v \delta \sqrt{\Delta P_o - \Delta P \operatorname{sgn} \delta} - k_n \Delta P, \\
 0 &\leq |\delta| \leq \delta_{\max},
 \end{aligned}
 \tag{2.86}$$

где  $k_n$  — коэффициент пружинной нагрузки распределителя. График механической характеристики приведен на рис. 2.22.

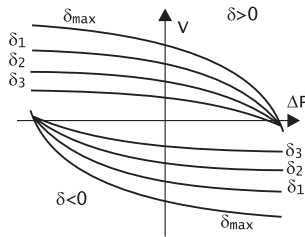


Рис. 2.22. Механические нагрузочные характеристики гидропривода с дроссельным регулированием

Регулировочная характеристика определяет в установившемся режиме функциональную зависимость скорости штока гидроцилиндра от перемещения золотника  $v(\delta)$  на холостом ходу ( $\Delta P = 0$ ):

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{dx}{dt} = k_v \delta \sqrt{\Delta P_o} \rightarrow 0 \leq \delta \leq \delta_{\max}, \\
 V &= \frac{dx}{dt} = k_v \delta_{\max} \sqrt{\Delta P_o} \rightarrow |\delta| \geq \delta_{\max}.
 \end{aligned}
 \tag{2.87}$$

График регулировочной характеристики приведен на рис. 2.23, а. Силовая характеристика (регулировочная характеристика по перепаду давления) определяет функциональную зависимость перепада давлений при неподвижном (заторможенном) выходном звене от координаты  $\delta$ :

$$\Delta P = \frac{k_v \delta}{2k_{nep}^2} \left[ \sqrt{k_v^2 \delta^2 - 4k_{nep}^2 \Delta P_o} - k_v |\delta| \right] \rightarrow 0 \leq \delta \leq \delta_{max}, \quad (2.88)$$

$$\Delta P = \frac{k_v \delta_{max}}{2k_{nep}^2} \left[ \sqrt{k_v^2 \delta_{max}^2 - 4k_{nep}^2 \Delta P_o} - k_v |\delta|_{max} \right] \rightarrow |\delta| \geq \delta_{max}.$$

График регулировочной характеристики по перепаду давлений изображен на рис. 2.23,б. В общем случае для удобства математического описания гидропривода его следует представлять в виде структурной схемы (рис. 2.24).

Динамические свойства усилительно-преобразующих элементов и датчиков положения описывается апериодическими звеньями первого порядка, которые в большинстве случаев могут быть сведены к пропорциональным звеньям. Математическое описание гидропривода с дроссельным управлением носит нелинейный характер из-за нелинейности нагрузочной характеристики, а также

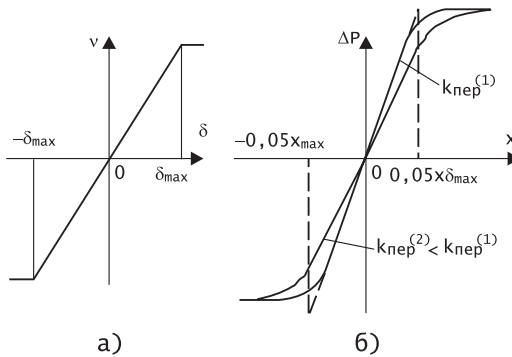


Рис. 2.23. Регулировочные характеристики гидропривода с дроссельным управлением

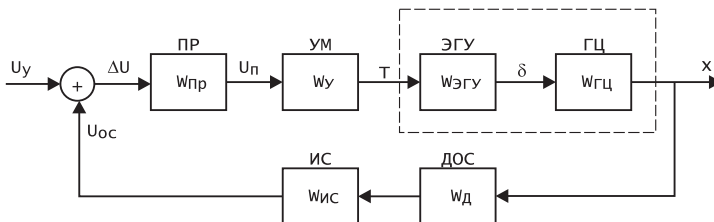


Рис. 2.24. Структурная схема следящего гидропривода

ограничений по скорости и давлению, утечек и сжимаемости рабочей жидкости.

Динамическая модель рассматриваемого следящего привода может быть получена на основании рассмотрения линеаризованных моделей гидроцилиндра с золотниковым распределителем и электрогидравлического усилителя. Передаточная функция  $W_{zu}$  гидроцилиндра с золотниковым распределителем определяется на основе следующих уравнений:

уравнения нагрузочной характеристики золотникового распределителя

$$m_{np} \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + P_{mp} = SP; \quad (2.89)$$

уравнений располагаемого расхода ( $Q_p$ ) золотникового распределителя и потребного расходов ( $Q_n$ ) гидроцилиндра:

$$Q_p = k_3 x - \left| \frac{dQ}{dP} \right| P; \quad Q_n = S dx/dt, \quad (2.90)$$

где  $m_{np}$  — масса подвижных частей привода;  $f$  — коэффициент вязкого трения;  $S$  — рабочая площадь поршня гидроцилиндра;  $P$  — текущее значение давления;  $k_3 = S_0 \mu \sqrt{P_n g / \gamma}$  — коэффициент усиления золотникового распределителя;  $|dQ/dP|$  — крутизна расходной характеристики.

После их линеаризации и выполнения преобразования Лапласа можно записать передаточную функцию золотниковый распределитель — гидроцилиндр:

$$W_{zu}(s) = k_y / (T_m s^2 + s + f(P)), \quad (2.91)$$

$$k_y = k_3 \beta / k_u; \quad T_m = k_u^2 m_{np} \beta |dQ/dP|;$$

$$\beta = (fk_u^2 |dQ/dP| + 1)^{-1}; \quad f(P) = \frac{P_{mp}(s)\beta}{x(s)k_u} \left| \frac{dQ}{dP} \right|.$$

Нелинейная функция  $f(P)$  на холостом ходе имеет нулевое значение.

Динамический режим работы электрогидравлического усилителя типа «сопло — заслонка» с пружинной обратной связью может быть описан системой линеаризованных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} T_L \frac{di}{dt} + i = k_R U; \\ T_{эм}^2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\zeta_{эм} T_{эм} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = k_\alpha i_\alpha; \\ a_2 \frac{d^2\delta}{dt^2} + a_1 \frac{d\delta}{dt} = i - i_\alpha; \\ T_{эу}^2 \frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\zeta_{эу} T_{эу} \frac{d\delta}{dt} + \delta = k_n \alpha, \end{cases} \quad (2.92)$$

где  $T_L, T_{эм}$  — постоянные времени обмотки управления и электро-механического преобразователя,  $T_{эу}$  — обобщенная постоянная времени гидроусилителя с обратной связью;  $\zeta_{эм}$  — коэффициент демпфирования электро-механического преобразователя;  $\zeta_{эу}$  — относительный коэффициент передачи гидроусилителя;  $k_R$  — коэффициент сопротивления цепи управления;  $k_\alpha$  — крутизна токовой характеристики электро-механического преобразователя;  $k_n$  — коэффициент передачи гидроусилителя;  $a_1, a_2$  — динамические коэффициенты обратной связи электрогидравлического преобразователя;  $\alpha$  — угол поворота якоря преобразователя;  $i$  — ток управления;  $i_\alpha$  — ток якоря преобразователя. На основании этой системы уравнений и с учетом замедления перепада давлений в золотнике гидроусилителя  $\tau$  запишем передаточную функцию электрогидравлического усилителя:

$$W(s) = \frac{h(s)}{U(s)} = \frac{k_R k_\alpha k_n e^{-\tau s}}{(T_L s + 1)(T_n^2 s^2 + 2\zeta_n T_n s + 1)}, \quad (2.93)$$

где  $T_n = \sqrt{T_{эм}^2 + 2\zeta_{эм} T_{эм} T_m + a_2 k_\alpha k_n}$  — обобщенная электро-механическая постоянная времени электрогидравлического преобразователя;

$$\zeta_n = \frac{2\zeta_{эм} T_{эм} + T_m + a_1 k_\alpha k_n}{2\sqrt{T_{эм}^2 + 2\zeta_{эм} T_{эм} T_m + a_2 k_\alpha k_n}} — обобщенный коэффициент$$

демпфирования электрогидравлического преобразователя.

## **Глава 3. Информационно-измерительные системы строительных роботов**

Системы управления роботами оснащаются техническими средствами для получения информации о внутреннем состоянии робота и о внешней среде, а также блоками переработки информации. Задачи информационной системы роботов заключаются в необходимости быстрого и точного выявления состояния самого робота и свойств внешней среды, обработке полученной информации и передаче ее в подсистему формирования управляющих сигналов на исполнительные органы. Соответственно этому и средства информации разделяют на две группы. К первой — относят датчики обратной связи, измеряющие состояние узлов робота (манипулятора, схвата, средств передвижения), ко второй — устройства очувствления роботов, предназначенные для получения информации об окружающей среде и объектах, взаимодействующих с манипуляторами [49].

### **3.1. Измерительные преобразователи параметров манипуляционной системы**

Основными требованиями, предъявляемыми к измерительным преобразователям (датчикам) строительных роботов, являются высокие эксплуатационные характеристики и обеспечение необходимой точности измерения. Датчики должны быть устойчивы к механическим воздействиям (ударам, вибрациям), к эксплуатации в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжений и частоты, а также к работе в условиях изменения параметров окружающей среды (температуры, влажности). Они должны обладать повышенной надежностью и помехоустойчивостью, иметь абсолютный отсчет перемещений, простую регулировку и обслуживание, малую стоимость.

Общая классификация датчиков по назначению и частоте их использования в промышленных роботах в зависимости от задач управления и регулирования приведена на рис. 3.1 [51].

Основу информационных систем строительных роботов и манипуляторов составляют датчики положения, скорости, ускорения и перемещения подвижных частей робота. В качестве датчиков пере-

мещения используют устройства, преобразующие угловые и линейные перемещения степеней подвижности манипулятора в пропорциональный электрический сигнал. В строительных роботах из широкого спектра разновидностей датчиков наибольшее распространение получили аналоговые и цифровые датчики с абсолютным отсчетом, а также цифровые импульсные датчики с относительным отсчетом. Из аналоговых датчиков предпочтительными являются потенциометры, вращающиеся трансформаторы, индуктосины.

Потенциметрические датчики преобразуют механическое перемещение в изменение сопротивления резистора, скользящий контакт которого связан с управляемым механизмом. Эти датчики относятся к устройствам с абсолютным отсчетом. Выходным параметром таких датчиков является напряжение, представляющее линейную функцию угла поворота или линейного перемещения. При ненагруженном датчике напряжение выхода  $U_{вых}$  и угол поворота  $\varphi$  связаны зависимостью:  $U_{вых} = U_n (\gamma_{\partial} \varphi / R_{\partial})$ , где  $U_n$  — напряжение питания датчика (стабилизированное);  $R_{\partial}$  — полное сопротивление.

Регулируемые величины									
№	С	О	П	У	№	С	О	П	У
1		◐	●		9	●		◐	
2			●		10	◐	○	○	●
3		◐	●		11		◐	◐	●
4		●	●		12	◐	●	●	
5			●		13	●		◐	
6			●		14	●		◐	
7	●	◐	○		15	◐	○	○	●
8	●	◐	○		16		◐	●	
	●		○			○	◐	●	○

Рис. 3.1. Классификация датчиков по назначению и частоте их использования в промышленных роботах

С — скорость; О — ориентация; П — позиционирование; У — усилие  
 1 — общее манипулирование; 2 — сортировка; 3 — пакетирование;  
 4 — стационарный монтаж; 5 — точечная сварка; 6 — шовная сварка; 7 — кислородная резка; 8 — нанесение краски; 9 — монтаж в движении; 10 — шлифовка; 11 — сборка; 12 — обработка лазерным лучом; 13 — нанесение клея; 14 — полировка; 15 — инспекция; 16 — передача потенциометра;  $\gamma_{\partial}$  — коэффициент преобразования датчика



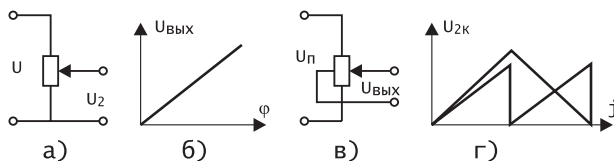


Рис. 3.2. Потенциметрические датчики перемещений и их характеристики

а) — схема включения обычного датчика; б) — схема включения реверсивного датчика; в), г) — статические характеристики датчиков

На рис. 3.2 представлены две схемы датчиков и их статические характеристики.

Потенциметрические датчики отличаются простотой конструкции, малыми габаритами и низкой стоимостью. В строительных роботах можно использовать однооборотные и многооборотные потенциометры с погрешностью 0,1—0,05%. Однако, ограниченная разрешающая способность, сравнительно малая износостойкость ( $10^6$ — $10^7$  поворотов), ограниченная скорость вращения (100—200 об/мин) сужают область использования этих датчиков.

Сложные условия работы строительных роботов требуют использования датчиков повышенной надежности, высокой помехозащищенности, ударостойкости и виброустойчивости. Этим условиям удовлетворяют вращающиеся трансформаторы, представляющие собой индукционную микромашину переменного тока неявнополюсного типа, у которой выходное напряжение является функцией угла поворота ротора [35]. В статоре и роторе вращающегося трансформатора располагаются по 2 обмотки, электрические оси которых взаимно перпендикулярны. В статоре размещаются обмотки возбуждения и квадратурная, а в роторе — синусная и косинусная обмотки. Данный вид датчиков обладает хорошей разрешающей способностью, высокой чувствительностью, виброустойчивостью. Вращающиеся трансформаторы как датчики положения звеньев манипулятора включаются в режиме фазовращателя. В этом режиме, для получения вращающегося магнитного поля, на статорные обмотки подаются синусоидальные напряжения со сдвигом по фазе на  $90^\circ$ :  $U_{c1} = U_{cm} \sin(\omega t)$  и  $U_{c2} = U_{cm} \sin(\omega t + \pi/2)$ . Напряжения на роторных обмотках связаны с напряжениями  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  зависимостью  $U_{p1} = k \cos \alpha$ ;  $U_{p2} = k \sin \alpha$ , где  $k$  — коэффициент трансформации. При изменении угла поворота ротора  $\alpha$  изменяет-

ся фаза выходного напряжения. На рис. 3.3 показана схема фазовращателя, построенного на основе синусно-косинусного вращающегося трансформатора. Выходное напряжение  $U_{вых}$  связано с напряжениями статора  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  и зависимостью:

$$U_{вых} = k \cdot (U_{c1} \cos \alpha + U_{c2} \sin \alpha) = k \cdot U_{cm} \sin(\omega t + \alpha).$$

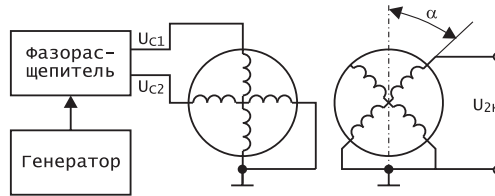


Рис. 3.3. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Частота напряжения питания выбирается в диапазоне 400—4000 Гц. Вращающиеся трансформаторы с одной парой полюсов в режиме фазовращателя имеют погрешность не более  $\pm (15—25)$  угл. мин. Значительно большей точностью обладают многополюсные синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы. Так фазовращающий трансформатор с четырьмя парами полюсов дает погрешность не более 30 угл. сек. Высокая помехоустойчивость фазового параметра является положительным фактором для строительных роботов, учитывая возможные значительные удаления датчиков от систем управления. Кроме того, фазовые измерительные преобразователи обладают высокой точностью, достаточной для управления отделочными, бетоноукладочными, монтажными и другими роботами.

На базе вращающихся трансформаторов можно построить цифровые датчики угла поворота в виде циклических преобразователей угла: фаза — код.

Для преобразования фазового параметра в цифровой код рекомендуется использовать устройства с время-импульсным преобразованием. Преобразователи этого типа работают по схеме фазовый сдвиг — временной интервал — код. Основными их преимуществами являются простота преобразования, высокая точность. Находят применения две группы таких преобразователей: с измерением мгновенного значения фазы и с постоянным временным измерением. В основе преобразователей первой группы лежит усреднение интервала времени между переходами исследуемых напряже-

ний через нуль с определением фазового сдвига между этими напряжениями [12]. Структурная схема такого преобразователя приведена на рис. 3.4. Выходное напряжение  $U_c$  фазовращателя  $\Phi B$ , фаза которого пропорциональна перемещению  $\theta$ , подается на нуль-орган  $HO2$ , а опорное напряжение  $U_{on}$  поступает на нуль-орган  $HO1$ .

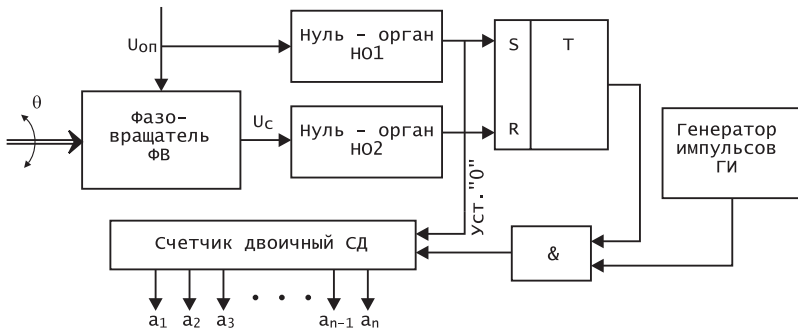


Рис. 3.4. Цифровой датчик угла поворота на базе вращающегося трансформатора с усреднением интервалов времени

Нуль-органы  $HO1$  и  $HO2$  фиксируют моменты перехода напряжений  $U_{on}$  и  $U_c$  через нуль и выдают короткие импульсы на триггер  $T$ , который формирует на выходе временной интервал, пропорциональный фазовому сдвигу между напряжениями  $U_{on}$  и  $U_c$ . Преобразование временного интервала в число импульсов производится генератором импульсов  $ГИ$  и схемой совпадения  $И$ . Число импульсов  $N$ , подсчитанных двоичным счетчиком  $СД$ , пропорционально измеряемому перемещению  $\theta$ :

$$N = (f_{on} / f_{zu}) \cdot \theta / 2\pi,$$

где  $f_{on}$ ,  $f_{zu}$  — частоты питающего напряжения фазовращателя  $\Phi B$  и генератора импульсов  $ГИ$ . Число разрядов двоичного кода на выходе счетчика  $СД$  определяется числом шагов квантования  $N_{кв}$ :  $n = \log_2 N_{кв}$ .

Точность работы таких преобразователей в основном зависит от погрешности фазовращателя и от погрешности преобразования временного интервала в код. Для рассмотренных преобразователей она обычно не превышает 10 двоичных разрядов. Повысить точность измерения в 2—3 раза можно за счет синхронизации частот, при этом усложнение схемы преобразователя не значительно. На

рис. 3.5 представлена схема преобразователя с синхронизацией частот [12]. Генератор счетных импульсов *ГИ* выдает импульсы на двоичный счетчик *СД*, имеющий *n* разрядов. С триггеров двух старших разрядов счетчика выходные сигналы подаются на фазорасщепительный блок *ФРБ*, выхода которого снимаются два синусоидальных квадратурных напряжения для питания статора фазовращателя *ФВ* на базе вращающегося трансформатора. С выхода фазовращателя напряжение, несущее информацию об измеряемом угловом перемещении  $\theta$  в виде фазового сдвига, поступает на нуль-орган *НО*, на выходе которого формируется стробирующий импульс в момент перехода входного напряжения через нуль. Стробирующие импульсы с *НО* считывают с выходных управляемых ключей *И1*, *И2*, ..., *И<sub>n</sub>* двоичное число *N*, формируемое счетчиком *СТ2*. Число *N*, считанное со счетчика, связано с входным углом фазовращателя соотношением:

$$N = (f_{on} / f_{zu}) \cdot \theta / 2\pi = (\theta / 2\pi) \cdot 2^n \rightarrow (f_{zu} = 2^n f_{on}).$$

Для исключения неопределенности считывания кода на числовой границе, вследствие неодновременности переброса триггеров счетчика, вводится цепь синхронизации от генератора *ГИ* на нуль-орган *НО*, которая смещает фазовый импульс на числовой границе.

В строительных работах находят применение индукционные редуктосины, а также вращающиеся трансформаторы с печатными обмотками (индуктосины). Погрешность в таких измерительных преобразователях уменьшается в число раз, равное передаточному отношению электрической редукции. Основным преимуществом

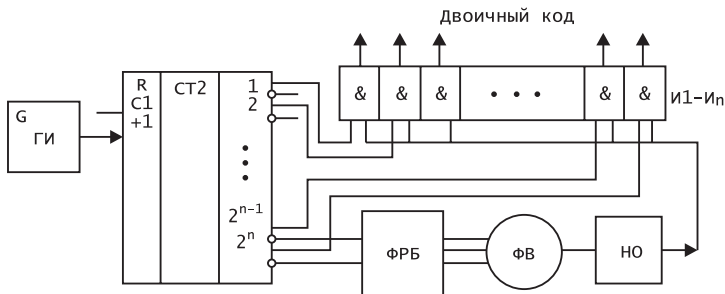


Рис. 3.5. Цифровой датчик угла поворота на базе вращающегося трансформатора с синхронизацией частот

индукционных редуктосинов является его бесконтактность. Однако эти устройства обладают большим ослаблением сигнала и требуют использования специальных измерительных устройств.

Широкое распространение в промышленных роботах нашли фотоэлектрические датчики угловых перемещений. Кодовый фотоэлектрический датчик выдает информацию в дискретной форме. Его выходной код позволяет с необходимой точностью определять положение степеней подвижности манипулятора. Среди всевозможных вариантов построения фотоэлектрических кодовых преобразователей перспективным является принцип пространственного кодирования, реализуемый на базе многоэлементных фотоприемников [35]. Основным элементом такого датчика является один или несколько кодирующих дисков, вращающихся вместе с объектом измерения. С одной стороны диска помещают источник света (светодиод), а с другой — фотоэлектрическое считывающее устройство. Диск представляет собой стеклянное основание, на которое нанесена кодовая маска, образованная определенным числом концентрических кодовых дорожек с прозрачными и непрозрачными сегментами. Кодовая маска является отображением используемого двоичного кода. Для устранения неопределенности считывания информации в фотоэлектрическом преобразователе применяют маски позиционного двоичного кода с V-способом считывания или отраженного двоичного кода. Наиболее широко используется отраженный двоичный код Грея, обеспечивающий минимальное число фотоприемников и простую схему считывания. Кодовые фотоэлектрические преобразователи угловых перемещений имеют разрешающую способность от 5' до 20". Повышение разрешающей способности достигается введением дополнительного точного отсчета (рис. 3.6).

В двухотсчетном 15-ти разрядном фотоэлектрическом преобразователе показания грубого отчета снимаются с 11 старших разрядных дорожек 1-ой кодовой шкалы, а показания точного канала с 4-х фотодиодов разрядной дорожки 2-ой кодовой шкалы. С фотоприемников точного канала снимаются сигналы с синусоидальной и косинусоидальной переменными составляющими, которые далее усредняются и интерполируются. В результате формируется 15-ти разрядный кодовый сигнал. Согласование грубого и точного отчетов обеспечивается с помощью синхроимпульсов считывания, которые формируются растровым интерполятором. Описанный принцип преобразования позволяет получить разрешающую спо-

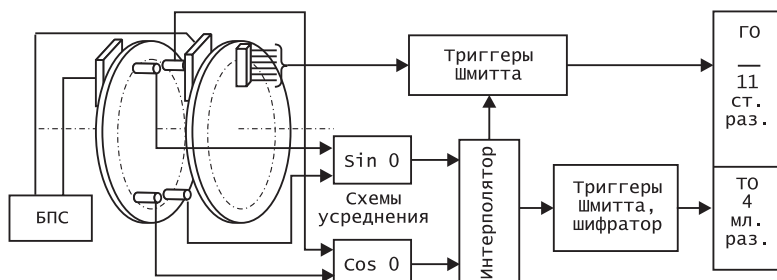


Рис. 3.6. Фотоэлектрический двухотсчетный преобразователь углового перемещения

способность менее 1 угл. сек. Кодированные сигналы, содержащие информацию об угле поворота, поступают в блок обработки информации системы управления. Для измерения линейных перемещений используют линейки, аналогичные диску. Фотоэлектрические преобразователи обеспечивают высокую разрешающую способность и надежность. Однако их использование в строительных роботах ограничивается высокой стоимостью и требованием исключения ударов и значительных вибраций.

В большинстве своем строительные роботы снабжаются импульсными фотоэлектрическими датчиками. Такие датчики состоят из диска с нанесенными по периферии делениями, светодиодного модуля и фотодиодного считывающего устройства. В процессе работы импульсный датчик формирует импульсы и выдает их в устройство управления. Датчик этого типа должен быть рассчитан так, чтобы один импульс соответствовал элементарному перемещению, обеспечивающую требуемую точность. Обычно эти датчики имеют погрешность 0,1—0,2 мм. Кодовые датчики обладают высокой разрешающей способностью. При разрядности выходного сигнала 12—16 единиц дискретности разрешающая способность составляет от 5 угл. мин. до 20 угл. сек.

Высокую разрешающую способность имеют фотоэлектрические растровые преобразователи угловых и линейных перемещений в цифровой код. В них в качестве преобразователя светового потока используется растровая пара, состоящая из неподвижного индикаторного и подвижного измерительного растров. Для строительных роботов интерес представляют датчики угловых перемещений с пропускающими радиальными растрами, которые имеют более простую конструкцию и малые размеры. Однако при их выборе

следует учитывать возможность накопления ошибок на выходе счетчика, а также потерю информации при отключении питания и необходимость установки нулевого отсчета датчика для получения абсолютного значения измеряемого перемещения.

К датчикам внутренней информации относят также датчики, измеряющие скорость перемещения исполнительных устройств. Основным видом датчиков скорости для строительных роботов следует считать электромашинные преобразователи или так называемые тахогенераторы. Они конструктивно представляют собой электрические микромашины постоянного или переменного тока. При угловых перемещениях ротора на выходе получают сигналы, пропорциональные скорости его вращения. Для строительных роботов наибольшее предпочтение следует отдавать тахогенераторам постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов или с независимым возбуждением. При этом наибольшей надежностью обладают тахогенераторы с торцевым ротором, встроенные в двигатель. Такая конструкция позволяет получить наиболее компактный привод.

При управлении строительными роботами важным является получение информации о скоростях и ускорениях перемещения звеньев манипулятора или его рабочего органа. С точки зрения упрощения информационно-измерительной части робота представляют интерес цифровые тахометры и акселерометры, использующие в качестве первичных преобразователей имеющиеся в системе датчики положения. При этом цифровые эквиваленты скорости и ускорения определяются методом цифрового дифференцирования соответствующих значений угла и скорости. Существенное упрощение механизма достигается при использовании в качестве датчиков положения синусно-косинусных трансформаторов в сочетании с микроэлектронной отчетной частью, обеспечивающей формирование необходимых цифровых эквивалентов параметров движения.

В качестве датчиков положения при фиксированных значениях механических узлов исполнительных устройств используют контактные и бесконтактные выключатели, микровыключатели и другие путевые датчики. Контактные выключатели выполняют, как правило на механическом принципе переключения напряжений питания исполнительных приводов. Другим типом контактных выключателей являются магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы). Герконы представляют собой упругие ферро-

магнитные контакты, помещенные в вакуумный или заполненный инертным газом герметичный баллон из немагнитного материала. Контакты замыкают, воздействуя на них внешним магнитным полем постоянного магнита или электромагнита. При исчезновении магнитного поля под воздействием упругих сил контакты возвращаются в исходное состояние. Бесконтактные выключатели выполняют по различным схемам, использующим электромагнитный принцип взаимодействия неподвижного магнитопровода с якорем, соединенным с подвижными частями манипулятора. В них изменение электрических сигналов осуществляется не механическими контактами, а путем изменения физических свойств коммутирующих устройств. Действие индуктивных датчиков основано на зависимости индуктивности катушки электромагнита с подвижным якорем от величины воздушного зазора. При достижении звеном манипулятора (якорем) заданного положения катушки электромагнита происходит изменение тока в катушке, которое позволяет осуществить переключение в исполнительной цепи. Для бесконтактной коммутации цепей управления применяют фотоэлектрические датчики, представляющие собой комбинацию оптических и электронных элементов. Фотодатчик состоит из входной цепи — светодиода и выходной — фоторезистора или фотодиода, который при засветке изменяет свое сопротивление и включает входную цепь.

Высокую надежность имеют бесконтактные датчики приближения индуктивного и емкостного типов. С их помощью можно контролировать приближение манипулятора к объектам. В индуктивных датчиках приближения используется встроенный генератор. При приближении проводящего тела к датчику, происходит затухание колебаний, воспринимаемое схемой сопряжения. Датчики имеют двухуровневый выход и представляют бесконтактные выключатели. Зона срабатывания этих датчиков составляет 0—20 мм. Они могут иметь нормально открытый, нормально закрытый или токовый выход. Емкостные датчики приближения используют свойство изменения диэлектрической проницаемости конденсатора, вследствие чего происходит изменение частоты RC-генератора. Зона срабатывания емкостных датчиков составляет 0—10 мм. Также как и индуктивные выключатели эти датчики имеют нормально открытый, нормально закрытый или токовый выход.



## 3.2. Сенсорные устройства контроля положения строительных роботов

Поведение адаптивного робота в окружающей обстановке при выполнении технологических операций определяется его информационной системой очувствления, которая обеспечивает сбор, обработку информации о внешней среде и предоставление управляющей системе или оператору необходимых для управления данных. Сбор такой информации осуществляется датчиками внешней среды. По аналогии с органами чувств человека их называют датчиками очувствления или сенсорными датчиками. Наличие сенсоров у роботов позволяет более полно обеспечить информацией целенаправленное их функционирование. При роботизации строительных операций роботы могут снабжаться сенсорными датчиками различного назначения и принципа действия. Решение задач управления роботами значительно облегчается при использовании информация о текущем состоянии исполнительного органа и окружающей среды. Это позволяет придать роботу адаптивные свойства [19].

На принципы построения сенсоров большое влияние оказывает расстояние их от источника информации (рис. 3.7). По этому признаку сенсорные устройства делятся на сверхближние, ближние, дальние и сверхдальние [44]. Сенсорные устройства сверхближнего действия используют для очувствления захватов и других частей манипуляторов, а также корпуса робота. Они позволяют получить информацию о контакте с объектами взаимодействия (сенсоры касания или тактильные), измерять усилия и моменты (силомоментные сенсоры), фиксировать проскальзывание объектов. Сенсорные устройства ближнего действия применяют для получения информации бесконтактным способом в непосредственной близости от объекта. К таким устройствам относятся локационные сенсоры захватных устройств, неконтактные бамперы, дальномеры ближнего действия, измерители плотности грунта и др. Бесконтактные измерительные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задание с большей скоростью, заранее получать информацию об объектах и соответствующим образом корректировать свои действия. Сенсорные устройства дальнего действия позволяют получать информацию о внешней среде в объеме всей рабочей зоны робота. Например, данные об окружающих объектах, находящихся в зоне действия

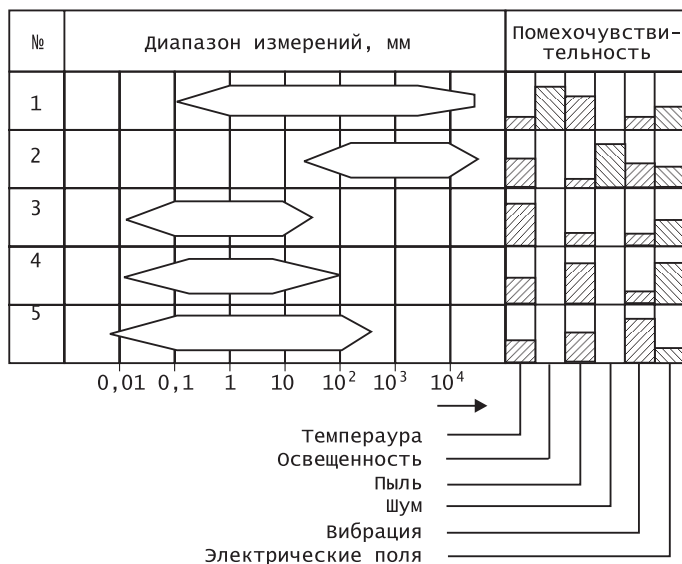


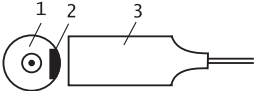
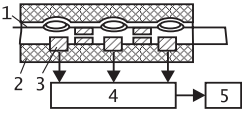
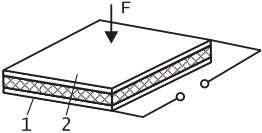
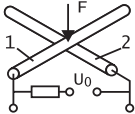
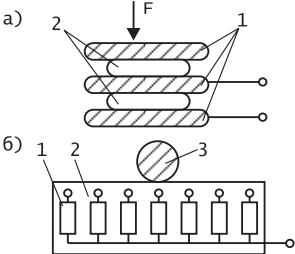
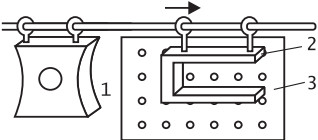
Рис. 3.7. Сравнение датчиков для дистанционных измерений  
 1 — оптические; 2 — акустические; 3 — индуктивные;  
 4 — емкостные; 5 — тактильные

робота. К сенсорным устройствам сверхдальнего действия относятся навигационные устройства, координаторы, локаторы и другие системы с дальностью действия вне рабочей зоны робота.

Широкое применение в строительной робототехнике находят тактильные, силомоментные, локационные сенсоры, а также системы технического зрения [38]. Тактильные датчики являются осязательными сенсорами. Различают тактильные датчики касания, датчики проскальзывания, тактильные анализаторы. Датчики касания определяют момент соприкосновения схвата робота с объектом. Для этой цели на схвате устанавливают игольчатые микровыключатели, которые позволяют с помощью логических схем определять наличие объекта, его положение, осуществлять его захват или обход, а также изменять направление движения. С целью их микровыключателей от ударных нагрузок их покрывают эластичным материалом (резиной, полимером и др.). Для получения информации о соприкосновении с предметами используют также полупроводниковые датчики. Некоторые типы датчиков представлены в таблице 3.1 [15].

Таблица 3.1

Датчики внешней информации

Схема датчика	Наименование
	<p>Магнитно-роликовый датчик:                      1 – ролик;                      2 – магнит;                      3 – преобразователь</p>
	<p>Мембранный датчик:                      1 – стальная пластина;                      2 – защитная эластичная оболочка;                      3 – контакты;                      4 – схема совпадений;                      5 – система управления</p>
	<p>Композиционный датчик:                      1 – углеродные волокна;                      2 – электроды</p>
	<p>Датчик из эластомера:                      1, 2 – электроды из силиконового каучука</p>
	<p>Пьезоэлектрический датчик:                      а) – датчик; б) – анализатор;                      1 – блок пьезоэлектрических элементов;                      2 – полужесткий объект</p>
	<p>Светолокационный датчик (фотодиодная матрица)                      1 и 2 – контролируемые предметы;                      3 – фотодиодная матрица</p>

Датчики проскальзывания предназначены для получения информации о перемещении предмета относительно губок схвата. К таким датчикам относится магнитно-механический, у которого перемещение объекта вызывает вращение ролика с магнитом, ре-

гистрируемого магнитным преобразователем. В качестве датчиков проскальзывания используются также фотометрические устройства, у которых подвижный объект прерывает световой поток между источником света и фотоприемником. Пневматические датчики регистрируют проскальзывание, когда перемещаемый объект открывает заслонку между источником сжатого воздуха и чувствительным элементом, воспринимающим давление воздушной струи. Для этой цели используют также описанные выше индуктивные и емкостные выключатели.

Тактильные анализаторы предназначены для определения формы и положения объектов в пространстве. Принципы действия и конструкции тактильных анализаторов имеют широкий диапазон. В качестве тактильных анализаторов, в частности, используют наборное поле из датчиков касания. При соприкосновении с предметом срабатывают соответствующие элементы информационной матрицы, регистрируя с помощью логических блоков поверхность объекта. Поверхностно-тактильный мембранный датчик представляет собой тонкую стальную пластинку с несколькими миниатюрными выпуклыми мембранными поверхностями, которые занимают только два устойчивых положения — верхнее и нижнее. Пластинки монтируются в защитной эластичной оболочке. При отсутствии контакта с деталью мембраны находятся в верхнем устойчивом положении. При соприкосновении с деталью мембраны изменяют свое положение, замыкая электрические контакты. Сигналы с контактов поступают на схему совпадений и после усиления используются системой управления робота.

В последнее время повышается надежность тактильных датчиков и расширяется номенклатура благодаря появлению новых композиционных материалов и эластомеров. Датчик из композиционных материалов, состоящий из слоя угольных волокон и фольговых электродов, позволяет получать информацию с площади контактируемых поверхностей. Тактильные датчики на основе эластомеров выполняют в виде контактируемых между собой выпуклых электродов из силиконового проводящего каучука. Электроды обладают свойством электропроводности и упругости. При нажатии на них сопротивление в месте контакта увеличивается, изменяя ток и напряжение в электрической цепи. Организованные в соответствующие матрицы контактные соединения позволяют получить информацию о форме контактируемого объекта.

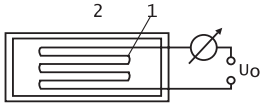
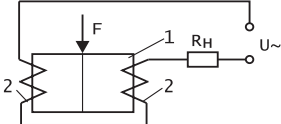
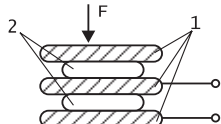
Представляют интерес тактильные датчики с использованием пьезоэлектрического эффекта. Работа таких датчиков основана на свойстве некоторых кристаллов выделять на поверхности заряды при сжатии или растяжении. Примером таких кристаллов являются кварц, сегнетокерамика и др. Измеряемое давление воспринимается мембраной и передается пьезочувствительным пластинам. Выходным сигналом является заряд, снимаемый с металлических прокладок. В табл. 3.1 показан тактильный анализатор, состоящий из блока пьезоэлектрических элементов, помещенных в массу полупластичного материала. При взаимодействии объекта с анализатором упругая деформация материала передается на пьезоэлектрические элементы, где происходит преобразование в электрический сигнал. После соответствующей обработки сигналов получают изображение поверхности объекта. Аналогично выполняются тактильные датчики электронного типа, представляющие собой конденсатор из полимерных пленок и проводящих пластин. Деформация пластин приводит к изменению емкости и напряжения измерительной схемы.

В строительно-монтажных работах находят применение силомоментные датчики, которые служат для определения усилий сжатия при захвате объектов и моментов в сочленениях манипулятора. Для этой цели используют два принципа: первый — измерение упругих деформаций контактируемых поверхностей, второй — измерение микроперемещений калиброванных пружин датчика [31]. Из датчиков первой группы наибольшее распространение получили тензорезисторные, пьезоэлектрические и магнитоупругие преобразователи (табл. 3.2). Действие тензорезисторных датчиков основано на изменении сопротивления проводников и полупроводников при растяжении и сжатии. Конструктивно они выполняются из проволоки, фольги или полупроводникового материала, размещенного на эластичной подложке. Датчик наклеивается на захват. Деформации, возникающие во время работы робота, вызывают изменения тока, пропорциональные нагрузкам на захвате. Магнитоупругий преобразователь использует свойство ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость под действием механических упругих деформаций. Он представляет собой сердечник, собранный из пластин магнитоупругого материала, имеющих одно или несколько окон для укладки обмотки, которая создает индуктивное сопротивление переменному току. Под воз-

действием входного параметра (усилия) изменяется индуктивное сопротивление датчика, а следовательно ток в нагрузке.

Таблица 3.2

## Силомоментные датчики

Схема датчика	Наименование
	<p>Тензорезистор: 1 – проволока; 2 – эластичная подложка</p>
	<p>Магнитоупругий преобразователь 1 – сердечник; 2 – обмотка</p>
	<p>Пьезоэлектрический датчик: 1 – пьезоэлектрические элементы; 2 – полуэластичный объект</p>

В робототехнических строительных комплексах важное значение приобретают средства контроля, позволяющие определять наличие или отсутствие объектов в окрестности робота или оценивать с помощью бесконтактных устройств близость подвижных элементов при работе комплекса. Особенно важными они представляются для строительно-монтажных роботов, предназначенных для выполнения установочных и ориентирующих операций. Для этих целей можно использовать как простейшие бесконтактные датчики, так и всевозможные сканеры, использующие ультразвуковое или инфракрасное излучение [23]. Однако, если простейшие датчики могут лишь фиксировать близость элементов, то ультразвуковые и инфракрасные приборы позволяют выполнять функции детекторов движения. Простейшие бесконтактные датчики близости используют свойства индуктивных и индукционных связей, магнитоstrictionные свойства, эффект Холла.

Простейший инфракрасный сканер представляет собой устройство, определяющее расстояние до объекта методом сканирования светового луча (рис. 3.8). Светодиодный излучатель 1 узким лучем света освещает рабочую зону, в которой находится объект 3. Отраженный от объекта световой поток воспринимается фотодиодом

приемного детектора 2. Величина отраженного сигнала, попадающего на фотодиод, зависит от положения излучателя и от расстояния до объекта 3. При известном расстоянии до объекта максимум отраженного сигнала, получаемого фотодиодом, будет соответствовать определенному углу излучения светодиода. Кодированное значение угла, соответствующее максимуму сигнала детектора при известном фиксированном расстоянии до объекта, передается в вычислительное устройство. На основе заложенных в него алгоритмов определяется расстояние до объекта. Используя различные алгоритмы управления излучателем и обработки сигналов можно контролировать скорость изменения расстояний между объектами при их сближении.

Дальномерные подсистемы строительных роботов предназначены для контроля расстояний между рабочим органом и объектом или между объектом, находящимся в захватном устройстве, и объектами окружающего пространства. Наиболее предпочтительны для строительных роботов оптоэлектронные и акустические дальномерные датчики. В состав оптоэлектронных дальномеров входят источник света и фотодетектор. В качестве источника используются полупроводниковый лазер или светоизлучающий диод. Принцип действия оптоэлектронных датчиков заключается в том, что объект освещается сфокусированным лучом, а отраженный луч воспринимается фотоприемником. Расстояние до объекта (препятствия) определяется по промежутку времени, необходимому для распространения луча до объекта и обратно. Сканируя луч в

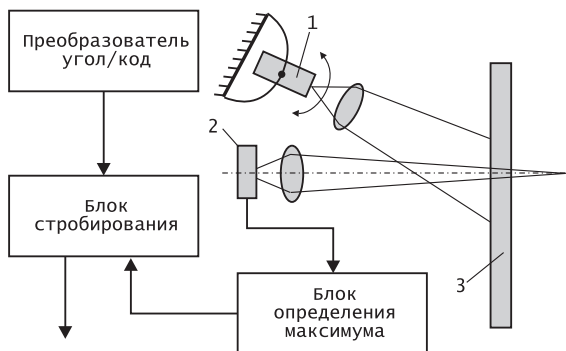


Рис. 3.8. Структура инфракрасного сканера

1 — светодиодный излучатель; 2 — приемный детектор; 3 — объект

зоне выполнения строительных операций, оценивается положение объектов или форма поверхностей.

Акустические датчики основаны на принципе ультразвуковой локации. Как известно, под ультразвуком понимаются акустические волны с частотой свыше 20 кГц, лежащие в области не различимой для человеческого слуха [63]. В отличие от электромагнитных волн они могут распространяться только в материальной среде. Звуковая волна связана с пространственными и временными колебаниями плотности  $\sigma$ , давления  $p$ , температуры  $t$  среды и колебаниями местоположения и скорости перемещения, образующих ее элементарных частиц. Все перечисленные величины имеют отклонения в пределах их средних значений. Предпосылкой распространения звука в какой-то среде является ее обладание эластичностью. Механизм распространения ультразвука в произвольной среде может быть пояснен на примере бесконечно длинного изотропного стержня с поперечным сечением  $A$ , модулем эластичности  $E$  и плотностью  $\sigma$  (рис. 3.9). При этом следует рассмотреть объемный элемент

$dV$ , чье положение в ненапряженном состоянии определяется координатами  $x$  и  $x + dx$ . Под действием внешней силы в направлении  $z$  — координаты стержень деформируется, причем объемный элемент из положения смещается на величину  $du$  и одновременно его длина вырастает со значения  $dx$  на  $dx + du$ . Отношение  $du(x)/dx$  называется растяжением, а отношение  $F(x)/A$  — напряжением.

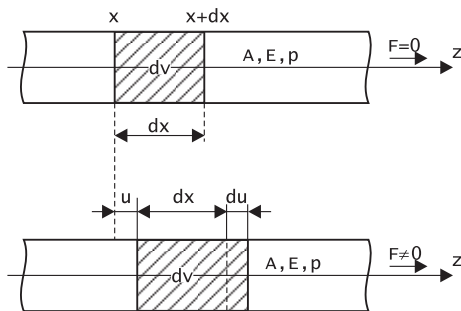


Рис. 3.9. Схематическое представление смещения в напряженном цилиндре

Модуль эластичности  $E$ , определяющий взаимосвязь между напряжением  $T$  и растяжением  $S$ , определяется из выражения:

$$T(x) = E \cdot S(x).$$

Результирующая сила, действующая на объемный элемент, рассчитывается из разницы напряжения в точках  $x + u + dx + du$  и  $x + dx$  с помощью выражения  $E \cdot d^2u/dx^2 \cdot dV$ . Уравнение движе-



ния в случае постоянных во времени сил получается в результате сравнения силы эластичности и силы инерции:

$$E \frac{d^2 u}{dx^2} dV = \sigma \frac{d^2 u}{dt^2} dV.$$

Преобразование его дает уравнение движения волны:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} dV.$$

Решением этого уравнения являются волны сжатия, распространяющиеся со скоростью звука  $c = (E/\sigma)^{1/2}$ .

При попадании продольной звуковой волны на граничную поверхность между двумя средами, она делится на отраженную и транзиттерную составляющие. Если речь идет о твердом теле, когда кроме сил сжатия возникают также силы среза, то на граничной поверхности происходит еще одно преобразование собственных колебаний. Наряду с продольными составляющими отраженных и транзиттерных волн возникают поперечные составляющие.

Для соотношений интенсивности различных компонентов звуковых волн важным показателем является характеристическое сопротивление звука:

$$Z = \frac{p}{v} = \sigma \cdot c.$$

Для каждого вида среды, в которой распространяется звук, имеется постоянное по значению характеристическое сопротивление прохождению звуковой волны. При сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_2$  двух сред 1 и 2 степени трансмиссии  $T$  и отражения  $R$  (при интенсивности звука  $I$ ) определяются из выражений:

$$T = \frac{I_{\text{транс}}}{I_{\text{над}}} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2},$$

$$R = \frac{I_{\text{отп}}}{I_{\text{над}}} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}.$$

На несколько порядков меньше по значению характеристическое сопротивление газов, по сравнению с твердыми телами и жидкостями, приводит в зоне перехода звуковой волны между газом и ними к очень малому коэффициенту трансмиссии и к коэф-

фициенту отражения равному почти 1. По этой причине у пьезо-керамических ультразвуковых преобразователей необходимо соответствующим образом настраивать их сопротивление.

### 3.3. Лазерные информационно-измерительные системы строительно-монтажных роботов

При выполнении монтажных, землеройных, бетоноукладочных и ряда др. работ необходимо задавать проектные оси и плоскости и выполнять постоянный контроль положения инструмента, оснастки и конструкций относительно проектных положений. Наиболее удобными, позволяющими автоматизировать процесс контроля, являются оптические методы [8]. Эти методы основаны на использовании лазерного луча, с помощью которого задаются проектные оси или плоскости. Отличительными особенностями лазерного излучения являются его монохроматичность, узконаправленность, значительная спектральная яркость и высокая спектральная плотность. Использование монохроматического лазерного источника позволяет создавать системы контроля, отличающиеся высокой помехоустойчивостью. Большое значение для информационно-измерительных систем строительно-монтажных роботов имеет узконаправленность лазерного излучения, что позволяет выполнять контроль положения с высокой точностью. Высокие спектральная яркость и плотность излучения позволяют применять лазерные средства контроля в условиях яркого солнечного освещения.

Таблица 3.3

Класс лазера	1	2	3А	3Б
Степень опасности при работе с прибором	Безопасен при исправности прибора	Низкая мощность, защита глаз при помощи светоотражателей	Попадание луча в глаз через оптический прибор является опасным	Прямое попадание луча в глаз является опасным
Максимальная мощность излучения, мВт	< 1	1	5	> 5
Наличие блокировки	Нет	Нет	Да	Да

Класс лазера	1	2	3А	3Б
Необходимость в предупреждении о наличии луча (звуковое или световое)	Нет	Нет	Да	Да
Необходимость в защите для глаз	Нет	Нет	Необходима, если невозможна специальная организация выполнения работы	Также как и для класса 3А
Необходимость ограждения прибора	Нет	Нет	Необходимо, если невозможна специальная организация выполнения работы	Также как и для класса 3А
Наличие ответственного лица по ТБ использования лазерного луча	Нет	Нет	Нет	Да
Необходимость допуска для выполнения измерительных работ с прибором	Да	Да	Да	Да
Необходимость отключения неподвижного луча у сканирующего прибора	Нет	Нет	Нет	Да

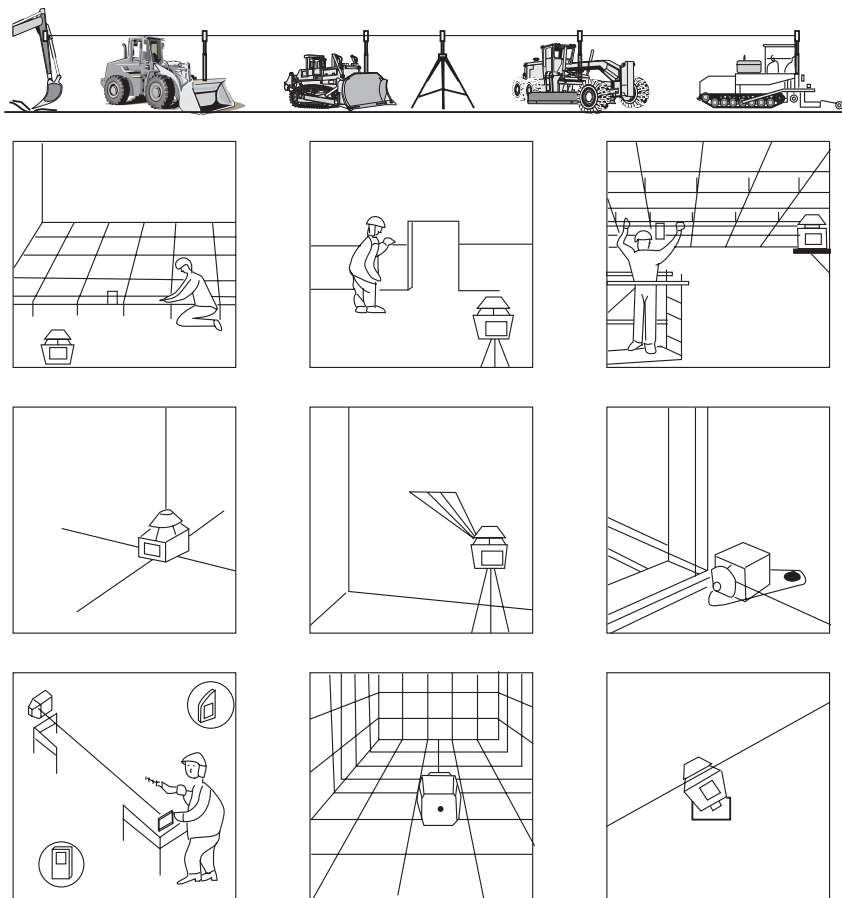
В лазерных приборах используются источники излучения трех типов:

- газовые — с гелий-неоновой (He-Ne) трубкой;
- полупроводниковые, работающие в невидимом инфракрасном диапазоне;
- полупроводниковые, работающие в световом диапазоне красного цвета.

Лазеры для целей строительства классифицируются, прежде всего, по мощности излучения с учетом возможных последствий для глаз обслуживающего персонала. Из-за различной чувствительности глаза по световосприятию классификация производится еще и по длине волны излучения. Существуют международные нормы (IEC 825) по безопасному применению лазерного излучения (3, 5, 62). В соответствии с ними лазеры различаются по следующим классам: 1, 2, 3А и 3Б (табл. 3.3). Большинство приборов принадлежат ко второму классу. Кратковременное попадание излучения такого прибора в глаз человека сравнимо, по своему воздействию, с попаданием в него солнечного луча при случайном взгляде на солнце. Ясно, что тема безопасности обслуживания при работе с лазерными приборами не должна недооцениваться. Для источников с мощным излучением необходимо предусматривать повышенную осторожность в обращении, например, автоматическое отключение прибора в условиях сильной вибрации.

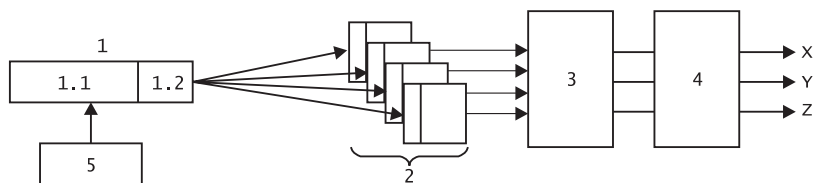
В настоящее время выпускаются различного рода лазерные визиры, нивелиры, приборы вертикального проектирования (зенит-приборы) или универсальные приборы, сочетающие в себе все перечисленные функции. Кроме того, существует лазерные приборы для задания горизонтальных, либо наклонных плоскостей (рис. 3.10). Такие приборы позволяют создать информационно-измерительные системы для монтажных и других строительных работ.

В общем случае, лазерная информационно-измерительная система строительного робота представляет собой лазерный задатчик оси или плоскости 1, один или несколько фотоприемных устройств 2, усилительное устройство 3 и преобразующий модуль 4 (рис. 3.11). Обязательными частями лазерного задатчика 1 являются источник когерентного излучения 1.1, и оптическое устройство 1.2. В качестве источника когерентного излучения рекомендуется выбирать гелий-неоновые лазеры, обладающие небольшим углом расходимости (1—2 угл. мин.), хорошо видимым лучом ( $\lambda=0.6328$  мкм), стабильностью излучения и надежностью работы. Малые габариты, небольшое потребление энергии, повышенная ударостойкость делают перспективным использование полупроводниковых лазеров. Однако, работа в невидимом диапазоне излучения и значительный угол расходимости луча сдерживают их использование в лазерных задатчиках. Для формирования луча, заданного диаметра и с требуемым углом расходимости, в состав



*Рис. 3.10. Варианты использования лазерных приборов при выполнении строительных работ*

лазерного датчика включается оптическое устройство 1.2. С его помощью можно вручную или автоматически изменять диаметр луча и фокусировать его на фотоприемник 2. Одно или несколько фотоприемных устройств устанавливаются на оборудовании или непосредственно на технологической оснастке. Получение заданной чувствительности информационно-измерительной системы обеспечивается усилителями 3, сигналы с которых предварительно обрабатываются модулем 4. Выходные сигналы преобразователей 4 пропорциональны измеряемым смещениям объекта относительно-

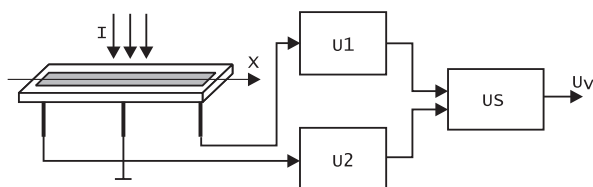


*Рис. 3.11. Лазерная информационно-измерительная система строительного робота*

*1 — лазерный задатчик; 2 — фотоприемное устройство;  
3 — усиленное устройство; 4 — преобразователь;  
5 — ориентирующее устройство*

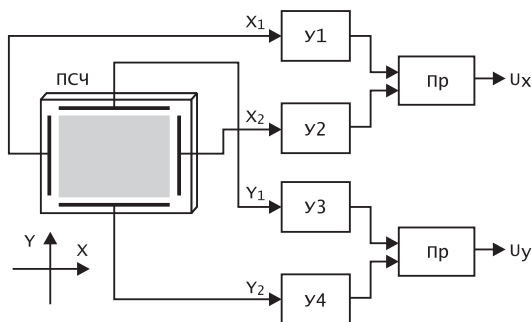
но лазерного луча. Заданное направление луча обеспечивается ориентирующим устройством 5.

Для контроля положения строительных конструкций можно использовать однокоординатные оптические датчики, с помощью которых можно бесконтактным способом регистрировать процессы перемещения монтируемых конструкций (рис. 3.12). Чувствительными элементами этих датчиков являются измерительные поверхности в виде полосы, выполненные на основе кремниевых полупроводниковых слоев *pin*-типа.



*Рис. 3.12. Однокоординатный оптический датчик*

Двухкоординатное измерение положения выполняется с помощью светочувствительной поверхности ПСЧ, на каждой стороне которой расположены электроды (рис. 3.13). С них сигналы предварительно усиливаются усилителями  $U1-U4$ , попарно группируются и преобразуются преобразователями Пр в выходные сигналы, пропорциональные смещению по координатным осям  $X$ ,  $Y$ . Эти датчики с аналоговым выходом обладают погрешностью не превышающей 1 мм. Они могут быть использованы для контроля положения конструкций при их монтаже. В этом случае датчик положения устанавливается на траверсе.



*Рис. 3.13. Двухкоординатный оптический датчик  
ПСЧ — светочувствительная поверхность; У1–У4 — усилители;  
Пр — преобразователи*

При необходимости осуществлять контроль и управление работой робота, строительной машины или мобильного комплекса на больших расстояниях в качестве источника когерентного излучения выбирают гелий-неоновые лазеры. Они обладают небольшим углом расходимости (1–2 угл. мин.), хорошо видимым лучом ( $\lambda=0.6328$  мкм), стабильностью излучения и надежностью работы (рис. 3.14) [55]. Главной их особенностью является возможность создания различных типов резонансных колебаний, отличающихся распределением амплитуд и фаз на поверхности зеркал резонаторов и спектром частот. Такие колебания принято называть модами. Мощность излучения в многомодовом режиме для серийно выпускаемых гелий-неоновых лазеров обычно в два раза выше, чем в одномодовом режиме. Если необходимо иметь пучок излучения с симметричным и равномерным потоком относительно его центра распределения плотности энергии, то применяют лазер, работающий в одномодовом режиме. Возможность фокусирования пучка излучения обеспечивает высокую энергетическую плотность светового потока на приемном устройстве и помехоустойчивость в работе системы измерений (рис. 3.15). Малые габариты, небольшое потребление энергии, возможность продолжительной работы от малогабаритных аккумуляторов, повышенная ударостойкость обеспечили полупроводниковым лазерам их преимущество по сравнению с газовыми при использовании в строительстве. Они проще в изготовлении, дешевле, но из-за большего угла расходимости наиболее эффективно могут использоваться на расстояниях до 50 м.

Широкое применение находят лазерные системы для автоматизации контроля и управления землеройными и планировочными строительными машинами. Результаты специальных исследований показывают, что работа водителей таких машин представляет не только тяжелый труд, но и постоянно требует от него большой

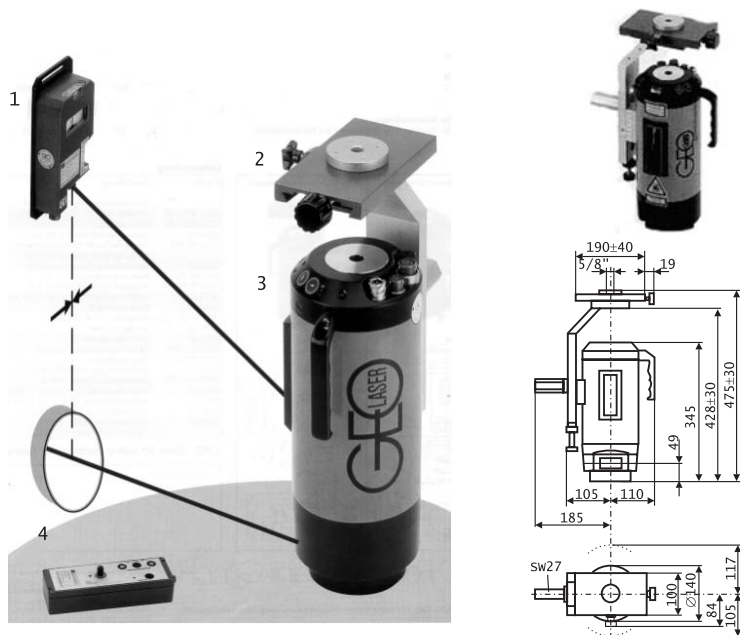


Рис. 3.14 Лазерный гелий-неоновый прибор типа VL 50 фирмы Geo Feinmechanik GmbH

1 — приемник лазерного излучения; 2 — юстировочное приспособление; 3 — лазерный прибор; 4 — пульт дистанционного управления

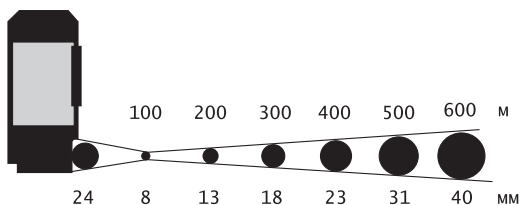


Рис. 3.15 Фокусирование лазерного пучка прибора VL 50



концентрации внимания [1, 56, 64]. Например, управляя бульдозером, водитель должен в течение 1 ч произвести 1000—1500 включений, причем среднее время включения составляет 0,3—0,6 с. Введение в управление машинами автоматических систем не только облегчает работу, но и повышает объемы выполнения работ и их качество независимо от квалификации обслуживающего водителя-машиниста.

Отличительная особенность работы землеройных машин — непрерывный процесс снятия слоя грунта. Требования, предъявляемые к этим машинам, кроме производительности, касаются глубины копания, ровности поверхности, соблюдения соответствующих уклонов по отношению к горизонтальному уровню и т. д. В традиционных землеройных машинах (экскаваторах, бульдозерах, грейдерах) выполнение этих требований зависит от квалификации персонала, его физического и психического состояния. Для достижения необходимой точности часто возникает необходимость в многократных проходах машин по одним и тем же участкам или завершении работ ручным способом, что в обоих случаях существенно снижает темпы строительства.

Решить данную проблему позволяет использование лазерных систем, обеспечивающих задание горизонтальной и наклонной плоскостей (рис. 3.16).

Опорная плоскость создается лазерным прибором, установленным в удобном месте, вне зоны выполнения работ, и настроенным на необходимые высоту и угол наклона [59].

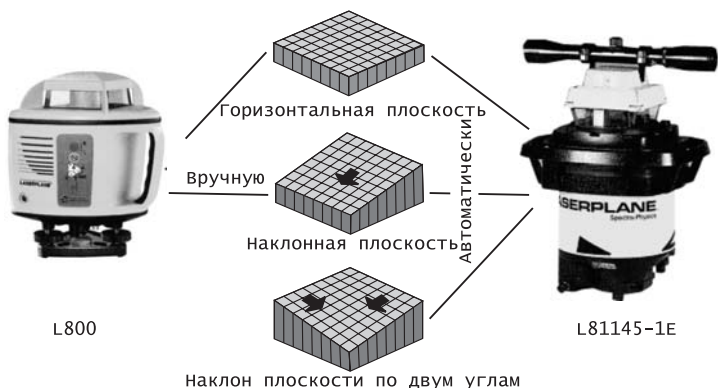


Рис. 3.16. Лазерные приборы для задания горизонтальной и наклонной плоскостей

Прикрепленный к верхней кромке отвала фотоприемник воспринимает лазерное излучение и в случае отклонения луча вверх или вниз от его центра считывает значение этого отклонения. Полученный сигнал используется в системе автоматического регулирования гидропривода подъема отвала так, чтобы луч постоянно попадал в центр фотоприемника. Точность планировки в радиусе 200 м вокруг лазерного излучателя составляет 3 см при рабочей скорости около 5 км/ч [65]. Такая система позволяет даже неквалифицированному водителю легко и очень точно выполнять операцию планировки, исключая при этом необходимость в многократных промежуточных контрольных измерениях, и дает возможность значительно сократить затраты рабочего времени.

В настоящее время в строительстве применяют в основном лазерные задатчики, образующие в качестве опорного направления коллимированный пучок. Основным недостатком таких устройств — узость информационной зоны, создаваемой лазерным пучком и определяемой площадью его поперечного сечения. Более того, эту площадь стремятся сделать минимальной, так как необходимо обеспечить максимально возможную плотность энергии излучения в точке ее регистрации, для чего пучок фокусируют в зоне фотоприемного устройства. Это значительно затрудняет поиск опорного лазерного пучка в пространстве, особенно в дневное время.

Свободными от этих недостатков являются лазерные системы со сканирующими излучателями [4]. В результате сканирования лазерным пучком пространства увеличивается информационная зона, что повышает надежность установления оптической связи между передающим и приемным устройствами. Основным преобразователем, который технически просто реализуется в таких устройствах, является время-код. Это позволяет получать информацию непосредственно в цифровом виде, удобном для ввода в ЭВМ.

Применение лазерных сканирующих излучателей позволяет получить повышенную точность при измерении координат. С их помощью можно измерять координаты путем сканирования пространства веерообразной лазерной плоскостью. Излучатель содержит лазер, коллиматор, сканирующее устройство и цилиндрическую оптику. Использование таких лазерных излучателей позволяет полностью автоматизировать процесс контроля положения рабочего органа робота при выполнении им строительных работ. В качестве примера рассмотрим лазерную информационно-измерительную систему (ИИС) контроля, которая позволяет

измерять отклонения от опорной плоскости в диапазоне 0—15 м с точностью не ниже 10—15 мкм. Система состоит из лазерного излучателя (рис. 3.17), фотоприемного устройства и электронного модуля. В основу способа измерения положен время-импульсный метод. Лазер создает излучение, которое трансформируется коллиматором в пучок с более узкой диаграммой направленности и большего диаметра. Сформированный луч с помощью пентапризм и специального оптического элемента, выполненного из цилиндрических линз, преобразуется в две взаимопересекающиеся веерообразные лазерные плоскости. Линия пересечения плоскостей является опорной. Пентапризма вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси. С целью динамической балансировки на вращающейся оптической системе установлен груз. При вращении плоскостей линия их пересечения создает в пространстве сканирующую плоскость. В контролируемой точке лазерное излучение регистрируется фотоприемным устройством, состоящим из двух (рис. 3.18) или четырех фотодетекторов, попарно разнесенных на базисное расстояние  $a$ . Одна пара фотодетекторов позволяет контролировать смещения по одной из координат. В результате контакта сканирующей плоскости с фотодетекторами, расположенными на одной оси, каждый из них вырабатывает по два импульса, разделенных временными интервалами  $t_1$  и  $t_2$ . По измеренным временным интервалам и известной длине базиса вычисляется отклонение фотоприемного устройства от опорной линии:

$$x = 0,5a \cdot [(t_1 - t_2)/(t_1 + t_2)].$$

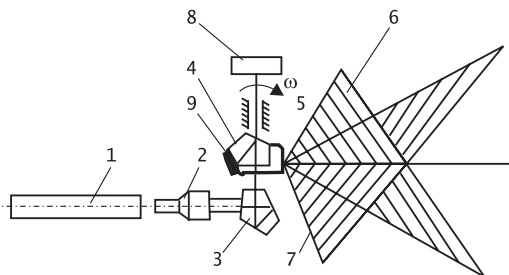
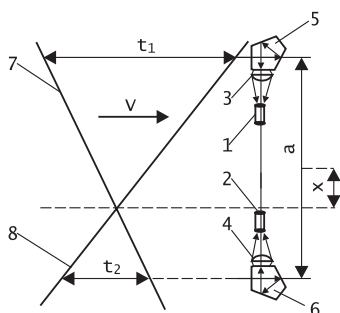


Рис. 3.17. Оптическая схема лазерной ИИС контроля  
 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3—4 — пентапризмы; 5 — оптический элемент; 6—7 — лазерные плоскости; 8 — электродвигатель; 9 — груз



*Рис. 3.18. Оптическая схема регистрации лазерного излучения  
1—2 — лазеры; 3—4 — коллиматоры; 5—6 — пентапризмы;  
7—8 — лазерные плоскости; 9 — длина базиса; 10 — расстояние  
от середины базиса до опорной плоскости*

Простота и надежность измерений, а также возможность считывания информации микропроцессорной системой управления позволяет считать данный способ перспективным для информационного обеспечения монтажных РТК и планировочных комплексов.

Важным элементом информационно-измерительной системы является фотоприемное устройство, главным элементом которого служит фотодетектор. Основной функцией фотоприемного устройства является определение энергетического центра лазерного луча с заданной точностью. Для этого используются разнообразные методы их построения: со статическими фотодетекторами, со следящими фотодетекторами, матричные фотоприемники. Для робототехнических комплексов фотоприемники со следящими фотодетекторами не находят применения, так как имеют значительные габариты и предназначены для стационарной установки на оборудовании. Рассмотрим некоторые технические решения фотоприемных устройств, которые могут представлять определенный интерес при роботизации монтажных, планировочных, свайных и др. работ.

На рис. 3.19 приведена схема фотоприемного устройства, обеспечивающая прием всего лазерного излучения с разделением его на четыре части, пропорциональные смещениям относительно оси фотодетектора с последующей обработкой выходных фототоков в соответствии с выражениями:

$$i_x = (i_{\phi 1} + i_{\phi 2}) - (i_{\phi 3} + i_{\phi 4});$$

$$i_y = (i_{\phi 1} + i_{\phi 4}) - (i_{\phi 2} + i_{\phi 3}),$$

где  $i_{\phi 1}$ ,  $i_{\phi 2}$ ,  $i_{\phi 3}$ ,  $i_{\phi 4}$  — фототоки фотодетекторов ФД1, ФД2, ФД3, ФД4, попадающие в соответствующие квадранты фотоприемника. Разделение лазерного луча на четыре составляющие выполняется призмой Р. Выходные сигналы сумматоров  $i_x$ ,  $i_y$  пропорциональны отклонению фотоприемного устройства, установленного на роботе или технологической оснастке, от проектной оси, задаваемой лазерным лучом. Выходные сигналы фотоприемного устройства могут использоваться для управления положением и направленным движением роботов и механизмов, входящих в состав строительных РТК.

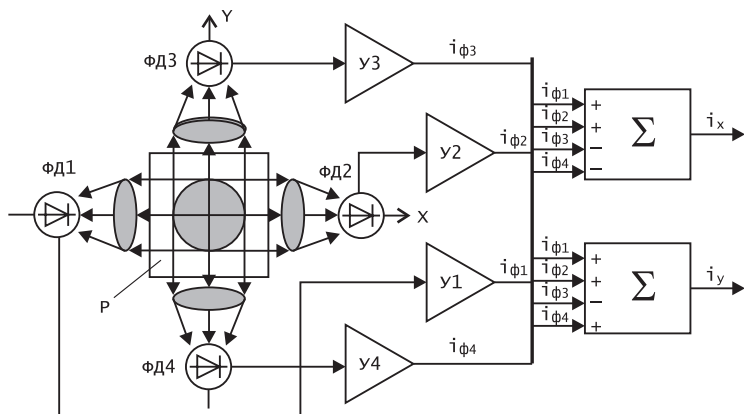


Рис. 3.19. Двухкоординатное фотоприемное устройство

Использование сканирующих лазерных датчиков позволяет добиваться высокой степени точности при измерении расстояний. В Великобритании разработан способ, заключающийся в совместном сканировании двумя пересекающимися под углом к горизонтальной плоскости веерообразными лазерными плоскостями (69). Точность определения расстояния зависит от взаимного пространственного положения пересекающихся лазерных плоскостей относительно горизонтальной плоскости. При постоянном и известном угле между плоскостями во время их кругового совместного сканирования каждая из них образует одинаковый угол с горизонтальной плоскостью.

Это условие существенно влияет на степень сложности устройства излучателя. Для исключения возможности нарушения равен-

ства углов предусматриваются специальные меры, обеспечивающие точное горизонтирование сканирующего узла.

С целью повышения точности и надежности измерений в Новочеркасском политехническом институте создана более совершенная ИИС, использующая описанный принцип. Однако, в этом случае первый временной интервал определяют между моментами пересечения верхнего и нижнего конца вертикального базиса лазерной плоскостью 1, а второй — между моментами пересечения верхнего и нижнего конца базиса лазерной плоскостью 2 (рис. 3.20). Устройство дополнительно включает электронный блок, обеспечивающий необходимую последовательность подачи сигналов с фотоприемников на мини-ЭВМ для обработки информации.

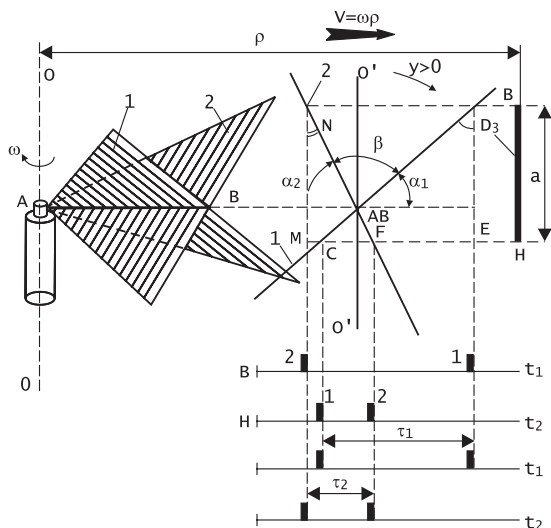


Рис. 3.20. Лазерная система для измерения расстояния  
1—2 — лазерные плоскости; 3 — базис; 4 — высота базиса

Если угол  $\beta$  между плоскостями известен и первоначально они ориентированы относительно линии вертикали  $O'-O'$ , проходящей через линию А-В пересечения плоскостей так, что биссектриса угла  $\beta$  с ней совпадает, то будет выполнено условие

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \text{ и } \tau_1 = \tau_2 = \tau$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — углы, образованные плоскостями 1 и 2 с плоскостью горизонта.

Допустим, что в результате изменения углового положения сканирующего узла излучателя произошел совместный поворот пересекающихся лазерных плоскостей вокруг их линии пересечения А-В по часовой стрелке на некоторый угол  $\varphi$ . Плоскость 1 составит с плоскостью горизонта угол  $\alpha_1$ , а плоскость 2 угол  $\alpha_2$ . Соответственно изменяются и соотношения между временными интервалами  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Очевидно, что для фиксированного значения  $\rho$  будет справедливо следующее соотношение:  $\tau_1 > \tau_2$ . Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  можно представить как:

$$\alpha_1 = \alpha - \varphi; \alpha_2 = \alpha + \varphi.$$

Из рассмотрения треугольника  $CDE$  следует:

$$CE/\sin\left[\frac{\pi}{2} - (\alpha - \varphi)\right] = a/\sin(\alpha - \varphi).$$

Аналогично из треугольника  $FMN$  следует:

$$FM/\sin\left[\frac{\pi}{2} - (\alpha + \varphi)\right] = a/\sin(\alpha - \varphi).$$

Так как  $CE = \tau_1 \omega \rho$ ,  $FM = \tau_2 \omega \rho$ , то последние два соотношения можно представить в виде:

$$\tau_1 \omega \rho / \cos(\alpha - \varphi) = a / \sin(\alpha - \varphi); \quad (3.1)$$

$$\tau_2 \omega \rho / \cos(\alpha + \varphi) = a / \sin(\alpha + \varphi). \quad (3.2)$$

Последние два уравнения образуют систему относительно двух неизвестных  $\rho$  и  $\varphi$ . Сложив отдельно левую и правую части этих уравнений можно получить:

$$\omega \rho (\tau_1 + \tau_2) = a [ctg(\alpha - \varphi) + ctg(\alpha + \varphi)]. \quad (3.3)$$

После же вычитания из левой и правой первого уравнения левых и правых частей второго уравнения имеем:

$$\omega \rho (\tau_1 - \tau_2) = a [ctg(\alpha - \varphi) - ctg(\alpha + \varphi)]. \quad (3.4)$$

С учетом тригонометрической формулы приведения

$$ctg\alpha \pm ctg\varphi = \pm \sin(\alpha \pm \varphi) / \sin\alpha \cdot \sin\varphi$$

выражения (3.3) и (3.4) соответственно можно записать в виде:

$$\omega \rho (\tau_1 + \tau_2) = a \sin 2\alpha / \sin(\alpha - \varphi) \cdot \sin(\alpha + \varphi);$$

$$\omega \rho (\tau_1 - \tau_2) = a \sin 2\alpha / \sin(\alpha - \varphi) \cdot \sin(\alpha + \varphi).$$

С учетом тригонометрической формулы приведения

$$\sin \alpha \cdot \sin \varphi = 0,5[\cos(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha + \varphi)]$$

последние два выражения принимают вид:

$$\omega\rho(\tau_1 + \tau_2) = a \sin 2\alpha / 0,5(\cos 2\varphi - \cos 2\alpha); \quad (3.5)$$

$$\omega\rho(\tau_1 - \tau_2) = a \sin 2\alpha / 0,5(\cos 2\varphi + \cos 2\alpha). \quad (3.6)$$

Отсюда можно записать

$$\cos 2\varphi - \cos 2\alpha = 2a \cdot \sin 2\varphi / \omega\rho \cdot (\tau_1 + \tau_2). \quad (3.7)$$

После подстановки выражения (3.7) в выражение (3.5) имеем

$$\omega\rho(\tau_1 + \tau_2) = \sin 2\alpha \omega\rho(\tau_1 - \tau_2) / \sin 2\varphi.$$

Из последнего следует, что

$$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} = \frac{\sin 2\alpha}{\sin 2\varphi}.$$

Решение последнего уравнения относительно  $\sin 2\varphi$  дает

$$\sin 2\varphi = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \sin 2\alpha. \quad (3.8)$$

Решив уравнение (3.5) относительно  $\rho$ , можно получить

$$\rho = 2a \frac{\sin 2\alpha}{\omega(\tau_1 + \tau_2)(\sqrt{1 - \sin^2 2\varphi} - \cos 2\alpha)}. \quad (3.9)$$

Подставив выражение (3.8) в (3.9), получим

$$\rho = 2a \frac{\sin 2\alpha}{\omega(\sqrt{(\tau_1 + \tau_2)^2 - (\tau_1 - \tau_2)^2 \sin^2 2\alpha} - (\tau_1 + \tau_2) \cos 2\alpha)}. \quad (3.10)$$

Если угол между пересекающимися плоскостями  $\beta = 90^\circ$ , то  $\alpha = 45^\circ$ . В этом случае  $\sin 2\alpha = 1$ ,  $\cos 2\alpha = 0$ , тогда

$$\sqrt{(\tau_1 + \tau_2)^2 - (\tau_1 - \tau_2)^2} = 2\sqrt{\tau_1 \tau_2}.$$

В этом случае выражение (3.10) принимает простой вид

$$\rho = a / \omega \sqrt{\tau_1 \tau_2}. \quad (3.11)$$

Выражения (3.10) и (3.11) получены при начальном условии, что углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , образованные плоскостями 1 и 2 о плоскостью гори-



зонта, не равны друг другу. Если рассчитывать расстояние по этим выражениям, то точность не будет зависеть от взаимного углового положения веерообразных плоскостей с плоскостью горизонта. Это повышает точность измерения в целом, так как исключает возможную систематическую погрешность и снижает требования к высокоточной пространственной стабилизации сканирующего узла излучателя. Независимость точности определения расстояния от углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , объясняется тем, что, если при сканировании излучением и произошел их взаимный поворот относительно их линии пересечения так, что временной интервал  $\tau_1$ , например, увеличился, то это приводит к соответствующему уменьшению временного интервала  $\tau_2$ .

Таким образом, для измерения расстояния в данном случае достаточно измерить два временных интервала, один из которых — время между моментами пересечения верхнего и нижнего концов вертикального базиса первой лазерной плоскостью, а второй — время между моментами пересечения верхнего и нижнего концов этого же базиса второй лазерной плоскостью. При этом необходимо знать только значение угла  $\beta$  между пересекающимися плоскостями, длину базиса и частоту сканирования  $\omega$  излучением.

Каждой лазерной плоскости соответствует свой временной интервал между моментами пересечения ею верхнего и нижнего концов вертикального базиса. Поскольку рассматриваемые лазерные плоскости абсолютно идентичны, то (хотя непосредственно это сделать нельзя) существует возможность на основе анализа временных и фазовых соотношений с помощью определенного алгоритма обработки информации временные интервалы  $\tau_1$  и  $\tau_2$  вычислить косвенно.

В зависимости от вида выполняемых работ к точности лазерных информационно-измерительных систем могут предъявляться разные требования. Для их выполнения необходимо проанализировать погрешности всех средств, входящих в систему. В общем случае все составляющие погрешности должны рассматриваться как случайные величины со своими законами распределения, а их совместное действие описываться соответствующим многомерным законом распределения. Правильный выбор систем контроля по точности позволяет обеспечить необходимое качество выполнения работ и избежать завышения стоимости средств контроля.

### 3.4. Ультразвуковые системы контроля роботов

Локационные датчики предназначены для получения информации о состоянии и свойствах объектов манипулирования и окружающей среды на определенном расстоянии от робота. Основная особенность таких датчиков — отсутствие непосредственного контакта между датчиками и поверхностью изучаемого объекта, что в свою очередь в значительной мере повышает их надежность к механическим повреждениям. Наибольшее распространение в настоящее время получили акустические и световые принципы построения локационных датчиков. В качестве акустических датчиков широко используют ультразвуковые локаторы, сущность работы которых заключается в излучении в окружающую среду ультразвуковых сигналов и приеме их от отраженного объекта. Расстояние до объекта определяется соответствующими приборами через время зарегистрированного отражающего сигнала. С помощью ультразвуковых локаторов также устанавливают и скорость перемещения объектов. При этом для измерения используется эффект, при котором скорость определяется по изменению частоты отражающего сигнала.

В качестве ультразвукового сканнера у мобильных роботов используются соответствующие сенсоры для определения расстояний. В основе принципа их действия могут использоваться два метода. При первом из них от ультразвукового передатчика излучается пучок импульсов и измеряется время их прохождения до объекта и обратно к приемнику, установленному рядом с передатчиком:

$$s = \frac{c \cdot t}{2},$$

где  $c$  — скорость звука;  $t$  — время прохождения импульса.

Для пространства с простой геометрией, например, для пустых помещений с малым количеством препятствий с большой площадью поверхности, реализовать этот метод сравнительно легко. Ультразвуковой сенсор должен лишь генерировать сигналы для передатчика, а таймер регистрировать время их прохождения.

Проблемой для распространения ультразвукового сигнала являются находящиеся на его пути различные препятствия, вызывающие появление сигналов многократного эхо. Локализация их час-

то не представляется возможной. Для решения данной проблемы более подходящим является использование метода измерений, заключающегося в том, что в качестве импульсов применяются не простые, а модулированные сигналы. Он аналогичен методам, используемым в радарной технике, и позволяет локализовать влияние различных препятствий. Хотя объемы связанных с оценкой информации вычислений являются значительными, однако современные средства вычислительной техники позволяют без труда справиться с ними. Применяемые для реализации данного метода преобразователи могут работать в зависимости от требуемой точности в достаточно широком диапазоне частот (10—20 кГц). Передаваемые и принимаемые сигналы мультиплицируются и результаты при помощи фильтров раскладываются по спектральным составляющим [47, 53].

Реализация обоих методов возможна на одних и тех же технических средствах. Основными компонентами ультразвукового сенсора (рис. 3.21) кроме датчика и приемника являются аналоговый процессор, блок энерго-снабжения и параллельный интерфейс. Для работы с роботами используются сигналы передатчика с частотой 41 кГц. В самом простом случае излучается группа импульсов определенной ширины. Сигнал синхронизации производится посредством перемножения с прямоугольным импульсом, которым определяется последовательность следования импульсов (рис. 3.22).

Ультразвуковой передатчик является узкополосным. Его разрешающая способность определяется, главным образом, синхронизирующим импульсом. Как видно из рис. 3.22, он сопровождается широким спектром сопутствующих частот. Их происхождение

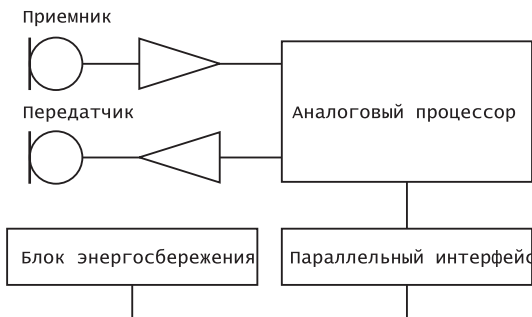


Рис. 3.21. Функциональная схема ультразвукового Сенсора

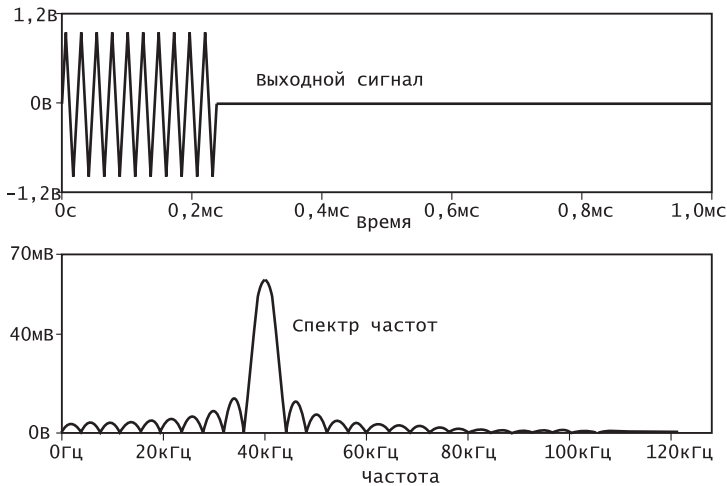


Рис. 3.22. Спектр сигнала ультразвукового импульса

описывается аналитическими зависимостями, отражающими поведение сигнала во временной и частотной областях:

$$u(t) = \sin(2\pi f_0 t) \cdot \exp\left[-\pi\left(\frac{t}{T}\right)^2\right];$$

$$U(f) = \frac{1}{2} [j\delta(f + f_0) - j\delta(f - f_0)] \cdot T \exp[-\pi(Tf^2)].$$

Результат перемножения обеих функций во временной области описывает спектр частот, представленных графически в нижней части рис. 3.28. Несущая частота (41 кГц) лежит на оси их преломления. Для подавления помехообразующих сопутствующих частот используется функция Гаусса:

$$G = \exp\left[-\pi\left(\frac{t}{T}\right)^2\right].$$

Расчет ее параметров производится программным путем. Результат их расчета для рассматриваемого случая приведен в графическом виде на рис. 3.23.

Насколько «сигнал Гаусса» способен улучшить процесс измерений за счет подавления имеющих место помех, позволяет судить график его спектра (рис. 3.24), полученный для той же частоты в

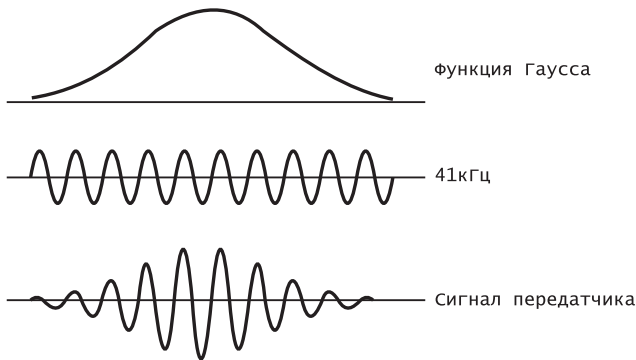


Рис. 3.23. Результат расчета параметров

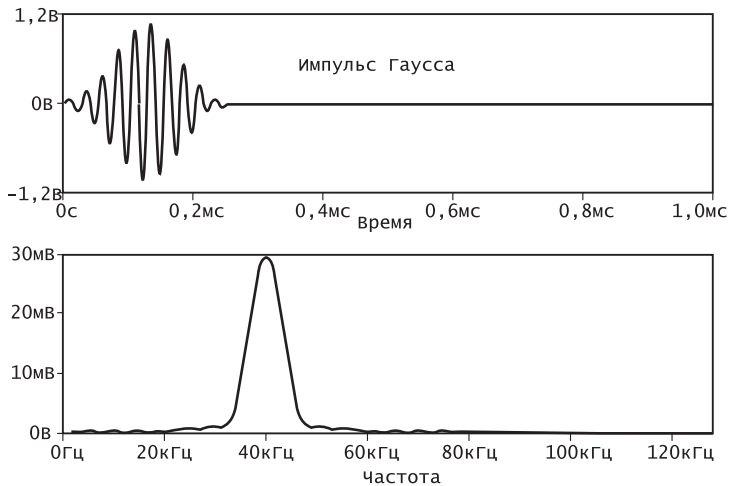


Рис. 3.24. Спектр частот импульса Гаусса

41 кГц , что и в рассматриваемом примере. Как видно, помехи являются в значительной степени сглаженными.

Изменение амплитуды ультразвукового сигнала в значительной степени зависит от материала, на который он попадает. Гладкие хорошо отражающие поверхности вызывают ее значительное увеличение. Использование современных преобразователей и возможность быстрой обработки сигналов позволяют получать объемы информации, достаточные для управления отделочными роботами.

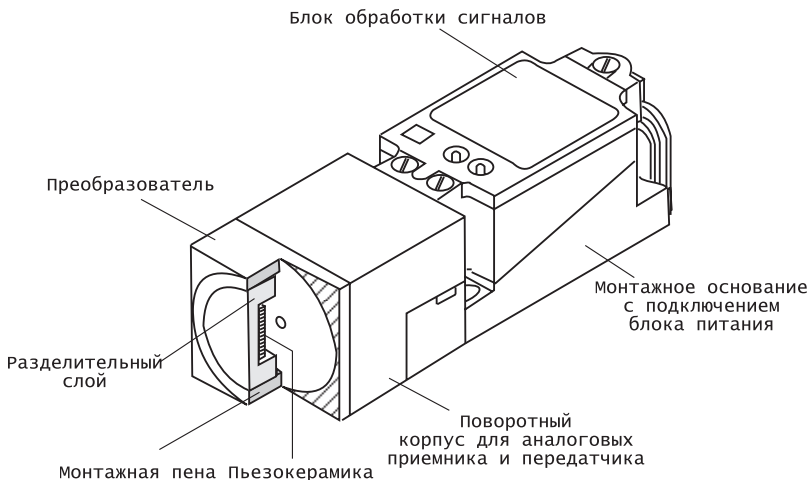
Особый интерес представляют дистанции измерений до 10 м. Именно в этом диапазоне наиболее часто подлежат управлению

сервисные роботы различного назначения. Обычные радиоизмерительные системы, из-за неизбежного применения небезопасных микроволн и слабости в распознавании предметов, лежащих вблизи от источника сигналов, использовать затруднительно. В этом случае требуется проводить чрезвычайно точные измерения отрезков времени, лежащих в области нано- или пикосекунд. В случае же использования акустических сигналов отрезки времени являются значительно более продолжительными, а значит и менее критичными в оценке.

Конструктивно ультразвуковой сенсор (рис. 3.25) состоит из трех частей:

- преобразователя с передатчиком и приемником;
- блока обработки сигналов;
- монтажного основания с блоком питания.

Преобразователь может монтироваться на основание под различными углами таким образом, чтобы быть в состоянии контролировать различные направления в пространстве. Штекерный разъем на монтажном основании обеспечивает простую замену сенсора без проведения специальных инсталляционных работ. Представленный на рис. 3.25 разрез сенсора показывает, что он включает в себя пьезокерамическую головку, разделяющий слой, выполненный в качестве осциллятора, и монтажную пену. Мон-



*Рис. 3.25. Конструктивное исполнение ультразвукового сенсора*

тажная пена выполняет функцию такого механического крепления, которое является малодемпфирующим, что очень важно для колебательной системы. Одновременно эта пена защищает прибор от попадания в него влаги извне.

Направлением дальнейшего развития ультразвуковых сенсоров для целей промышленной робототехники является создание и применение сенсоров с широким углом передачи или сенсоров узконаправленного излучения, но с регулируемым углом подачи сигнала, что позволяет им сканировать окружающее пространство. Широкоугольные сенсоры могут быть в дальнейшем реализованы на базе комбинации узкоугольных устройств и насадок в виде разного рода бленд. При этом распределение интенсивности излучения рассматривается как функция угла, т. е. также как это делается при использовании нескольких синхронизируемых моночастотных ультразвуковых передатчиков.

### 3.5. Системы технического зрения строительных роботов

Основным свойством оптических сенсоров является способность преобразования электрического тока в электромагнитную волну (свет) или наоборот. Под физическим понятием свет подразумевается электромагнитный спектр от ультрафиолетовой области ( $\lambda = 0,3\mu m$ ), через видимую его часть ( $0,38\mu m < \lambda < 0,78\mu m$ ), до инфракрасной области с длиной волны  $\lambda = 1,2\mu m$ . На начальном этапе применения оптических сенсоров в качестве передающих элементов преимущественно использовались лампы накаливания, а в качестве приемных — фотосопротивления. Однако эффективность их применения существенно ограничивалась рядом неблагоприятных присущих им свойств. Например, из-за большой инерционности ламп накаливания излучаемый ими свет не мог модулироваться и, тем самым, затруднялось выделение полезного светового сигнала из общего потока света. В настоящее время в качестве передающих оптических элементов используются люминесцентные и полупроводниковые лазерные диоды, а в качестве приемников — фотодиоды и фототранзисторы.

Светолокационные датчики основаны на принципе обнаружения светового потока, отраженного от объекта. Сравнительно простые светолокационные датчики перекрывают прямой световой

поток. При совмещении предмета с фотодиодной матрицей часть фотодиодов затеняется, преобразуя сигналы информационной системы в коды, соответствующие координатам предметов.

Для ряда явлений не достаточно в качестве результата иметь лишь логический ответ — Да/Нет. Это относится в особенности к управлению роботами, когда необходимо иметь очень точные данные о размерах объекта манипулирования и расстоянии до него. Оптические способы измерений позволяют достаточно просто и эффективно распознавать такие объекты. Например, инфракрасное излучение светодиода направляется на объект. Отраженный его поверхностью свет проектируется приемной оптикой на фотоэлемент (рис. 3.26). В зависимости от расстояния до объекта принимаемый световой поток попадает на различные точки фотоэлемента. Эти смещения выражаются в зависящем от расстояния напряжении сенсора. Исполнение приемных элементов может быть различным. Наиболее предпочтительным является использование разделенных светочувствительных пластин. Соотношение фотопотоков обоих приемников является в этом случае функцией расстояния. Необходимая для определения значений сигналов электроника монтируется в сенсор. Через устройства сопряжения имеется возможность считывания значений сигналов. При помощи довольно простых программ обработки информации робот получает возможность распознавать объект и определять до него расстояние. При каждом изменении положения робота сенсор сканирует пространство в определенном угловом диапазоне и заново определяет расстояния.

Известно, что 90 % информации об окружающей среде человек получает через зрение. Механизм зрительного восприятия чрезвычайно сложен и до конца не изучен. Сложность его определяется

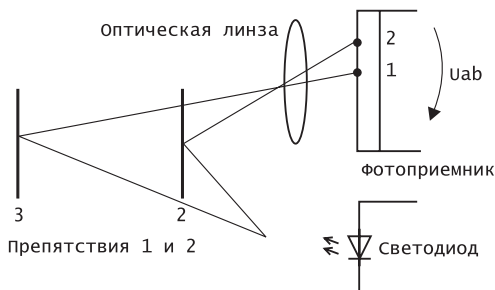


Рис. 3.26. Принцип измерения расстояния оптическим способом



самим понятием «видеть». Видеть — значит понимать полученную и переданную нашими глазами информацию, которая влияет на наше физическое состояние. Следовательно, видеть это не только рассматривать предмет, но и понимать его, т. е. переработать полученную информацию и представить в виде, удобном для дальнейшего использования. Поэтому и реализация зрительного сенсора является весьма сложной. В настоящее время разрабатываются средства очувствления роботов, обеспечивающие аналогию (хотя далеко не адекватную) зрительному восприятию человека. С целью облегчения решения такой задачи и создания более простых и надежных средств зрительной информации предполагается, что на современном уровне развития техники целесообразна разработка специализированных зрительных сенсоров. Такое техническое зрение хотя и не обеспечивает видение в полном объеме, но решает конкретную задачу получения необходимой информации в пределах заданных технологических процессов.

Метод разработки систем технического зрения предполагает следующие фазы: формирование изображения, его интерпретация и реакция робота. Формирование изображений это излучение сигналов (световых, ультразвуковых и т. п.), которые могут взаимодействовать с объектами (отражаться от них или поглощаться ими), и получение первичных изображений объектов (сцен) с помощью датчиков [23]. В качестве датчиков зрительного восприятия используют датчики телевизионного типа (диссекоры, видиконы), приборы с зарядовой связью — ПЗС, фотодиоды, преобразователи изображений на жидких кристаллах, лазерные голографические датчики изображения, ультразвуковые, рентгеновские и другие датчики. Интерпретация изображений предполагает преобразование полученных с датчиков сигналов (например, в электрические) для представления изображения уже в виде информации, удобной для выделения тех характерных признаков предметов, которые необходимы для правильного выполнения роботом технологических функций. После выделения таких сигналов происходит распознавание и сравнение полученных характеристик с заданными во время обучения робота. После их сравнения робот принимает соответствующие решения. Например, при сортировке строительных материалов, движущихся по конвейеру, в зависимости от их формы круглые направляются в тару, находящуюся с левой стороны, прямоугольные — с правой. В качестве датчиков используют телевизионные камеры, приборы с зарядовой связью, преобразователи напряжений. Теле-

визионные камеры, применяемые в системах технического зрения, отличаются от бытовых тем, что они создаются в промышленном исполнении для работы в более тяжелых атмосферных условиях, подверженных загрязнению пылью, влагой и другими агрессивными примесями. Например, наибольший эффект от использования сортирующих роботов достигается при их совместной работе с установкой для автоматического визуального контроля поверхности кровельной бетонной черепицы [2]. Установка (рис. 3.27) состоит из двух дисплейных систем типа BES 2000, осуществляющих обработку и представление информации в виде реального изображения, и двух связанных с ними телекамер, типов ZPK 1021 и ZPK 1040, для оптического контроля поверхности элементов. Каждая камера снабжена специальным устройством для освещения поверхности. Осуществляется также координация работы с сортировочным устройством.

Камера ZFK 1021 с разрешающей способностью 256 строк предназначена для контроля поверхности пазов черепицы, а ZFK 1040 с разрешающей способностью 1024 строки — для контроля всей ее поверхности.

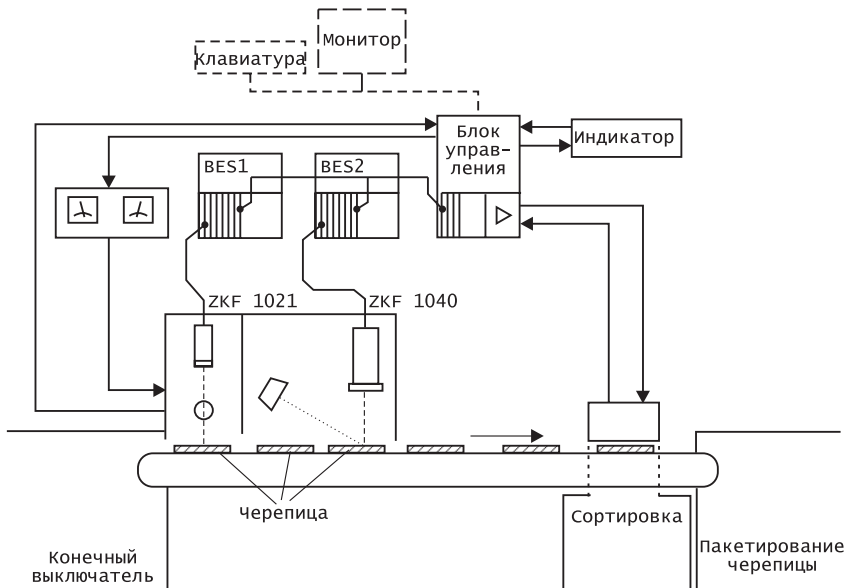


Рис. 3.27. Автоматический оптический контроль поверхности черепицы

Установка включается в технологический процесс непосредственно после завершения изготовления черепицы и обеспечивает обнаружение и оценку следующих дефектов: наслоений, царапин, раковин на поверхности черепицы, скола канта черепицы, деформации, скалывания в области паза черепицы. Она позволяет также оценивать отклонения высоты паза и габаритных размеров черепицы от допустимых значений.

Сканирование поверхности бетонной черепицы происходит построчно поперек направления ее перемещения каждой камерой в отдельности. Разрешающая способность строки определяется количеством сенсоров и составляет в данном случае около 0,3 мм. Освещение поверхности осуществляется при помощи галогенных ламп методом боковой подсветки, что позволяет оценить состояние теневых участков бракованной зоны.

Каждая система BES непрерывно принимает от камеры данные изображения и передает их код в соответствующий накопитель. Встроенные микропроцессоры обрабатывают информацию и, в случае брака, выдают сообщения в общую систему управления о его характере и времени появления. Она осуществляет координацию работы установки с сортировочным устройством. Бракованные черепицы автоматически отбираются из готовой продукции.

Центральная система управления и системы BES реализованы на базе 8-битной серии типа К 1520. Единство в обработке информации с тактовой частотой 2,5 мГц обеспечивает сканирование одной строки за 5 мс. Установка гарантирует высокое качество контроля при скорости транспортирования элементов до 0,5 м/с. Использование системы при скорости перемещения черепицы до 1,5 м/с возможно при реализации ее на базе 16-битной серии.

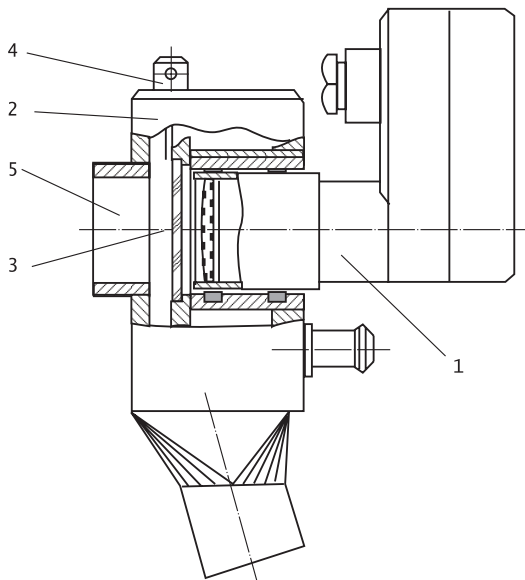
Надежность работы этой и аналогичных ей установок во многом определяется решением проблемы защиты и очистки оптических элементов от возможного их загрязнения. Последнее тем более важно в связи с очень сложными условиями окружающей среды, характеризующимися сильной запыленностью от используемых строительных материалов (цемент, бетон, глина и т. п.). Большое количество электростатических частиц пыли различной величины, покрывающих поверхности оптических элементов, оказывают одинаково сильное влияние на их работу, независимо от того работают они в видимом или инфракрасном диапазоне, что может привести к выходу установки из строя и остановке всего технологического процесса. Давно уже известные устройст-

ва, позволяющие предотвращать или замедлять загрязнение, не находят широкого применения из-за больших затрат на их содержание и обслуживание.

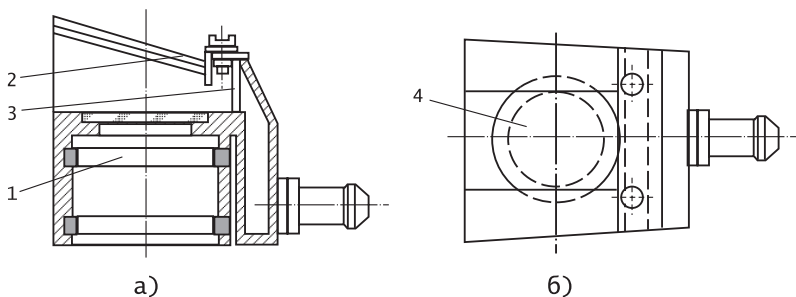
В настоящее время для этих целей используются методы промывки и продувки поверхности оптических элементов. Принцип их действия основан на периодической подаче воды или воздуха внутрь специального устройства, в которое на это время вставляется оптический элемент.

На рис. 3.28 показана схема устройства для очистки оптической поверхности фотоэлементов водой. Блок с фотоэлементом вставляется в корпус устройства таким образом, чтобы оптическая поверхность попала в зону, заполненную проточной водой, которая смывает с нее налипшую грязь. Сенсор осуществляет непрерывное слежение за подачей на вход воды, которая после прохождения зоны с проточной водой сразу же подается на выход через отводящий шланг. При отклонениях от заданного режима промывки сенсор автоматически подает сигнал на регулирующий магнитный вентиль. Регулирование можно осуществлять и вручную по световому или звуковому сигналу от сенсора. На рис. 3.29 представлена схема устройства для воздушной очистки поверхности оптики. Принцип действия аналогичен предыдущему. Прочность вставки в устройство блока с фотоэлементом обеспечивается при помощи уплотнения. В устройство посредством шланга подается сжатый воздух при помощи вентиля, связанного с компрессором. Выходит воздух через поднимающуюся под острым углом в задней стенке щель, выполненную таким образом для того, чтобы не создавать помех процессу очистки элементов на предназначенной для этого площадке. При этом с передвижкой ярма веерообразный поток воздуха отклоняется так, что поверх площадки возникает всасывание. При всасывании удаляется пыль, которая накопилась за время паузы в работе установки. Подача воздуха осуществляется или через определенные промежутки времени, задаваемые реле, или же по сигналу чувствительного элемента, реагирующего на уменьшение проходимости светового потока через рабочий участок.

Для повышения точности измерений служат твердотельные датчики, основанные на приборах с зарядовой связью. Принцип работы ПЗС заключается в использовании материалов, способных накапливать электрические заряды при их освещении. Разновидностью ПЗС являются обычные фотодиоды, смещенные в обратном направлении. Заряды, накопленные под фоточувствительным



*Рис. 3.28. Устройство для очистки оптической поверхности фотоэлемента водой*  
1 — фотоэлемент; 2 — корпус устройства; 3 — зона заполнения водой; 4 — сенсор; 5 — вход в устройство; 6 — отводящий шланг



*Рис. 3.29. Устройство для воздушной очистки фотоэлемента*  
а — поперечный разрез; б — вид сверху  
1 — уплотнение; 2 — задняя стенка; 3 — площадка для очистки; 4 — ярмо

элементом, переносятся затем в регистр считывания, усиливаются и поступают в блок преобразования. Преобразователи изображений представляют собой приборы на жидких кристаллах, в кото-

рых изображение преобразуется в световой поток, пропорционально модулированный локальной интенсивности излучения в изображении. Принцип работы заключается в том, что световой поток, освещающий сцену взаимодействия робота с окружающей средой, попадает на стеклянную пластину в виде распределения интенсивности излучения входного изображения (рис. 3.30). В фотопроводнике происходит соответствующее перераспределение электронов, которые преобразуются в соответствующие электрические потенциалы внутри жидкого кристалла пропорционально локальной интенсивности света со стороны входа. Поскольку в этом случае сигналы выходят поляризованными, то для получения полной картины пластину с изображением освещают когерентным светом. При этом на выходе получают картину пространственного распределения интенсивности света, пропорциональную действительному изображению. Полученная с помощью описанных выше средств информация преобразуется затем в логических блоках и выдается на исполнительные устройства робота. Для облегчения технического зрения на практике выбирают достаточно простые принципы для идентификации объектов, с которыми взаимодействует робот. Обработка изображений и их интерпретация являются областью, относящейся к интеллекту. Они связаны с генерированием гипотез об объекте, их развитием, обратным проектированием предполагаемого трехмерного объекта в область изображений и т. д.

Электрическое состояние фотодиодов считывается в очень короткие промежутки времени и информация об изображении передается в виде последовательности сигналов.

**ПЗС-микросхема**

1 — пиксел

Линейная схема = Строчная камера

Полевая схема = Матричная камера

**Видеосигнал**

Развертка (А) кольца с повторяющимся сигналом

**Цифровой сигнал**

**Разрешение (Пример системы распознавания изображения с 256 × 240 пиксел)**

Так как разрешение растет с увеличением сцены, то она должна выбираться наиболее целесообразной по размеру.

a — размер сцены

d — наименьший распознаваемый диаметр

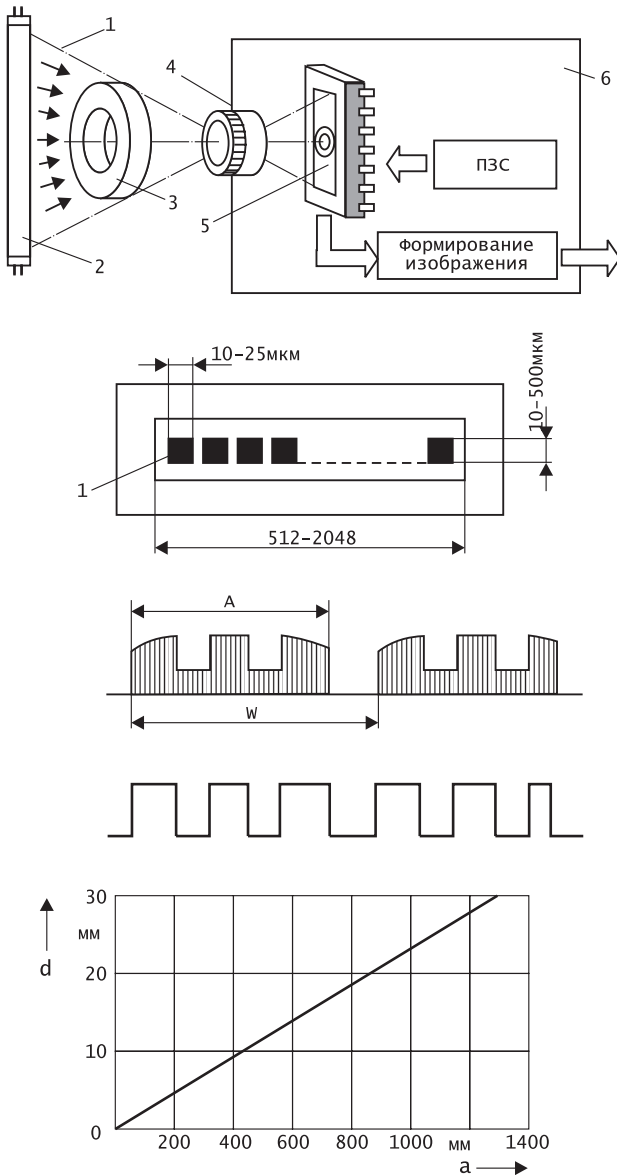


Рис. 3.30. Принцип действия ПЗС-камеры  
 1 — область обзора, 2 — источник света, 3 — объект, 4 — оптика, 5 — отбражение, 6 — камера

# Глава 4. Планирование траекторий движения робота при выполнении операций

## 4.1. Постановка задачи планирования движения строительных роботов

Любой строительный робот при выполнении той или иной технологической операции осуществляет перемещение детали или инструмента в соответствии с определенной траекторией. Обеспечение целенаправленного движения рабочего органа робота вдоль заданной траектории с определенной ориентацией и скоростью составляет основную цель управления исполнительными приводами робота. Для ее осуществления необходимо задание пространственных траекторий и формирование законов управления, обеспечивающих движение схвата или инструмента по этим траекториям (рис. 4.1).

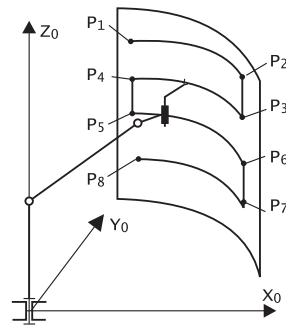


Рис. 4.1. Траектории движения малого робота

В связи с этим важное значение имеет рассмотрение вопросов, связанных с планированием траекторий движения роботов и формированием законов изменения обобщенных координат при отработке движений. Планирование движений строительных роботов имеет свои характерные особенности. Они связаны со спецификой строительных операций, условиями строительных площадок, недерменированностью окружающей среды, ограниченностью рабочего пространства и др. В связи с важностью задачи планирования движений и спецификой ее решения для строительных работ в данной главе остановимся подробно на ее рассмотрении. В общем случае для строительных роботов задача планирования движений включает три основных этапа:

- построение каркаса траектории движения;
- планирование движения манипулятора;



— формирование законов управления.

Структурная схема, выполнения основных этапов планирования движения роботов приведена на рис. 4.2. Построение каркаса траектории движения выполняется на основе технологических требований и ограничений окружающей среды. Результатом этого этапа являются таблица параметров граничных и узловых точек траектории движения и таблица скоростей перемещения детали или инструмента на отдельных участках траектории. Кроме этого, при построении траектории движения робота следует установить допустимые погрешности прохождения отдельных ее участков и узловых точек. Для строительно-монтажных, отделочных, бетоноукладочных и ряда других роботов при проектировании траекторий движения следует для каждого участка траектории установить наиболее целесообразный тип траектории. При построении таких траекторий могут использоваться прямолинейные участки, дуги окружности, кусочно-ломанные участки или криволинейные участки, сглаженные аппроксимируемыми многочленами. Такой подход позволяет выполнить разделение траектории движения на типовые элементарные траектории, что значительно упрощает в дальнейшем процедуру планирования движения манипулятора. Для большинства строительных роботов описание траектории движения детали или инструмента и их ориентации в узловых точках следует выполнять в базовой системе координат робота  $X_0 Y_0 Z_0$ . Исключение может составить описание траекторий для роботов, выполняющих ориентацию и позиционирование монтируемых конструкций в системе координат здания или сооружения, т. е. в глобальной системе координат, в которой работает другое оборудование, выполняющее основные технологические операции по транспортировке и установке деталей. Глобальную систему координат для описания рабочих траекторий следует также использовать в отделочных роботах с адаптивным и супервизорным управлением.

Выполнение строительным роботом технологических операций требует планирования движения манипулятора в пространстве и времени. Планирование движений выполняется на основе построенных траекторий движения, таблиц параметров узловых точек и скоростей движения. Задача планирования состоит в разработке математического описания желаемого движения манипуляционной системы робота при обработке заданной траектории движения. В результате ее решения обеспечивается получение временных законов изменения обобщенных координат  $g(t)$  или их скоростей

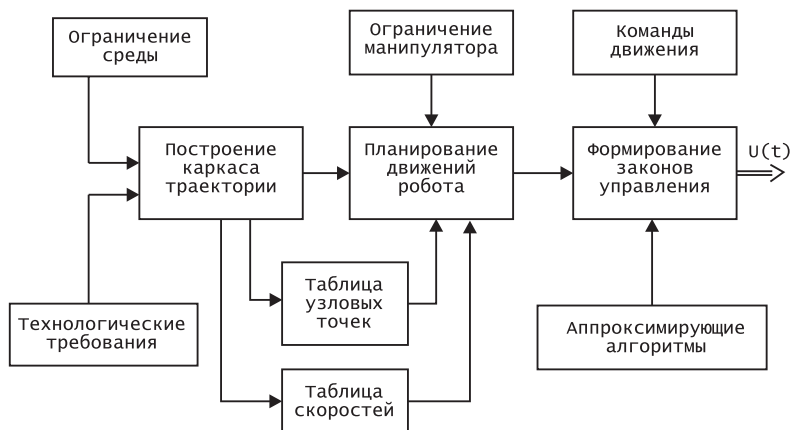


Рис. 4.2. Основных этапов планирования движений робота

$u(t)$ . Чаще всего решение задачи управления по заданной пространственной траектории сводится к формированию значений программной траектории  $g(t_i)$  в дискретные моменты времени  $t_0, t_1, t_2 \dots t_k$  с определенной частотой дискретизации. При этом задается точность отработки траектории или точность достижения конечного значения  $g(t_k)$ . В большинстве случаев планирование движений строительных роботов должно выполняться с учетом ограничений на характер движения деталей или инструмента. В случае монтажных роботов при планировании движений следует учитывать ограничения динамики манипулятора. Эти же ограничения должны быть учтены при планировании движений роботов, выполняющих силовые операции. Планирование движений робота значительно усложняется в случае использования манипуляторов с избыточным числом степеней подвижности. В этом случае задача планирования становится неоднозначной и ее решение выполняется на основе задания целевой функции и поиска оптимального каркаса программных траекторий, удовлетворяющих этому критерию. В качестве целевой функции следует использовать обобщенный критерий качества, минимизирующий общее время отработки траектории или суммарное движение всех степеней подвижности.

Планирование движений робота выполняется в пространстве обобщенных координат или в декартовых координатах [32]. Если планирование выполняется в системе обобщенных координат, то для полного описания движения манипулятора задается зависимость от времени обобщенных координат. В зависимости от при-

нятых законов управления приводами робота могут формироваться обобщенные скорости и ускорения. Если планирование выполняется в базовых координатах робота, то на основе спроектированной траектории движения схвата (инструмента) определяются временные законы пути, скорости и ускорения при движении рабочего органа по заданной траектории. Затем на их основании формируются законы изменения обобщенных координат, их скоростей и ускорений. Особенностью решения задач планирования является необходимость ее выполнения в режиме реального времени. При решении задач планирования движений манипулятора следует учитывать, что коррекция параметров движения манипулятора выполняется дискретно с заданным шагом, а планируемая траектория и законы изменения обобщенных координат должны обеспечивать непрерывность функции, их первой и второй производной. Значение параметров движения для строительных роботов должны генерироваться с частотой 10—200 Гц.

Анализ планирующих алгоритмов показал, что для строительных роботов целесообразно планирование движений выполнять в пространстве обобщенных координат. Исключения составляют роботы предназначенные для позиционирования монтируемых конструкций и работающие синхронно с другим оборудованием, а также технологические роботы, предназначенные для выполнения силовых операций. Начальные и конечные точки траекторий движения желательнее задавать в базовой системе координат, что позволит более точно задавать положение и ориентацию схвата или инструмента. Суть различных способов планирования сводится к интерполяции выбранной траектории полиномами и выбору последовательности опорных точек, в которых производится коррекция параметров движения манипулятора.

При планировании движений манипулятора строительного робота может применяться один из следующих подходов. Для планируемой траектории движения задается набор ограничений на положение, скорость и ускорение в узловых и граничных точках траектории, а также условия непрерывности и гладкости траекторий и на основании их планировщик выбирает, из некоторого класса функций многочлен, удовлетворяющий этим ограничения и проходящий через узловыe точки. Другой подход связан с заданием траектории движения в виде некоторой аналитической зависимости. Планировщик выполняет аппроксимацию заданной траектории в присоединенных или декартовых координатах.

При управлении строительными роботами задача планирования движений может иметь несколько постановок в зависимости от выполняемых технологических операций. Для строительно-монтажных роботов траектория движения захватного устройства обычно состоит из прямолинейных участков. Задача планирования состоит в том, чтобы переместить захват робота из начального положения  $H(t_0)$  в конечное положение  $H(t_k)$  за определенное время  $T=t_k-t_0$  или с заданной скоростью  $v_3$ . При решении этой задачи, как правило, возникают дополнительные требования, связанные с ориентацией схвата в процессе его перемещения вдоль прямолинейной траектории. Особое внимание следует уделять планированию движений монтажных роботов, связанных с окончательной ориентацией и установкой деталей, когда требуется строгое вертикальное или горизонтальное перемещения схвата без изменения его ориентации. Перечисленные задачи решаются на основе точных аналитических описаний или с использованием метода математического программирования. При управлении отделочными роботами обычно возникает задача планирования движений вдоль горизонтальных и вертикальных линий, которые располагаются с определенным шагом параллельно друг другу. В этом случае исходными данными для решения задачи планирования являются координаты начальной и конечной точек первого участка и шаг, а также технологическая скорость движения инструмента. Планирование движений бетоноукладочных роботов можно выполнять на основе использования кубических сплайнов. При этом шаг участков разбиения определяется в зависимости от кривизны траектории перемещения рабочего органа и точности ее отработки. Что касается роботов, используемых на предприятиях строительной индустрии, то планирование их траекторий движения выполняется аналогично промышленным роботам, используемым для выполнения родственных операций в других отраслях.

Полученные в результате планирования движений робота законы изменения обобщенных координат далее должны быть преобразованы в управляющие воздействия для исполнительного уровня управления, т. е. на их основе должны быть сформированы зависимости  $U(t)$ , обеспечивающие устойчивость движения относительно программной траектории. Для отделочных, бетоноукладочных и монтажных роботов, на этапе выполнения ими транспортных операций, можно использовать простейший алгоритм пропорционального регулирования:

$$U_i(t) = C[g_i(t) - g_{pi}(t)] \rightarrow i = 1 \dots m. \quad (4.1)$$

Для других технологических операций строительные роботы должны иметь более сложные законы формирования управляющих воздействий на привода. В частности следует рекомендовать введение адаптивной составляющей, учитывающей динамические характеристики манипуляционной системы. В этом случае манипулятор следует рассматривать как многозвенный механизм с динамическими связанными движениями отдельных звеньев. Введение в управление адаптивной составляющей:  $U(t) = U_n(t) + U_a(t)$ , позволяет развязать динамику степеней подвижности и уменьшить объем вычислений при формировании управляющих воздействий.

При управлении рядом технологических строительных роботов планирование движений может выполняться на основе алгоритмов, вырабатывающих управляющие воздействия пропорциональные скорости движения звеньев манипулятора. Командные скорости  $\dot{q}$  изменения обобщенных координат, обеспечивающие заданную скорость движения технологического инструмента  $\dot{S}^0 = [\omega_1^0, \omega_2^0, \omega_3^0, \dot{\rho}_1^0, \dot{\rho}_2^0, \dot{\rho}_3^0]$ , формируются на основе решения обратных задач кинематики о скоростях. Компоненты вектора скорости вырабатываются на этапе проектирования траекторий движения. При использовании алгоритмов управления по вектору скорости, необходимо обязательно предусматривать контроль положения и ориентации рабочего органа при движении по траектории. В задачу планирования также входит определение корректирующего алгоритма и периодичности коррекции.

## 4.2. Построение каркаса траектории движения робота

Если в промышленной робототехнике задание траекторий движения в основном выполняется в режиме обучения, то в условиях строительной площадки это в большинстве случаев невозможно или вызывает значительные трудности. Поэтому особенностью строительной робототехники является необходимость аналитического задания траекторий движения. Рассмотрим более подробно решение вопросов, связанных с построением траекторий движения для различного вида строительных роботов. Анализ роботизируемых строительных операций показывает, что траектории дви-

жения рабочего органа манипулятора определяются в первую очередь технологией выполняемой операции. Технологическими требованиями устанавливается плавность и гладкость траектории, ориентация схвата или инструмента в каждой ее точки, скорости его перемещения вдоль траектории. Кроме того, при проектировании траекторий движения учитывается расположение технологического оборудования, условия и ограничения окружающей среды. Перемещения рабочего органа манипулятора могут задаваться набором граничных и узловых точек или аналитическим зависимостями. При задании точек траектории определяется не только их положение в системе координат робота, но и ориентация рабочего органа в каждой из них.

В большинстве случаев траектории движения монтажных, отделочных, бетоноукладочных и других роботов представляют сложные пространственные траектории, состоящие из прямолинейных участков, сопрягающих дуг окружностей или сглаженных криволинейных участков. При проектировании движений манипуляционной системы робота учитываются также требования к характеру движения, обеспечивающие требуемую плавность и непрерывность траектории, непрерывность скоростей и ускорений. Таким образом, любая сложная траектория движения может быть представлена в виде последовательности типовых элементарных участков, для которых в составе программного обеспечения роботов включаются типовые планирующие алгоритмы движения. В связи с этим планирование движений любого строительного робота можно свести к планированию типовых элементарных движений исполнительного механизма. Проектирование траекторий движения захватного устройства манипулятора или технологического инструмента следует выполнять с учетом ограничений, как на саму траекторию, так и на перемещения звеньев манипулятора. При планировании траектории движения в недерменированной среде следует учитывать возможный характер ее изменения.

Роботизация монтажных операций с помощью специализированных кранов-манипуляторов с программным и адаптивным управлением предусматривает транспортирование конструкций в зону установки, ее ориентацию и установку в проектное положение. При построении траектории перемещения детали в зону монтажа следует учитывать изменение положения механизмов при выполнении работ, изменения состояния окружающей среды в зоне монтажа. Для исключения аварийных ситуаций при проекти-

ровании траектории транспортирования деталей должна учитываться форма и габаритные размеры, инерционные свойства конструкции, габариты монтажной зоны, ветровые нагрузки. Анализ технологии монтажа показал, что наиболее целесообразно использовать траектории движения состоящие из двух или трех прямоугольных участков (рис. 4.3). Они обязательно включают вертикальный подъем детали на заданную высоту, ее горизонтальное перемещение по прямой в точку позиционирования и вертикальное опускание детали в процессе установки. На высоких и протяженных объектах транспортирование деталей может выполняться по наклонной траектории, которая формируется после вертикального подъема детали из кассеты. Таким образом, траектория движения монтажного робота в общем случае может быть разделена на 4 участка, каждый из которых соответствует определенному виду операций: вертикальный подъем изделия ( $P_0 \rightarrow P_1$ ); прямолинейное перемещение в заданную зону ( $P_1 \rightarrow P_2$ ); горизонтальное перемещение в месту установки ( $P_2 \rightarrow P_3$ ); ориентирование и установка изделия в проектное положение ( $P_3 \rightarrow P_4$ ). Составляющие участки траектории обычно прямолинейны. При построении траектории движения между 1-м и 2-м участками и 2-м и 3-м участками желательно располагать сопрягающие участки, чтобы обеспечить плавный переход с одного участка траектории на другой и безостановочное движение до точки  $P_4$ , в которой в соответствии с требованиями технологии выполнения монтажных  $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$  работ следует обеспечить скорость движения равную нулю. Точки траектории задаются в системе координат здания. Для их описания удобно использовать матрицу  $S_T$ , каждый столбец которой содержит координаты точек  $P_i$  и углы Эйлера, описывающие ориентацию схвата в каждой точке:

$$S_T = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \theta_i \\ \varphi_i \\ \psi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ \theta_0 & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \varphi_0 & \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \varphi_4 \\ \psi_0 & \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Значения элементов этой матрицы определяются аналитически. Точность задания значений положения должна составлять

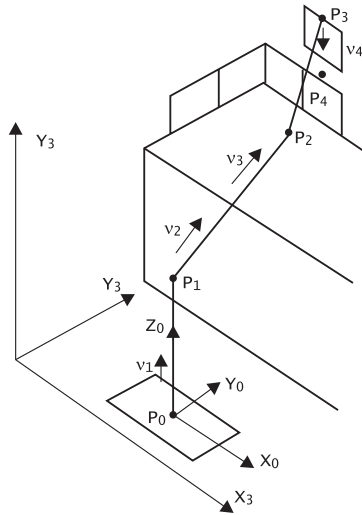


Рис. 4.3. Траектории транспортирования конструкции в зону монтажа

(0.5—1) мм, а точность ориентирующих углов должна быть не более 2 угл.мин.

Для каждого участка траектории задаются технологические скорости, которые в общем случае различны. Операция подъема детали выполняется на средних скоростях  $v_1$ . Операция транспортирования на 2 и 3 участках может вестись на максимальных скоростях  $v_2, v_3$ , которые ограничиваются массой груза и его габаритами. На последнем участке, где выполняются установочные операции, требующие повышенной точности позиционирования, скорость движения  $v_4$  детали выбирается пониженной. При построении траектории движения составляется матрица скоростей  $V_T$ :

$$V_T = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{\phi}_i \\ \dot{\psi}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{x}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{y}_1 & \dots & 0 \\ \dot{z}_0 & \dot{z}_1 & \dots & \dot{z}_m \\ 0 & \dot{\theta}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{\phi}_1 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{\psi}_1 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$



Первый и последний столбцы этой матрицы составлены на основании технологических требований подъема и опускания монтируемой конструкции. Прежде чем переносить конструкцию в зону монтажа ее следует приподнять над приспособлением или платформой строго вертикально без кручения. Установка конструкции в заданное положение также выполняется без изменения углов ориентации, путем вертикальной посадки.

Аналитическое описание участков траектории имеет вид:

1-й участок:  $x = x_0 = const, y = y_0 = const,$   
 $z_0 \leq z \leq z_1 \rightarrow P_0 \leq P(x, y, z) \leq P_1;$

2-й и 3-й участки:  $\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \rightarrow P_1 \leq P(x, y, z) \leq P_3;$

4-й участок:  $x = x_3 = const, y = y_3 = const \rightarrow P_3 \leq P(x, y, z) \leq P_4.$

Для удобства работы планирующих алгоритмов необходимо на базе матрицы  $S_T$ , описывающей узловые точки траектории движения, составить матрицы преобразования  $T_i$  для каждой из них. При этом следует из системы координат здания перейти в систему координат крана-манипулятора. Эти преобразования могут быть выполнены на основе следующих преобразований. Вектор положения матрицы  $T_0^{(i)}$  может быть получен на основе первых трех элементов  $i$ -го столбца матрицы  $S_T$  в виде:

$$P_0^{(i)} = \begin{bmatrix} x_0^{(i)} \\ y_0^{(i)} \\ z_0^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^{(3)} + x_0^{(3)} \rightarrow \text{var} \\ y_i^{(3)} + y_0^{(3)} \rightarrow \text{const} \\ z_i^{(3)} + z_0^{(3)} \rightarrow \text{const} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

где  $x_0^{(3)}, y_0^{(3)}, z_0^{(3)}$  — положение начала координат системы  $X_0Y_0Z_0$  в системе координат здания  $X_3Y_3Z_3$ .

Матрица направляющих косинусов

$$A_0^{(i)} = \begin{bmatrix} (\alpha_0^{(i)})_{11} & (\alpha_0^{(i)})_{12} & (\alpha_0^{(i)})_{13} \\ (\alpha_0^{(i)})_{21} & (\alpha_0^{(i)})_{22} & (\alpha_0^{(i)})_{23} \\ (\alpha_0^{(i)})_{31} & (\alpha_0^{(i)})_{32} & (\alpha_0^{(i)})_{33} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

характеризующая ориентацию рабочего органа в системе координат манипулятора  $X_0Y_0Z_0$  составляется на основе зависимостей ее элементов от углов Эйлера:

$$\begin{aligned}
 (\alpha_0^{(i)})_{11} &= \cos \varphi_0^{(i)} \cos \psi_0^{(i)} - \sin \varphi_0^{(i)} \cos \theta_0^{(i)} \sin \psi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{12} &= \sin \psi_0^{(i)} \cos \varphi_0^{(i)} + \cos \psi_0^{(i)} \cos \theta_0^{(i)} \sin \varphi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{13} &= \sin \theta_0^{(i)} \sin \varphi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{21} &= \cos \psi_0^{(i)} \sin \varphi_0^{(i)} - \sin \psi_0^{(i)} \cos \theta_0^{(i)} \cos \varphi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{22} &= -\sin \varphi_0^{(i)} \sin \psi_0^{(i)} + \cos \varphi_0^{(i)} \cos \theta_0^{(i)} \cos \psi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{23} &= \sin \theta_0^{(i)} \cos \varphi_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{31} &= \sin \psi_0^{(i)} \sin \theta_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{32} &= -\cos \psi_0^{(i)} \sin \theta_0^{(i)}, \\
 (\alpha_0^{(i)})_{33} &= \cos \theta_0^{(i)}.
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Указанные в системе уравнений (4.6) углы Эйлера  $\theta_0^{(i)}$ ,  $\varphi_0^{(i)}$ ,  $\psi_0^{(i)}$  соответствуют углам  $\theta_3^{(i)}$ ,  $\varphi_3^{(i)}$ ,  $\psi_3^{(i)}$  так как системы координат здания  $X_3Y_3Z_3$  и манипулятора  $X_0Y_0Z_0$  ортогональны и соосны. Параметры  $\theta_3^{(i)}$ ,  $\varphi_3^{(i)}$ ,  $\psi_3^{(i)}$  являются элементами матрицы  $S_T$  (4.1) для  $i$ -ой точки траектории это последние три элемента  $i$ -го столбца. Используя найденные векторы положения  $P_0^{(i)}$  и матрицы направляющих косинусов  $A_0^{(i)}$  составляются матрицы преобразования:

$$T_0^{(i)} = \begin{vmatrix} A_0^{(i)} & P_0^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{4.7}$$

После этих преобразований каждая узловая точка траектории получается представленной в системе координат робота  $X_0Y_0Z_0$  полученными матрицами  $T_0^{(i)}$ . Переход захватного устройства с деталью от  $T_0^{(i-1)}$  к  $T_0^{(i)}$  планируется как прямолинейное перемещение между точками  $P_{i-1}$  и  $P_i$ , если этому не препятствуют предметы окружающей среды.

На этом процесс построения траекторий движения монтажных роботов, в принципе, заканчивается. Описание переходных сглаживающих участков выполняется на стадии планирования движения манипулятора. Обратное возвращение захватного устройства за следующей деталью производится по той же траектории. Однако, скорости перемещения могут задаваться другие, с помощью матрицы  $V_T^{(es)}$ , которая аналогична (4.2). При этом алгоритмом планирования должна предусматриваться точка возврата  $P_0^{(e)}$ , в которой производится точная ориентация захватной траверсы 1 относительно детали 2, и только после этого выполняется опускание в точку  $P_0$  для захвата новой детали (рис. 4.4).

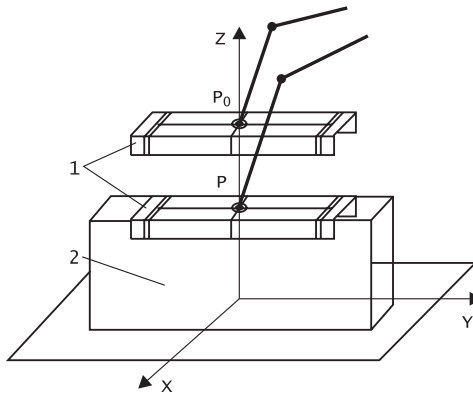


Рис. 4.4. Ориентация траверсы и захват конструкции

Роботизация монтажных работ становится эффективной только в случае организации циклического повторения операций по установке очередного сборного элемента. Для организации работы монтажного робота по циклично повторяющейся программе на стадии проектирования траекторий движения следует сформировать базу данных, включающую матрицы  $S_T$  для каждого цикла или определить закон изменения ее параметров по циклам. При монтаже крупнопанельных, жилых домов, взятие деталей обычно выполняется с одной или нескольких базовых платформ, жестко привязанных к системе координат здания (рис. 4.5).

Для каждого этажа имеется технологическая схема последовательности монтажа элементов, в соответствии с которой, определяются положения точек  $P_2$  и  $P_3$  при установке элементов и ориентация захватного устройства в этих точках. При этом положение первых двух точек может иметь всего несколько вариантов в

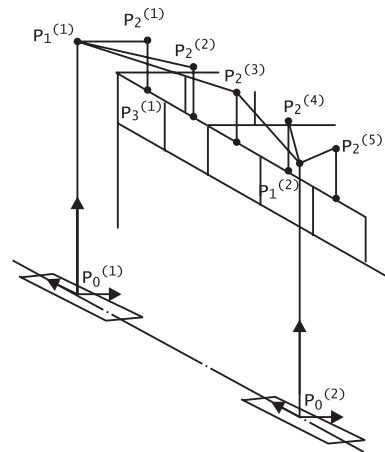


Рис. 4.5. Технологическая схема монтажа крупнопанельных зданий

зависимости от числа платформ (приспособлений), с которых берутся элементы:

$$S_{01}^{(k)} = \begin{bmatrix} x_0^{(i)} & x_1^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ y_0^{(k)} & y_1^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ z_0^{(k)} & z_1^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

где  $k$  — номер места взятия очередного элемента.

Перед выполнением очередного  $i$ -го цикла выбирается матрица  $S_0^{(k)}$ , соответствующая месту взятия очередного элемента и в соответствии с планом монтажа формируется матрица установки элемента:

$$S_{24}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & x_2^{(j)} & x_3^{(j)} & x_4^{(j)} \\ 0 & 0 & y_2^{(j)} & y_3^{(j)} & y_4^{(j)} \\ 0 & 0 & z_2^{(j)} & z_3^{(j)} & z_4^{(j)} \\ 0 & 0 & \theta_2^{(j)} & \theta_3^{(j)} & \theta_4^{(j)} \\ 0 & 0 & \varphi_2^{(j)} & \varphi_3^{(j)} & \varphi_4^{(j)} \\ 0 & 0 & \psi_2^{(j)} & \psi_3^{(j)} & \psi_4^{(j)} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Сложив сформированные матрицы  $S_{01}^{(k)}$  и  $S_{24}^{(j)}$  получаем матрицу  $S_T^{(j)} = S_{01}^{(k)} + S_{24}^{(j)}$ , описывающую координаты  $P_l$  ( $l = 0 \dots 4$ ) траектории движения очередного цикла. В заключении оценивается длина траекторий и время их отработки. При отсутствии препятствий на пути движения длина каждого участка траектории выбирается равной

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2},$$

а общая длина определяется путем суммирования отдельных участков:

$$L_{mp} = \sum_{i=1}^n l_i,$$

где  $n$  — число участков,  $i$  — номер участка. Так как для планирования технологического процесса необходимо на каждой стадии оценивать время выполнения операций, то на данном этапе про-

водится предварительная оценка времени прохождения траектории и установки монтируемого элемента в заданное положение:

$$t_u = \left( \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{V_i} \right) + t_{op}, \quad (4.10)$$

где  $t_{op}$  — время ориентирования элемента.

Роботизация отделочных работ в первую очередь предусматривает нанесение различного рода грунтовочных или окрасочных покрытий, набрызг растворов. При выполнении этого вида работ рекомендуются различные схемы движения рабочего инструмента (рис. 4.6). Расстояние рабочего инструмента до поверхности составляет 250—300 мм. Как видно из рис. 4.6, для плоских поверхностей траектории движения инструмента представляют собой параллельные, прямолинейные участки с равномерным шагом  $\Delta$ . Перед началом построения траекторий движения выбирается схема выполнения отделочных работ и устанавливаются габариты окрашиваемой поверхности. На основании этой информации определяются координаты начальной ( $P_n$ ) и конечной ( $P_k$ ) точек движения рабочего инструмента при окрашивании поверхности (рис. 4.6). Учитывая, что траектории движения параллельны и лежат в плоскости  $X_0Z_0$  базовой системы координат робота, то в этом случае граничные точки участков траектории движения могут быть описаны системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} P_n^{(i)} &= \left[ \left( (-1)^i \cdot \left( \frac{d - \Delta}{2} \right), (\varphi - \delta), \left( \frac{h - \Delta}{m} \cdot (m + i) \right) \right) \right], \\ P_k^{(i)} &= \left[ \left( (-1)^{i+1} \cdot \left( \frac{d - \Delta}{2} \right), (\varphi - \delta), \left( \frac{h - \Delta}{m} \cdot (m + i) \right) \right) \right], \end{aligned} \quad (4.11)$$

где  $d, h$  — размеры окрашиваемой поверхности;  $\varphi$  — расстояние до поверхности в базовой системе координат робота;  $\delta$  — расстояние до поверхности рабочего инструмента;  $\Delta$  — шаг участков или эффективная ширина окрашиваемой полосы;  $m$  — число параллельных участков траектории движения;  $i$  — номер очередного участка траектории (рис. 4.7).

Для полного описания траекторий движения в данном примере следует сформулировать условия перехода одного участка траектории ( $P_n^{(i)}, P_k^{(i)}$ ) на следующий участок ( $P_n^{(i+1)}, P_k^{(i+1)}$ ), т. е. описать переходные участки ( $P_k^{(i)}, P_n^{(i+1)}$ ) (рис. 4.7). Обычно для этого используют прямолинейные участки.

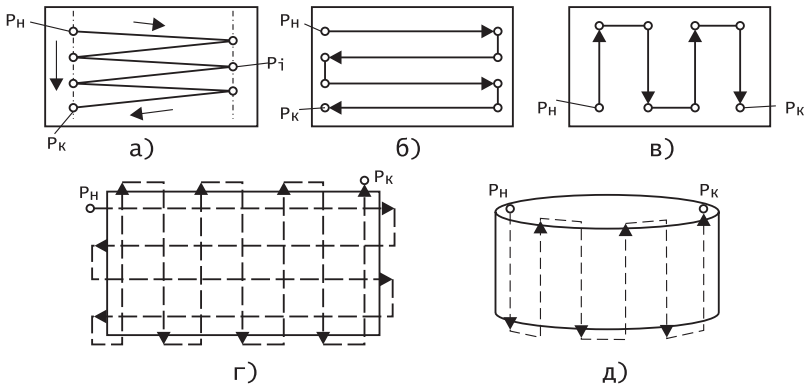


Рис. 4.6. Технологические схемы нанесения окрасочных покрытий  
 а) — зигзагообразная; б) — поперечно-торцевая;  
 в) — продольно-торцевая; г) — перекрестное окрашивание;  
 д) — цилиндрические поверхности

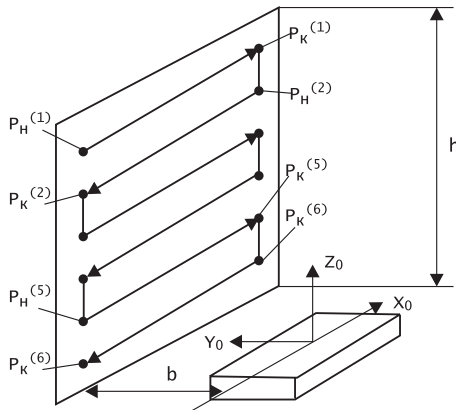


Рис. 4.7. Построение траекторий движения отделочного робота

Установка робота и его исходная ориентация относительно рабочей поверхности требуют значительных затрат времени. Их можно значительно сократить, если проводить грубую ориентацию и далее программно определять углы коррекции рабочей плоскости относительно базовой системы координат робота. Для этого в режиме обучения выполняется контроль положения двух горизонтально противоположных точек  $P_n$  и  $P_i$  или четырех точек

в углах поверхности  $P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}, P_{n4}$  и на их основе определяется угол разворота плоскости относительно оси  $Z$ :

в случае 2-х точек: 
$$\gamma = \arctg \frac{y_n - y_a}{|x_n| + |x_a|};$$

в случае 4-х точек: 
$$\gamma = \arctg \frac{(y_1 + y_3) - (y_2 + y_4)}{|x_1 + x_3| + |x_2 + x_4|}.$$

Угол  $\gamma$  служит для корректировки положения базовой системы координат робота на этапе планирования движений манипулятора. В случае продольно-торцовой окраски движение инструмента выполняется по параллельным вертикальным линиям. Описание прямолинейных участков траектории отличается от предыдущего случая (4.11) описанием граничных точек траектории:

$$\begin{aligned} P_n^{(i)} &= \left[ \frac{d - \Delta}{2m} \cdot (2 \cdot (i - 1) - m), \vartheta - \delta, h - \Delta/2 \right], \\ P_k^{(i)} &= \left[ \frac{d - \Delta}{2m} \cdot (2 \cdot (i - 1) - m), \vartheta - \delta, \Delta/2 \right]. \end{aligned} \quad (4.12)$$

При выполнении отделочных работ кроме плоских поверхностей встречаются цилиндрические, дугообразные и рельефные поверхности. Их общим свойством является использование линейной образующей, которая в большинстве случаев параллельна оси  $Z_0$  базовой системы координат (рис. 4.8). Окрашивание цилиндрических элементов (колонн и др.) обычно выполняется вертикальными полосами, граничные координаты которых  $P_n^{(i)}, P_k^{(i)}$  задаются в режиме обучения для одной из полос или определяются по формулам:

$$P_n = \left[ x_0, y_0, \frac{h - \Delta/2}{m} \right], P_k = [x_0, y_0, \Delta/2]. \quad (4.13)$$

Изменение этих координат подчиняется закону:

$$y = y_0 - \sqrt{R_n^2 - (x - x_0)^2},$$

где  $R_n$  — радиус окрашиваемой поверхности. При этом угол поворота краскопульта относительно оси  $Z_0$  системы координат манипулятора выбирается равным:  $\theta_z = \arctg((x - x_0)/(y - y_0))$ .

При выполнении отделочных работ на рельефных поверхностях следует также как и для плоских поверхностей произвести разде-

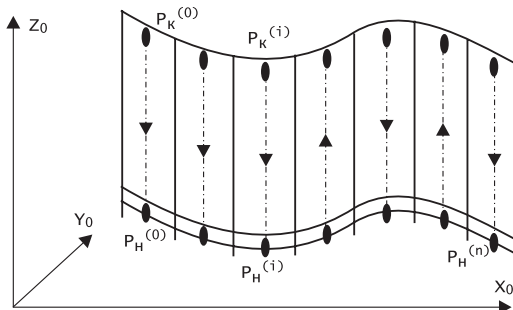


Рис. 4.8. Построение движений при окрашивании дугообразных и рельефных поверхностей

ление на горизонтальные или вертикальные участки в зависимости от заданной технологии нанесения отделочных материалов. В обоих случаях построение траекторий движения должно предусматривать сканирование профиля поверхности. В случае, если образующая линия поверхности прямолинейна и вертикальна, то достаточно сканирование выполнить один раз, обычно посередине поверхности. В противном случае число зон сканирования значительно больше и выбирается в зависимости от формы поверхности и ее кривизны. В результате сканирования формируется массив точек  $P_{ск}^{(i)} = [x_i, y_i, z_i]$ , который характеризует профиль рабочей поверхности в плоскости параллельной плоскости  $X_0Y_0$ . На основании этого массива данных выполняется аппроксимация снятого профиля. Для этого лучше использовать глобальную полиномиальную интерполяцию с использованием многочлена Лагранжа:

$$L(x) = y_0 \cdot l_0(x) + y_1 \cdot l_1(x) + \dots + y_n \cdot l_n(x), \quad (4.14)$$

при этом многочлены  $l_i(x)$  вычисляются по формулам:

$$l_i(x) = \frac{\prod_{k=0}^{i-1} (x - x_k) \cdot \prod_{j=i+1}^n (x - x_j)}{\prod_{k=0}^{i-1} (x_i - x_k) \cdot \prod_{k=i+1}^n (x_i - x_k)}. \quad (4.15)$$

Интерполяционный многочлен Лагранжа проходит через все заданные точки, полученные в результате сканирования поверхности. Общее число точек  $n$  выбирается в пределах 5—7 в зависимости от профиля поверхности. В соответствии с полученным интерполяционным многочленом на каждом цикле определяются гра-



нические точки  $P_n^{(i)}$  и  $P_k^{(i)}$  окрашиваемого вертикального участка. При перекрестном окрашивании вначале выполняется поперечно-торцовая схема движения и для ее реализации интерполяционный многочлен  $L(x)$  рассматривается как уравнение эквидистантных траекторий движения, расстояние между которыми соответствует ширине полосы  $\Delta$ . При этом дополнительно следует определить ориентацию инструмента относительно поверхности в точке траектории его движения. Основным требованием является расположение оси инструмента по нормали к поверхности. При этом ось  $Z_n$  инструмента поддерживается параллельно базовой оси  $Z_0$ , а ось  $Y_n$  системы координат  $X_n Y_n Z_n$  устанавливается перпендикулярно касательной к траектории  $L(x)$  в любой точке.

Построение каркаса траектории движения бетоноукладочных роботов рассмотрим на примерах возведения монолитных зданий и сооружений с помощью скользящих, переставных и объемных опалубок. Анализ строительства монолитных труб, силосов, ядер жесткости зданий и жилых домов показал, что укладка очередного слоя бетона производится в горизонтальной плоскости. Поэтому задача построения траекторий движения сопла роботизируемой бетоноукладочной стрелы, сводится к описанию последовательности движений в плоскости  $X_n Y_n$  параллельной плоскости  $X_0 Y_0$  системы координат робота. Координата  $z_n$  в пределах одного цикла укладки не меняется, а затем увеличивается на величину  $\Delta h$ , соответствующую шагу подъема опалубки. На рис. 4.9. приведены примеры наиболее часто возводимых монолитных объектов. Как видно из рисунков траектории движения представляют собой либо набор прямоугольников, либо окружностей. При возведении каркаса жилого дома (рис. 4.9, а) необходимо на основании плана здания сформулировать массив координат точек  $P_1, P_2, \dots, P_{10}$  и определить последовательность обхода прямолинейных участков  $P_i \rightarrow P_j$ . Каждый участок может быть описан уравнениями вида:

$$\begin{aligned} &\text{для участков параллельных оси } X_0 \rightarrow P_{j_n}(x_{j_n}, y_{j_n}), P_{j_k}(x_{j_k}, y_{j_k}) \\ &y = y_{j_n} \vee y_{j_k} \rightarrow x_{j_n} \leq x \leq x_{j_k}; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} &\text{для участков параллельных оси } Y_0 \rightarrow P_{i_n}(x_{i_n}, y_{i_n}), P_{i_k}(x_{i_k}, y_{i_k}) \\ &x = x_{i_n} \vee x_{i_k} \rightarrow y_{i_n} \leq y \leq y_{i_k}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

При возведении дымовых труб робот-бетоноукладчик размещается на грузовой шахте в центре сооружения. Поэтому его траек-

тория движения представляет собой окружность радиуса  $R_{он}$ , лежащую в горизонтальной плоскости  $X_M Y_M$ :

$$(x - \Delta x_{см})^2 + (y - \Delta y_{см})^2 = R_{он}^2,$$

где  $\Delta x_{см}$ ,  $\Delta y_{см}$  — отклонение опалубка от проектной оси возводимого сооружения. Эти параметры автоматически контролируются лазерными системами контроля и вносятся в систему управления робота. В случае наклона опалубка (вынужденного или корректирующего) следует учитывать смещения высоты точек, которая может составлять 100—300 мм. Получаемая при этом эллипсность проекции опалубка на горизонтальную плоскость незначительна и не превышает 30 мм, что практически не влияет на качество укладки бетонной смеси. Учет смещений высоты точек укладки бетона при наклоне опалубка выполняется на основе следующих соотношений:

$$\Delta z_{max} = R \sin \alpha; \Delta z = \Delta z_{max} \cos(\varphi - \alpha) \rightarrow 0 \leq \varphi \leq 2\pi; z = z_p - \Delta z,$$

где  $\alpha$  — угол наклона опалубка;  $R$  — радиус опалубка;  $\varphi$  — угол соответствующий текущей точки укладки бетона. Аналогичным образом могут быть решены задачи построения траекторий для силов, фундаментных площадок и др. объектов.

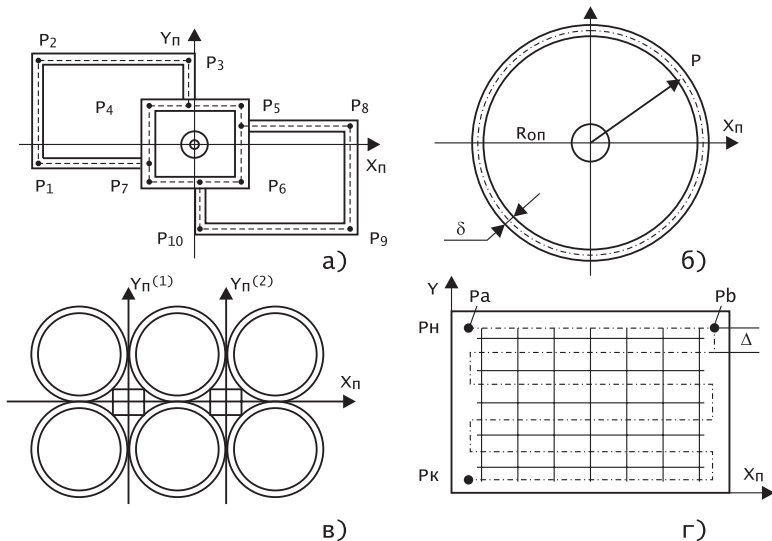


Рис. 4.9. Планы монолитных объектов и траекторий укладки бетона

В строительной индустрии при роботизации технологических процессов, таких как зачистка и смазка форм, отделка стеновых панелей, установка деталей (дверных и оконных блоков и др.), так же решаются задачи построения траектории движения рабочего инструмента или монтируемых деталей. Планируемые траектории в основном представляют прямолинейные участки, расположенные в горизонтальной или вертикальной плоскостях, жестко привязанных к системе координат робота. Особенностью построения программных траекторий является то, что в условиях стационарного производства описание всех граничных и узловых точек целесообразно выполнять в режиме обучения. Что касается аналитического описания, то оно ни чем не отличается от рассмотренных. Формируются граничные точки каждого участка траектории  $P_n^{(i)}$ ,  $P_k^{(i)}$ , а также ширина рабочей полосы. Кроме того, описывается ориентация инструмента при выполнении рабочей операции. Построение траектории установки оконных и дверных блоков зависит от принятой технологии и включает перемещение схвата за деталью, взятие детали, транспортирование ее в зону установки, ориентация и установка детали в изделие. Участки траектории каждой операции определяются командными движениями схвата. Для каждой операции на рассматриваемом этапе определяются опорные (базовые) точки и условия ориентации.

### 4.3. Планирование движений манипулятора на основе аппроксимации сплайнами

Планирование движений большинства строительных роботов выполняется в обобщенных координатах. Это означает, что для каждого участка траектория движения схвата или инструмента необходимо получить временной закон изменения каждой обобщенной координаты манипулятора, обеспечивающий требуемое движение, т. е. необходимо сформулировать для каждого участка вектор  $q(t) = [q_{1i}(t), q_{2i}(t), \dots, q_{ni}(t)]$ , где  $i$  — номер участка траектории,  $n$  — число степеней подвижности манипулятора.

Решение задач планирования движений рабочего органа для строительных роботов выполняется в следующей последовательности. В общем случае вначале выполнения задачи планирования движения робота необходимо сформулировать законы изменения

во времени положения и ориентации рабочего органа и скорости его перемещения:

$$\begin{cases} tr_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)], \\ v_i(t) = [v_{xi}(t), v_{yi}(t), v_{zi}(t)], \\ \psi_i(t) = [\theta_i(t), \varphi_i(t), \beta_i(t)], \\ \omega_i(t) = [\omega_{\theta_i}(t), \omega_{\varphi_i}(t), \omega_{\psi_i}(t)], \end{cases} \quad (4.18)$$

где  $tr_i(t)$ ,  $v_i(t)$  — вектора положения и скорости в текущий момент времени  $t$  при движении на  $i$ -ом участке траектории;  $\psi_i(t)$ ,  $\omega_i(t)$  — вектора ориентации и угловой скорости на  $i$ -ом участке в момент времени  $t$ .

Приведенные уравнения могут непосредственно быть использованы для получения временных законов изменения обобщенных координат. Однако, в большинстве случаев эта задача неразрешима в явном виде. Другим важным использованием уравнений (4.18) является контроль правильности отработки спланированных движений степенями подвижности. Анализ траекторий движения, проведенный в предыдущем разделе показал, что многие участки траекторий прямолинейны. В общем случае любой прямолинейный участок траектории перемещения схвата при равномерном движении со скоростью  $v_i = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]$  может быть описан вектором:

$$tr(t) = \begin{bmatrix} x_n + v_{xi}t \\ y_n + v_{yi}t \\ z_n + v_{zi}t \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} x_{ni} \leq x_i \leq x_{ki} \\ y_{ni} \leq y_i \leq y_{ki} \\ z_{ni} \leq z_i \leq z_{ki} \end{cases}, \quad (4.19)$$

где  $x_{ni}$ ,  $y_{ni}$ ,  $z_{ni}$  — координаты начальной точки траектории;

$x_{ki}$ ,  $y_{ki}$ ,  $z_{ki}$  — координаты конечной точки траектории.

В монтажных и отделочных роботах часто встречаются прямолинейные участки траектории, расположенные горизонтально или вертикально. При вертикальном перемещении захватного устройства или окрасочного инструмента движение описывается уравнениями:

$$tr_o(t) = [x_n, y_n, z_n + vt], \quad v_o(t) = [0, 0, v_z]. \quad (4.20)$$

Аналогично можно записать горизонтальное перемещение детали или инструмента с помощью вектора:

$$tr_z(t) = [(x_n + v_x t), (y_n + v_y t), z_n]. \quad (4.21)$$

При этом составляющие вектора скорости равны:

$$v_z(t) = \left[ v \frac{x_k - x_n}{l_{mp}}, v \frac{y_k - y_n}{l_{mp}}, 0 \right], \quad (4.22)$$

где  $l_{тр}$  — длина участка траектории.

Если планирование движений выполняется по прямолинейным траекториям вдоль плоских вертикальных поверхностей, расположенных параллельно плоскости  $X_0Z_0$  базовой системы координат, то участки параллельных полос можно описать уравнениями:

$$tr_1(t) = \begin{bmatrix} x_n + (1 - \xi) \cdot k \cdot \Delta + \xi \cdot v \cdot t \\ y_n \\ z_n + \xi \cdot k \cdot \Delta + (1 - \xi) \cdot v \cdot t \end{bmatrix}, \quad (4.23)$$

где  $x_n, y_n, z_n$  — координаты начальной точки,  $\Delta$  — шаг эквидистантных траекторий,  $k$  — номер шага,  $\xi$  — параметр расположения траектории ( $\xi = 1$  — для горизонтальных,  $\xi = 0$  — для вертикальных полос).

При планировании движений отделочных, бетоноукладочных и землеройных роботов наряду с прямолинейными траекториями достаточно часто встречаются участки в виде дуг окружности. Для круговых участков траектории наибольший интерес представляют случаи, когда дуги окружности лежат в горизонтальной или вертикальной плоскостях. Характерной особенностью строительных роботов является то, что рабочие плоскости обычно параллельны плоскостям  $X_0Y_0$  ( $P_{xy}$ ),  $Z_0Y_0$  ( $P_{zy}$ ) или  $Z_0X_0$  ( $P_{zx}$ ) системы координат робота (рис. 4.10). Рассмотрим основные соотношения для описания движений. При работе роботов в плоскости параллельной плоскости  $Z_0X_0$  движение по дуге окружности описывается системой уравнений вида:

вариант 1

$$\begin{cases} x = x_r + R \sin \omega t \\ y = y_r = \text{const} \\ z = z_r + R \cos \omega t \end{cases} ; \begin{cases} v_x = \omega R \cos \omega t = v \cos \omega t \\ v_y = 0 \\ v_z = -\omega R \sin \omega t = v \sin \omega t \end{cases} \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi; \quad (4.24)$$

вариант 2

$$\begin{cases} x = x_r + R \cos(\pi - \omega t) \\ y = y_r = \text{const} \\ z = z_r + R \sin \omega t \end{cases} ; \begin{cases} v_x = v \sin \omega t \\ v_y = 0 \\ v_z = v \cos \omega t \end{cases} \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi, \quad (4.25)$$

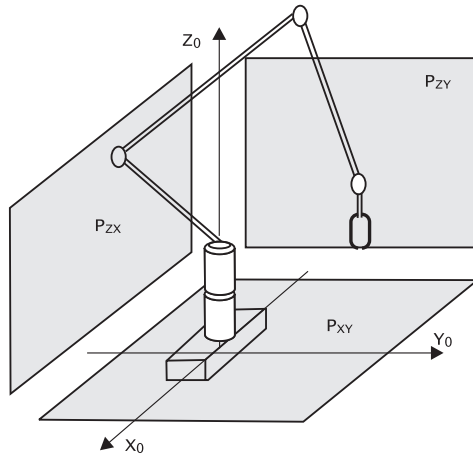


Рис. 4.10. Расположение рабочих поверхностей в системе координат строительного робота

где  $R$  — радиус участка траектории;  $\omega$  — угловая скорость движения  $x_r, y_r, z_r$ , — координаты центра окружности.

Если движение выполняется в плоскости  $X_0Y_0$ , то оно описывается системой уравнений вида

вариант 1

$$\begin{cases} x = x_r + R \sin \omega t \\ y = y_r + R \cos \omega t \\ z = z_r \end{cases} \quad \begin{cases} v_x = \omega R \cos \omega t \\ v_y = \omega R \sin \omega t \\ v_z = 0 \end{cases} \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (4.26)$$

вариант 2

$$\begin{cases} x = x_r + R \cos(\pi - \omega t) \\ y = y_r + R \sin \omega t \\ z = z_r \end{cases} \quad ; \quad \begin{cases} v_x = \omega R \sin \omega t = v \sin \omega t \\ v_y = \omega R \cos \omega t = v \cos \omega t \\ v_z = 0 \end{cases} \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (4.27)$$

Аналогичным образом могут быть описаны траектории бетоноукладочных роботов.

Во многих случаях при планировании движения манипулятора после описания траектории движения в виде (4.19) определяется длина траектории или пути движения. В случае прямолинейных участков используются координаты граничных точек  $P_n^{(i)}, P_k^{(i)}$ :

$$l_{mp}^{(i)} = \sqrt{(x_{\kappa}^{(i)} - x_n^{(i)})^2 + (y_{\kappa}^{(i)} - y_n^{(i)})^2 + (z_{\kappa}^{(i)} - z_n^{(i)})^2}, \quad (4.28)$$

где  $i$  — номер участка. Для дуг окружности, лежащих в плоскостях  $X_0Y_0$  или  $X_0Z_0$ , на основании координат граничных точек  $P_n^{(i)}$  и  $P_{\kappa}^{(i)}$  радиуса дуги  $R$  выполняется расчет длины траектории  $l_{mp}$  в соответствии с уравнениями:

$$l_{mp}^{(j)} = \int_{x_n}^{x_{\kappa}} \sqrt{1 + \dot{y}(x)} dx \rightarrow \text{плоскость } X_0Y_0 \quad (4.29)$$

$$l_{mp}^{(j)} = \int_{x_n}^{x_{\kappa}} \sqrt{1 + \dot{z}(z)} dx \rightarrow \text{плоскость } X_0Y_0$$

В общем случае, когда участок траектории криволинейный и описывается уравнением плоской кривой  $f(x, y)$ , то длина траектории вычисляется в виде интеграла:

$$l_{mp} = \int_{x_n}^{x_{\kappa}} \sqrt{1 + df(x)/dx}, \quad (4.30)$$

где  $df(x)/dx$  — непрерывная производная функции на участке  $x_n \leq x \leq x_{\kappa}$ .

Для пространственной кривой, заданной в параметрической форме

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \rightarrow t_n \leq t \leq t_{\kappa},$$

длина траектории выражается формулой:

$$l_{mp} = \int_{t_n}^{t_{\kappa}} [(\dot{x}(t))^2 + (\dot{y}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2]^{1/2}. \quad (4.31)$$

Общая длина траектории состоящей из  $n$  участков определяется как сумма длин этих участков:

$$L_{mp} = \sum_{k=1}^n l_k. \quad (4.32)$$

Зная длину каждого участка траектории, и технологическую скорость их отработки, предварительно оценивается время прохождения каждого участка и всей траектории в целом:

$$T_{mp} = \sum_{k=1}^n t_k = \sum_{k=1}^n l_k / v_k. \quad (4.33)$$

Спланировав операции на уровне схвата или инструмента, необходимо построить программу изменения обобщенных координат манипулятора и одновременно проверить практическую осуществимость планируемых движений на каждом участке траектории. При планировании в декартовых координатах на основании зависимостей  $tr(t)$ ,  $v(t)$  определяются значения обобщенных координат  $q_i(nT)$  в дискретные моменты времени, а также скоростей  $\dot{q}_i(nT)$ , которые используются для формирования управляющих воздействий на следующем шаге управления. Однако, такой подход требует на каждом шаге управления решения обратных задач кинематики и значительных затрат машинного времени, что не всегда позволяет реализовать режим реального времени функционирования системы управления. В связи с этим при управлении строительными роботами рекомендуется планирование движений выполнять в обобщенных координатах. В этом случае для каждой граничной и узловых точек траектории на основе решения обратной задачи о положении определяются обобщенные координаты, характеризующие конфигурацию механизма в этих точках. По каждой координате проверяются ограничения и реализуемость движений системой управления исполнительного уровня. Планирование движений в этом случае заканчивается построением функций  $q_i(t) \rightarrow i = 0, 1, 2, \dots, n$  с необходимым условием  $q_i(t_j) = q_i^{(j)} (= 0, 1, \dots, m)$ . В этом случае планирование ведется в реальном времени и непосредственно формируются управляемые переменные.

Планируемая траектория  $q_i(t) \rightarrow t_n \leq t \leq t_k$  формирует непрерывный путь движения рабочего органа манипулятора. Обязательными требованиями к движению робота является непрерывность и плавность перемещения инструмента. Это относится ко многим технологическим операциям: окраска, сварка, резка материала, укладка бетона и др. При роботизации этих операций следует тщательно планировать не только перемещение инструмента, но и его скорость и ускорение движения. При выполнении таких операций как сварка арматурных каркасов, раскрой материалов, подача заготовок и арматуры достаточно выполнять движения, обеспечивающие перемещения в заданную точку с требуемой точностью и нужной ориентацией. В этих случаях обычно минимизируется время перехода схвата или рабочего инструмента из одной точки в другую. Формирование функций  $q_i(t)$  во многом определяется типом выполняемой операции, видом траектории, исходными данными.



Вначале рассмотрим отдельные случаи формирования законов изменения обобщенных координат  $q_i(t)$  для монтажных, отделочных, бетоноукладочных работ, когда можно получить аналитические выражения непосредственно на основе уравнений (4.18).

Планирование движений монтажного робота может быть выполнено достаточно просто путем геометрического решения обратной задачи кинематики. Это связано с тем, что участки траектории транспортирования и установки элементов представляют прямолинейные участки, расположенные вертикально или в горизонтальной плоскости.

Вертикальный подъем детали выполняется манипуляционной системой без изменения ориентации транспортируемого элемента. Для кинематической структуры приведенной на рис. 4.11, вертикальный подъем элемента обеспечивается степенями подвижности  $q_2, q_3, q_4$ . Остальные степени подвижности сохраняют свои координаты неизменными. Перемещение детали на высоту  $h$  из исходного состояния  $M_0$  в точку  $M_1$  описывается системой уравнений вида:

$$\begin{cases} q_1(t) = q_1(M_0) = \text{const}, \\ q_2(t) = \text{arctg}[q_2(M_0) + v_\sigma t / R], \\ q_3(t) = [q_3^2(M_0) + 2l_n v_\sigma t + v_\sigma^2 t^2]^{1/2}, \\ q_4(t) = \pi/2 + q_2(t), \\ q_5(t) = q_5(M_0) = \text{const}, \\ q_6(t) = q_6(M_0) = \text{const}. \end{cases}, \quad (4.34)$$

где  $l_n = \sqrt{q_3^2(M_0) - R^2}$  — высота подвеса груза;  $R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ .

Перемещение детали из точки  $M_1(x_1, y_1, z_1)$  в точку позиционирования  $M_2(x_2, y_2, z_2)$  по горизонтальной траектории обеспечивается степенями подвижности  $q_1, q_2, q_3, q_4$ :

$$\begin{cases} q_1(t) = \text{arctg}[(y_1 + v_{y_1} t) / (x_1 + v_{x_1} t)], \\ q_2(t) = \text{arctg}[Rt \text{tg}(q_2(M_1)) / (R + v_\sigma t)], \\ q_3(t) = [(R + v_\sigma \cos(q_2(t) + \alpha_{mp})t)^2 + l_n^2]^{1/2}, \\ q_4(t) = q_2(t) - \pi/2, \\ q_5(t) = q_2(t) + \beta_n^{(z)}, \\ q_6(t) = q_6(M_1) = \text{const}. \end{cases}, \quad (4.35)$$

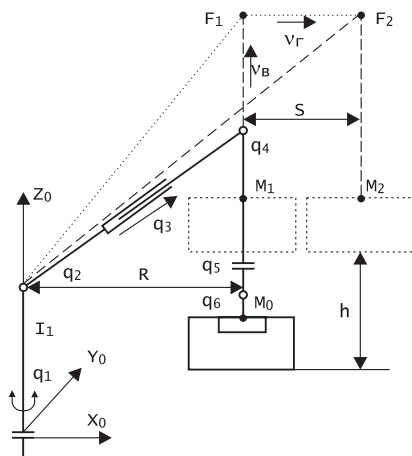


Рис. 4.11. Технологическая схема транспортирования панели монтажным роботом

где  $x_1, y_1$  — координаты  $M_1$ ;  $\alpha_{mp} = \arctg[(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)]$ ;  $v_{zx} = v \cos \alpha_{mp}$ ;  $v_{zy} = v \sin \alpha_{mp}$ ;  $l_n = \sqrt{q_3^2(M_1) - R^2}$ ;  $\beta_n^{(z)}$  — заданный угол ориентации панели.

Аналогичным образом выполняется планирование движений отделочных и других роботов, выполняющих перемещение рабочего инструмента вдоль горизонтальных или вертикальных прямолинейных траекторий. Однако, как показывает анализ, траектории движения рабочих органов строительных роботов во многих случаях описываются набором точек, для которых определяются вектора обобщенных координат. В этом случае ставится задача формирования законов изменения обобщенных координат  $q_i(t)$  по заданной последовательности векторов обобщенных координат, обеспечивающих движение инструмента по заданной траектории. При этом в качестве исходных данных используются значения обобщенных координат в каждой узловой точке траектории, а также требование непрерывности функций  $q_i(t)$  и ее производных. При формировании законов  $q(t)$  должно обеспечиваться скоординированное движение всех степеней подвижности. Для этого определяется интервал времени  $T$ , необходимый для отработки траектории, и далее выполняется его разбиение на требуемое число участков. Процедура формирования закона изменения во времени обобщенных координат  $q(t)$  обычно решается на основе использования аппроксимирующих многочленов.

## 4.4. Аппроксимирование планируемых траекторий движения

При планировании траекторий движения строительных роботов, исходя из рассмотренных команд управления, встречается ряд случаев, требующих использования методов аппроксимации для формирования вектора обобщенных координат  $q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ . Первый из них связан с перемещением рабочего органа из исходного неподвижного состояния, в котором  $\dot{q}_n = \ddot{q}_n = 0$ , в заданное конечное состояние, где  $\dot{q}_n = \ddot{q}_n = 0$ . Задача заключается в формировании закона  $q(t)$  по заданным векторам обобщенных координат в граничных точках траектории и нулевым значениям скоростей и ускорений обобщенных координат в этих точках. При ее решении обязательно должны учитываться предельные условия, накладываемые на производные обобщенных координат

$$q_i^{(k)}(t) \leq (q_i^{(k)})_{\text{дон}} \quad (k = 1, 2 \dots m). \quad (4.36)$$

Предельные значения  $(q_i^{(k)})_{\text{дон}}$  определяются максимальными усилиями и моментами, развиваемыми приводами робота. Учитывая, что в данном случае имеется шесть краевых условий, то для каждой обобщенной координаты можно получить функцию  $q_j(t)$  в виде полинома 5-го порядка:

$$q_j(t) = \sum_{k=0}^5 a_{jk} t^k \rightarrow j = 1, 2, \dots, n. \quad (4.37)$$

Коэффициенты интерполяционного многочлена  $a_{jk}$  определяются в соответствии с граничными условиями из выражений:

$$\begin{aligned} a_{j0} = q_{jn}; \quad a_{j1} = a_{j2} = 0; \quad a_{j3} = \frac{10(q_{jk} - q_{jn})}{T^3} \\ a_{j4} = \frac{15(q_{jk} - q_{jn})}{T^4}; \quad a_{j5} = \frac{6(q_{jk} - q_{jn})}{T^5}. \end{aligned} \quad (4.38)$$

С учетом приведенных коэффициентов закон изменения  $j$ -й обобщенной координаты, обеспечивающий перемещение схвата в заданную точку рабочего пространства, запишется в виде:

$$q_j(t) = g_{jn} + \Delta g_j \tau^3 (10 + 15\tau + 6\tau^2), \quad (4.39)$$

где  $\tau = t/T$  — относительное время движения,  $\Delta g_j = q_{jk} - q_{jn}$  — перемещение  $j$ -й обобщенной координаты.

Продолжительность интервала времени  $T$  выбирается из условия, чтобы для каждой обобщенной координаты максимальные значения скоростей и ускорений не превышали предельно допустимых значений:

$$|\dot{q}_j|_{\max_{j=1,n}} \leq |\dot{q}_j|_{\text{дон}}; |\ddot{q}_j|_{\max_{j=1,n}} = |\ddot{q}_j|_{\text{дон}}.$$

Для обеспечения этого условия интервал времени движения  $T$  должен соответствовать условию:

$$T = \max_j \left[ \max_{j=1,n} (1,878 \frac{|q_{jk} - q_{jn}|}{|\dot{q}_j|_{\text{дон}}}), \max_{j=1,n} (5,7735 \frac{\sqrt{|q_{jk} - q_{jn}|}}{|\dot{q}_j|_{\text{дон}}}) \right]. \quad (4.40)$$

Закон изменения обобщенных координат (4.39) обеспечивает движение рабочего органа по прямолинейной траектории. Таким образом, данный алгоритм можно с успехом использовать для реализации прямолинейных движений строительных роботов. На рис. 4.12 приведен характер изменения обобщенных координат при использовании аппроксимирующего полинома 5-го порядка. Анализ отработки прямолинейных движений строительными роботами показал эффективность использования аппроксимирующих полиномов 5-го порядка для реализации командных движений в заданную точку.

Построение законов изменения обобщенных координат  $q(t)$  на основе полиномов 3-й степени используется для строительных роботов, когда известны вектора обобщенных координат в начальной  $q_n$ , конечной  $q_k$  и в промежуточных узловых точках  $q_k (k = 1, 2, \dots, m - 1)$ . Этот случай встречается при выполнении команд, связанных с движением рабочего органа по заданной тра-

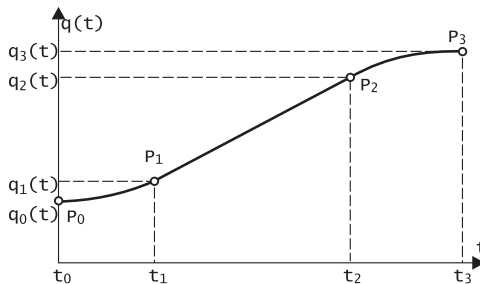


Рис. 4.12. Изменение обобщенных координат при движении робота в заданную точку

ектории, которая определяется набором точек. Количество промежуточных точек определяется характером траектории и требуемой точностью ее отработки. Формирование законов движения обобщенных координат  $q_j(t) \rightarrow (j = 1, 2, \dots, n)$  основывается на следующих требованиях. Аппроксимирующие полиномы должны обеспечивать прохождение через последовательность векторов обобщенных координат, соответствующих каждой узловой точке планируемой траектории. Кроме того, для каждой обобщенной координаты должна выполняться непрерывность самой функции, и ее первой и второй производных. Выполнение этих условий обеспечивает непрерывность скоростей и ускорений и гладкость реализуемой траектории.

На основании исходной информации и требований для каждой обобщенной координаты строится набор сплайн-функций:

$$P_j(t) = a_{j0} + a_{j1}t + a_{j2}t^2 + a_{j3}t^3. \quad (4.41)$$

Решение этой задачи следует выполнять на основе глобальной интерполяции. При этом возможны два варианта: при нулевых скоростях в начальной и конечной точках траектории движения; при заданных (ненулевых) значениях начальной и конечной скоростей движения. Наибольший интерес для управления строительными роботами представляет 1-ый способ построения сплайнов. Исходными данными в этом случае являются: траектория движения, задаваемая набором узловых точек; значения скорости в начале и конце траектории; значение рабочей скорости движения вдоль траектории. Кроме того, для каждой узловой точки траектории задается вектор ориентации рабочего органа, а также ограничения по траектории, по кинематике и динамике манипулятора. В качестве ограничений рассматриваются предельные положения и допустимые значения скоростей и ускорений по степеням подвижности. Цель планирования формирования законов изменения  $q_i(t)$ ;  $\dot{q}_i(t)$ ;  $\ddot{q}_i(t)$ . Преимуществами этого метода планирования является его выполнение в реальном времени, а также непосредственное формирование управляемых переменных в виде:

$$q_{ji}(t) = a_{ji0} + a_{ji1}(t - t_{i-1}) + a_{ji2}(t - t_{i-1})^2 + a_{ji3}(t - t_{i-1})^3, \quad t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad (4.42)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$  — номер сплайна;  $j = 1, 2, \dots, n$  — номер степени подвижности обобщенной координаты.

Определение параметров сплайнов основывается на использовании условий приближения функций, непрерывности сплайнов и

непрерывности скоростей и ускорений. Для одной степени подвижности система уравнений, позволяющая определить коэффициенты сплайнов, имеет вид:

$$\begin{cases} P_i(t_i) = P_{i+1}(t_i) \rightarrow i = 1, 2, \dots, m - 1 \\ \dot{P}_i(t_i) = \dot{P}_{i+1}(t_i) \rightarrow i = 1, 2, \dots, m - 1 \\ \ddot{P}_i(t_i) = \ddot{P}_{i+1}(t_i) \rightarrow i = 1, 2, \dots, m - 1 \\ P_i(t_i) = q_i, P_1(t_0) = q_0 \end{cases} \quad (4.43)$$

Данная система уравнений дополняется начальными условиями:

$$\dot{P}_1(t_0) = 0; \dot{P}_m(t_m) = 0. \quad (4.44)$$

Учитывая кусочно-линейный закон изменения ускорений, при интерполяции законов изменения обобщенных координат кубическими сплайнами, и их непрерывность, удобно выражать уравнения сплайн-функций через ускорения в узловых точках  $M_j$  [37]. Исходя из линейного закона изменения ускорений между узловыми точками, можно записать:

$$\ddot{P}_i(t) = M_{i-1} \frac{t_i - t}{\tau} + M_i \frac{t - t_{i-1}}{\tau} \rightarrow t_{i-1} \leq t \leq t_i, \quad (4.45)$$

где  $M_{i-1}$ ,  $M_i$  — ускорения в  $i-1$  и  $i$ -й узловых точках;  $\tau = t_i - t_{i-1}$  — время интерполяции на  $i$ -ом участке. В этом случае выражение для кубических сплайнов с учетом условий приближения и непрерывности (4.43) и дополнительных условий (4.44) может быть получено в виде:

$$\begin{aligned} P_i(t) = & \frac{M_{i-1}}{6\tau} (t_i - t)^3 + \frac{M_i}{6\tau} (t - t_{i-1})^3 + (q_{i-1} - M_{i-1} \frac{\tau^2}{6}) \frac{t_i - t}{\tau} + \\ & + (q_i - M_i \frac{\tau^2}{6}) \frac{t - t_{i-1}}{\tau} \rightarrow t_{i-1} < t < t_i; i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4.46)$$

Определение ускорений в узловых точках выполняется на основе системы алгебраических уравнений, составленных из условия непрерывности скоростей в узловых точках и равенстве их нулю в граничных точках. Полученную систему уравнений удобно представить в векторно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & \lambda_0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \mu_1 & 4 & \lambda_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \mu_2 & 4 & \lambda_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \mu_m & 4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_m \end{bmatrix}, \quad (4.47)$$

$$M = \Delta^{-1} \cdot D,$$

Параметры правой части уравнения (4.47) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \mu_m = 2; \mu_i = \tau_i / (\tau_i + \tau_{i+1}); \lambda_i = 1 - \mu_i \\ d_0 &= 3(q_1 - q_0) / \tau_1^2; d_m = 3(q_{m-1} - q_m) / \tau_m^2; \\ d_i &= 3[(q_{i-1} - q_i) / \tau_{i+1} - (q_i - q_{i-1}) / \tau_i] / (\tau_{i+1} + \tau_i). \end{aligned} \quad (4.48)$$

Продолжительность интервала времени  $T$  и разбиение его на необходимое число отрезков выполняется на основе предварительного расчета с последующим уточнением каждого интервала времени  $\tau_j$ . В заключении процедуры планирования движения манипулятора определяется уточненное значение общего времени обработки заданной траектории. Предварительный расчет выполняется в следующей последовательности. Интервалы времени  $\tau_i$  обработки каждого участка траектории определяются величиной перемещения той или иной координаты  $\Delta q_{ji} = q_{ji} - q_{j(i-1)}$  и значениями скорости на рассматриваемом участке. Последние должны удовлетворять ограничениям на предельно допустимые значения. В результате предварительного расчета определяется продолжительность времени  $T$ :

$$T = \sum_{i=1}^m k_i \max_{j=1}^n \frac{|\Delta q_{ji}|}{(\omega_j)_{\text{дон}}}, \quad (4.49)$$

где  $k_j$  — коэффициент запаса, выбираемый в пределах 1,0—1,2.

После окончания построения сплайнов следует выполнить проверку. В случае нарушения ограничений на отдельных участках траектории хотя бы по одной из обобщенных координат следует увеличить временной интервал на этом участке. Если к быстродействию обработки траекторий не предъявляется жестких требований, то рекомендуется вначале определить максимальное значение времени прохождения одного участка:

$$\tau_{\max} = k \max_i \left[ \max_j \frac{|\Delta q_{ji}|}{(\omega_j)_{\text{дон}}} \right], \quad (4.50)$$

а затем, взяв его в качестве шага интерполяции выполнить построение сплайнов. При этом общий интервал времени обработки траектории составит  $T = m\tau_{\max}$ . При равномерном шаге  $\tau_i = \tau_{i+1} = \tau$  коэффициенты  $\mu_i$  и  $\lambda_i$  матрицы  $\Delta$  становятся одинаковыми и равными  $\lambda_i = \mu_i = 1$ . При этом значения параметров  $d_i$  рассчитываются по упрощенным выражениям:

$$\begin{aligned} d_0 &= 3(q_1 - q_0)/\tau^2; \quad d_m = 3(q_m - q_{m-1})/\tau^2; \\ d_i &= 1,5(q_{i+1} - 2q_i + q_{i-1})/\tau^2 \rightarrow (i = 2, 3, \dots, m-1). \end{aligned} \quad (4.51)$$

При выполнении таких технологических операций как окраска, грунтовка, укладка бетона, сварка, резка материала требуется не только обеспечение непрерывности и плавности движения, но и планирование скорости и ускорения движения. В этом случае при планировании движений манипулятора требуется определение скорости звеньев

$$\dot{q}(t) = [\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t)]^T,$$

обеспечивающей расчетную технологическую скорость перемещения инструмента при обработке траектории. Задача планирования движений манипулятора приобретает следующий вид. Требуется сформулировать законы изменения обобщенных координат  $q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ , если определены их значения в граничных и узловых точках траектории, а также скорости каждой степени подвижности в этих точках, соответствующие технологической скорости движения схвата или инструмента:

$$q_{ji}(t_i) = q_{ji}; \quad \dot{q}_{ji}(t_i) = \dot{q}_{ji} \rightarrow i = 1, 2, \dots, n-1.$$

Формирование закона  $q(t)$  выполняется в виде последовательности сопряженных друг с другом участков, описываемых интерполяционным многочленом. В данном случае предпочтение может быть отдано кубическому интерполяционному многочлену Эрмита. Если в узловых точках  $t_i$ , кроме значений функции  $\dot{q}_j(t_i) = \dot{q}_{ji}$  известны также значения производных  $\ddot{q}_j(t_i) = \ddot{q}_{ji}$ , тогда на каждом отрезке  $[t_{i-1}, t_i]$  можно построить сплайн в соответствии с уравнением:



$$q_j(t) = q_{ji-1} \cdot \frac{(t_i - t)^2 \cdot (2(t - t_{i-1}) + \tau)}{\tau^3} + q_{ji-1} \cdot \frac{(t_i - t)^2 \cdot (t - t_{i-1})}{\tau^2} + (4.52) \\ + q_{ji} \cdot \frac{(t - t_{i-1})^2 \cdot (2(t_i - t) + \tau)}{\tau^3} + \dot{q}_{ji} \cdot \frac{(t - t_{i-1})^2 \cdot (t - t_i)}{\tau^2},$$

где  $\tau = t_i - t_{i-1}$  — шаг интерполяции.

Особенностью планирования движения в данном случае являются то, что моменты времени  $t_i$  соответствующие узловым точкам изначально определены, причем шаг интерполяции обычно выбирается равномерным. В случае нарушения монотонности функций  $q_j(t)$  следует изменить шаг интерполяции и осуществить повторное вычисление.

## 4.5. Построение прогнозирующих и адаптивных алгоритмов планирования движений

Расширение функциональных возможностей строительных роботов и степени автономности их работы можно достичь за счет использования прогнозирующих и адаптивных алгоритмов. В процессе отработки роботом программных движений возможны различного рода отклонения, которые возникают за счет ошибок работы информационно-измерительной системы робота или за счет действия случайных возмущений, вызывающих кратковременные отклонения параметров движения. Компенсация таких погрешностей в работе систем управления робота возможна на основе использования прогнозирующих алгоритмов управления. Несмотря на простату реализации, эти алгоритмы позволяют исключить случайные ошибки при отработке траекторий движения. Это особенно важно для монтажных, раскройных и других строительных роботов, выполняющих технологические операции.

Основная суть прогнозирующих алгоритмов заключается в оценке ошибок на каждом шаге управления на основе сравнения измеренных и прогнозируемых значений параметров обрабатываемой траектории движения [41]. При их построении предпочтение следует отдавать моделям, отличающиеся простотой реализации. При выборе алгоритмов прогноза корректно использовать предположение об ограниченности производных сигналов о перемещении до  $m+1$ -го порядка, что соответствует свойствам реальных

технологических объектов, в том числе и исполнительных систем роботов. Это позволяет описать поведение сигнала на интервале в  $m+1$  периодов измерения полиномом  $m$ -ной степени, учитывающим текущий и  $m$  предыдущих результатов измерения сигнала о перемещении. Тогда при каждом шаге управления можно с помощью полинома прогнозировать ожидаемое значение положения. Если в момент следующего шага измеренное значение положения отклоняется от прогнозируемого на величину, превышающую допустимую ошибку прогноза, то это является признаком сбойной ситуации. В этом случае за текущее значение перемещения принимается прогнозируемое значение, а ожидаемое значение положения прогнозируется на один шаг управления. Метод получения простых для реализации алгоритмов прогноза основан на представлении контролируемого сигнала в виде ряда Тейлора. Однако на его основе конструируются только алгоритмы однократного прогноза, а при многократном прогнозе вывод вычислительных выражений существенно усложняется, поскольку конструирование алгоритмов прогноза и определение верхних ошибок прогноза выполняется в виде отдельных процедур. В [41] предложен более простой метод для конструирования простых для программной реализации алгоритмов одно- и многократного прогноза, позволяющий одновременно с выводом алгоритма получать и верхние оценки ошибки прогноза. Сущность его состоит в следующем. Пусть измеряемое положение  $P(t)$  задано на интервале  $(t_{k-m}, t_k)$ , где  $t_k$  — текущий момент времени, своими равноотстоящими во времени через период измерения  $\tau$  отсчетами  $P_{k-i}$  ( $i = 0, 1, \dots, m$ ). Тогда его можно представить в виде интерполяционного полинома Лагранжа с остаточным членом:

$$P(t) = \frac{1}{\tau^m} \sum_{i=0}^m P_{k-i} \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^m \frac{t + j\tau}{j - i} + \frac{M_{m+1}}{(m+1)!} \prod_{j=0}^m (t + j\tau), \quad (4.53)$$

где  $M_{m+1}$  — максимальное значение  $m+1$ -ой производной от  $P(t)$ .

Подставляя в эту формулу значения времени  $t = k\tau$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), получаем алгоритмы прогноза значения перемещения  $P(t)$ . Кроме того, на их основе можно строить алгоритмы оценки методической составляющей ошибки прогноза  $\Delta_M$  в виде зависимости от априорно известных значений периода измерения  $\tau$  и  $m+1$  — ой производной от сигнала перемещения  $M_{m+1}$ . Алгоритмы многократного прогноза можно упростить, если учесть, они могут быть

получены из алгоритмов однократного прогноза, путем последовательной подстановке в него вместо текущего отсчета  $P_k$  ранее прогнозируемого значения и увеличением на единицу индексов при отсчетах  $P_{k-i}$ . Так для двукратного прогноза алгоритм прогнозирования получается в виде

$$P(2\tau) = 10 (P_k - 2 P_{k-1} + 1,5 P_{k-2} - 0,4 P_{k-3}). \quad (4.54)$$

Это свойство построения выражений позволяет конструировать алгоритмы прогноза и коррекции результатов измерения с выполнением вычислений в рекуррентной форме. При этом используется только одно вычислительное выражение алгоритма однократного прогноза, в который подставляется в виде текущего ранее прогнозируемое значение положения.

Способность роботов адаптироваться к условиям среды и функционировать при изменении степени неопределенности среды является важным условием их использования при выполнении многих строительного-монтажных, штукатурных и ряда отделочных работ. Традиционное решение задач управления движением манипуляторов связано с заданием программных траекторий в форме базовых  $X(t)$  или обобщенных координат  $q(t)$ , которые отрабатываются на основе кинематических или динамических алгоритмов управления. При этом не учитывается изменение массы объектов манипулирования, изменения взаимного влияния степеней подвижности, а также вариативность возмущающих воздействий рабочей среды на объект манипулирования. В ряде случаев изменение этих возмущений приводит к существенному ухудшению качества программного управления роботом. В результате возникает необходимость использования алгоритмов управления манипулятором, которые бы обеспечили инвариантность основных динамических характеристик робота. Решение этих задач наиболее целесообразно на основе применения алгоритмов адаптивного управления, которые позволяют обеспечить требуемое качество динамических процессов в исполнительной системе робота при существенном изменении массы и моментов инерции объектов манипулирования. Кроме того, использование алгоритмов адаптивного управления позволяет подавить упругие колебания в степенях подвижности и компенсировать динамические ошибки, возникающие за счет взаимного влияния степеней подвижности. В результате применения адаптивных законов управления повышается динамическая точность отработки траекторий движения и позициони-

рования объектов. Это особенно важно для строительных роботов, предназначенных для выполнения монтажных операций.

Характерной особенностью роботизируемых строительных операций является сложность организации рабочей среды. Эффективность роботизации и автоматизации строительных операций в этих условиях возможна только на основе применения роботов с адаптивным или интеллектуальным управлением. При этом одновременно должны решаться вопросы частичной упорядоченности рабочей среды построения адаптивных законов управления, что позволит сократить общие затраты на роботизацию. Использование адаптивных законов управления позволяет обеспечить выполнение заданий в условиях недетерминированной среды за счет сбора и обработки информации о ней. Получение такой информации обеспечивается информационно-измерительной системой робота, которая выполняет функции очувствления и получения информации о состоянии робота.

Исходя из изложенного, для строительной робототехники интерес представляют алгоритмы адаптивного управления двух видов: стабилизирующие и очувствляющие (рис. 4.13).

Стабилизирующие алгоритмы адаптивного управления обеспечивают инвариантность в системах управления манипулятором и выполняют стабилизацию параметров состояния при изменении



Рис. 4.13. Алгоритмы адаптивного управления

массы объектов манипулирования и изменения взаимного расположения степеней подвижности. Эти алгоритмы позволяют достичь неизменности ошибок управления от внешних условий и сохранить точность воспроизведения управляющего воздействия. В этом случае манипулятор следует рассматривать как многомерную систему со связями между контурами степеней подвижности. Среди них следует выделить алгоритмы управления по заданной модели, алгоритмы управления по возмущению и алгоритмы, выполняющие независимое управление движением по скорости и ускорению. Алгоритмы управления по заданной модели позволяют за счет перестройки коэффициентов обратных связей достичь желаемого качества процессов управления при изменении нагрузок и динамики манипулятора в широких пределах. Алгоритмы управления по возмущению обеспечивают стабилизацию траекторий движения в широком диапазоне нагрузок и движений. В их основе заложено формирование корректирующих сигналов по принципу наименьших квадратов или другим способом. Алгоритмы, выполняющие независимое управление движением по скорости и ускорению обеспечивают минимизацию ошибок по положению, ориентации и скоростям схвата. Эти алгоритмы строятся на основе вычисления номинальных управляющих моментов и их коррекции. Стабилизирующие алгоритмы адаптивного управления имеют двухуровневую структуру (рис. 4.14). На первом уровне управление выполняется в зависимости от задающего воздействия  $X(t)$ . При этом регулирование происходит при соответствующем выборе вектора параметров настройки  $A(t)$ . На втором уровне вы-

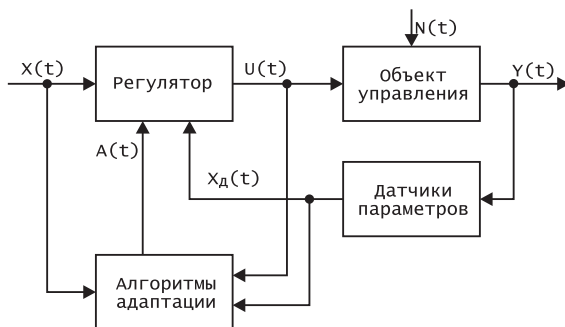


Рис. 4.14. Структурная схема стабилизирующего адаптивного управления

полняется настройка вектора  $A(t)$ , т. е. определение параметров настройки регулятора. Этим обеспечивается достижение цели управления при соответствующих значениях нагрузок и состоянии исполнительного устройства робота.

Для строительных роботов, имеющих заданную структуру, стабилизирующие алгоритмы управления следует строить по принципу самонастраивающихся систем, когда структура объекта заранее задана, а на основе алгоритмов адаптации определяются коэффициенты настройки. В этом случае используется прямое адаптивное управление с эталонной моделью (рис. 4.15). В основу этого метода положена модель динамической системы и алгоритм адаптации, который в зависимости от значений ошибок управления, изменяет коэффициенты передачи обратных связей системы управления. Ошибки управления оцениваются на основе сравнения информации на выходах модели и реальной системы. В строительных роботах с адаптивным управлением построение заданной модели можно выполнять на основе дифференциальных уравнений второго порядка для каждой степени подвижности [47]. В процессе работы такой системы выполняется настройка коэффициентов передачи обратной связи по положению и скорости таким образом, чтобы рабочие характеристики робота  $y_i(t)$  совпадали с желаемыми характеристиками модели  $x_i(t)$ . Использование алгоритмов адаптивного управления по заданной модели позволяет получить стабильные характеристики манипулятора при изменении нагрузки в широких пределах. Построенные на этом методе адаптивные алгоритмы управления отличаются простотой математических моделей и не требуют знания внешних воздействий на манипулятор робота. В общем случае динамику манипулятора и модели описывает системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} T_i^2 \ddot{y}_i(t) + 2T_i \xi \dot{y}_i(t) + y_i(t) &= r_i(t), \\ \alpha_i(t) \ddot{x}_i(t) + \beta_i \dot{x}_i(t) + x_i(t) &= r_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.55)$$

где  $T_i$  — постоянная времени системы;  $\xi$  — коэффициент демпфирования системы;  $\alpha_i(t)$ ,  $\beta_i(t)$  — параметры системы, медленно изменяющиеся во времени.

Для настройки коэффициентов обратной связи управляемой системы, обеспечивающей минимизацию функции квадратичной ошибки, определяемой разностью между динамикой реальной системы и динамикой заданной модели, удобно использовать метод градиентного спуска:

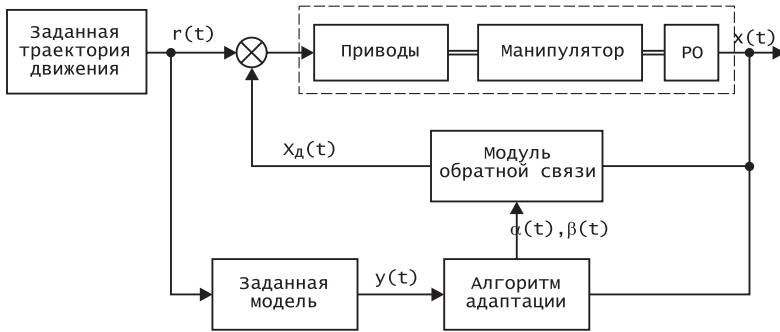


Рис. 4.15. Структурная схема адаптивного управления по заданной модели

$$J_i(\varepsilon_i) = 0,5(k_{2i}\ddot{\varepsilon}_i + k_{1i}\dot{\varepsilon}_i + k_{0i}\varepsilon_i)^2, \quad (4.56)$$

где  $\varepsilon_i = y_i - x_i$  — ошибка управления;  $k_{ji}$  — весовые коэффициенты, выбираемые из условия работы системы.

Настройка параметров системы  $\alpha_i, \beta_i$ , выполняется в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned} \alpha_i(t) &= \sqrt{2}J_i(\varepsilon_i)/[k_{2i}\ddot{u}_i(t) + k_{1i}\dot{u}_i(t) + k_{0i}u_i(t)], \\ \beta_i(t) &= \sqrt{2}J_i(\varepsilon_i)/[k_{2i}\ddot{\omega}_i(t) + k_{1i}\dot{\omega}_i(t) + k_{0i}\omega_i(t)], \end{aligned} \quad (4.57)$$

где  $u_i(t), \omega_i(t)$  — вспомогательные переменные, вычисляемые в результате системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} T_i^2\ddot{u}_i(t) + 2T_i\xi\dot{u}_i(t) + u_i(t) &= -y_i(t), \\ T_i^2\ddot{\omega}_i(t) + 2T_i\xi\dot{\omega}_i(t) + \omega_i(t) &= -y_i(t). \end{aligned} \quad (4.58)$$

Используя приведенные соотношения (4.55—4.58), строится алгоритм адаптивного управления по заданной модели. Вначале определяются параметры состояния модели  $y_i(t)$ , соответствующие заданию, и считывается информация о состоянии объекта управления. После этого вычисляются производные  $\ddot{y}_i(t), \dot{y}_i(t)$ , и выполняется расчет отклонений параметров состояния объекта  $\varepsilon_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$ . Следующим шагом является определение значений целевой функции  $J_i(\varepsilon_i)$  и решение дифференциальных уравнений (4.58), с целью нахождения вспомогательных переменных  $u_i(t), \omega_i(t)$ . Заключительным шагом работы алгоритма является определение параметров настройки  $\alpha_i(t), \beta_i(t)$  путем решения дифференциальных уравнений (4.57).

Особенностью функционирования строительно-монтажных роботов является возможность резких изменений моментов и усилий на рабочем органе в процессе выполнения установочных и ориентирующих операций. Для стабилизации параметров состояния манипулятора в этих условиях могут использоваться алгоритмы адаптивного управления по возмущению (рис. 4.16). Отличительной особенностью этого метода адаптивного управления является учет всех сил взаимодействия между степенями подвижности манипулятора.

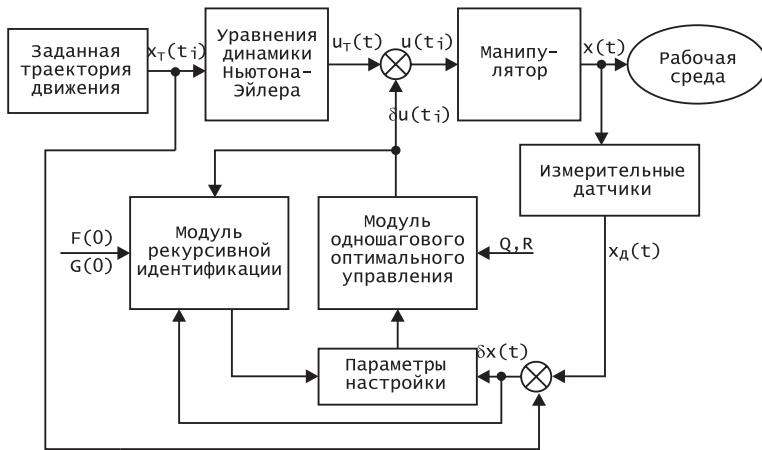


Рис. 4.16. Структурная схема адаптивного управления по возмущению

В основе метода адаптивного управления по возмущению положены линеаризованные уравнения движения в окрестности номинальной траектории, для которой известны обобщенные положения, скорости и ускорения в каждый дискретный момент времени. Управление траекторным движением выполняется на базе динамических уравнений движения Ньютона—Эйлера, с помощью которых определяются номинальные обобщенные моменты, обеспечивающие движение вдоль заданной траектории с требуемыми расчетными скоростями и ускорениями. С целью уменьшения ошибок по положению и скорости при движении по заданной траектории используется обратная связь, которая формирует вектор обобщенных моментов по возмущениям. Эффективное определение обобщенных возмущающих моментов в реальном времени выполняется с помощью рекурсивной идентификации по методу наи-



меньших квадратов. При управлении манипулятором вдоль заданной траектории используется одношаговый оптимальный закон управления, обеспечивающий получение необходимого управляющего воздействия. Для этого параметры и коэффициенты передачи обратной связи пересчитываются и настраиваются в каждый дискретный момент времени. В результате, управляющие обобщенные моменты складываются из номинальных моментов, определяемых из уравнений движения Ньютона—Эйлера, и моментов по возмущениям, вычисляемых по одношаговому оптимальному закону управления линеаризованной системы. Подробное описание адаптивного управления по возмущению изложено в [47].

Из класса очувствляющих алгоритмов управления в первую очередь рассмотрим адаптивные алгоритмы силомоментного очувствления, которые представляют интерес для управления строительными роботами, выполняющими силовые операции, и захватными траверсами монтажных роботов. Основной особенностью этих систем является наличие измерительных средств контроля моментов и усилий, развиваемых роботом, и поддержание их на заданном уровне при отработке движений. Управляющие сигналы в данном случае формируются в виде двух составляющих, одна из которых представляет локальное управление  $q_n$ , а вторая — сигнал динамической коррекции  $q_k$ :  $q = q_n + q_k$ . Корректирующая составляющая  $q_k$  обеспечивает динамическую декомпозицию каналов и определяется на основе введения силовых обратных связей. Структурная схема управления с силомоментным очувствлением приведена на рис. 4.17.

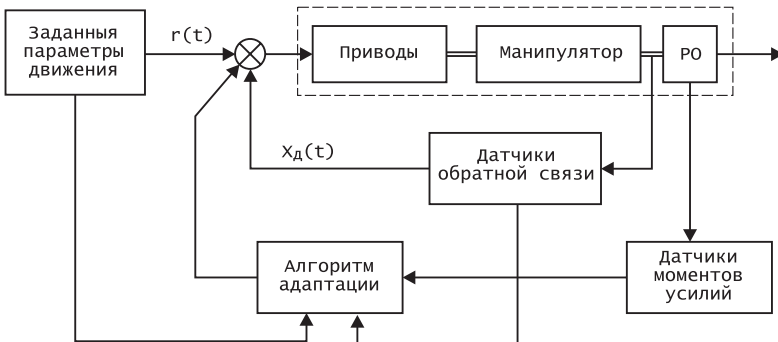


Рис. 4.17. Структурная схема адаптивного управления с силомоментным очувствлением

Характерной особенностью строительных площадок является одновременная работа нескольких единиц строительной техники или группы оборудования, что приводит к необходимости непрерывно контролировать с помощью различных сенсорных устройств динамически изменяющуюся обстановку в пределах рабочей зоны. В этом случае интерес представляют планирующие алгоритмы адаптивного управления, способные анализировать ситуацию на пути движения объекта манипулирования и принимать решение о продолжении движения по заданной траектории, перехода на другую траекторию или ожидания изменения ситуации.

Принятие решений должно выполняться с учетом приоритетов того или иного оборудования, задействованного в рабочей зоне робота при выполнении строительной операции. Построение планирующих алгоритмов для данной задачи целесообразно проводить на основе использования методов, основанных на нечеткой логике. Распознавание параметров рабочей среды выполняется на основе сравнения входной ситуации с набором эталонных ситуаций, хранящихся в специализированной базе данных. В качестве меры близости ситуаций в этом случае используется степень нечеткого равенства. Для сокращения времени анализа ситуации применяется иерархическая организация множества эталонных ситуаций, включающая  $N$  уровней. В зависимости от требуемой степени детализации в процессе анализа используется различное число уровней. Распознавание координат препятствий производится нечетким алгоритмом  $A$ , который задается совокупностью условных нечетких операторов:

$$\text{if}(S_0 \subseteq S_i, \text{ then}(x = \tilde{X}_i, y = \tilde{Y}_i) \rightarrow i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.59)$$

где  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  — множество эталонных расплывчатых ситуаций;  $x, y$  — координаты препятствия;  $\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i$  — нечеткие координаты препятствия по ортогональным осям. Нечеткие координаты препятствий представляют собой нечеткие множества в четком множестве  $I$ :

$$\tilde{X}_i = \{\langle \mu_{x_1}(i)/i \rangle\}, i \in I; \tilde{Y}_i = \{\langle \mu_{y_1}(i)/i \rangle\}, i \in I, \quad (4.60)$$

Нечеткие координаты  $\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i$  препятствий задаются экспертной базой данных, а эталонные ситуации из множества  $S$  формируются автоматически.

## 4.6. Планирование движений манипулятора при работе с системой технического зрения

При автоматизации строительно-монтажных и отделочных операций возникают задачи восприятия трехмерных сред и объектов: мест монтажа, окрашиваемых помещений, монтируемых конструкций и пр. При этом под машинным восприятием понимается информационный процесс, направленный на построение предметного образа и его целенаправленный анализ. Восприятие предметных образов должно носить избирательный характер и выделять только те детали образа, которые существенны для решаемой задачи. Информационное представление должно обладать полной отображения среды или объекта лишь в той мере, которая достаточна для решения задач управления манипулятором. При роботизации монтажных работ требуется распознавание объекта монтажа и определение его ориентации. В случае роботизации отделочных работ возникает задача определения геометрических характеристик объекта, а для малярных операций оказывается достаточным бинарное внутреннее представление на основе использования двух уровней яркости. Решение перечисленных задач выполняется на основе применения систем технического зрения, включающих элементы получения, преобразования и первичной обработки информации [42] (рис. 4.18). Эти системы отличаются большой информационной емкостью. Они позволяют на основе преобразования, анализа и обработки информации обеспечить систему управления робота сведениями о свойствах объектов манипулирования, о характерных особенностях окружающей среды. Первичная обработка информации включает операции формирования, анализа и идентификации полученных изображений. На стадии формирования изображение подвергается предварительной обработке для улучшения его качества и выделения полезной информативной составляющей, необходимой для решения поставленных задач. На этапе анализа изображений составляются описания двумерных и трехмерных сцен с использованием процедур сегментации изображений на основе алгоритмов выделения контуров. Идентификация изображений заключается в сравнении результатов анализа описаний с геометрическими данными объектов, с целью распознавания объектов по характерным признакам.

Процесс идентификации объектов, находящихся в рабочей зоне робота состоит из двух этапов. На первом этапе выделяются характерные признаки объекта, а на втором — производится непосредственное распознавание его по совокупности характерных признаков.

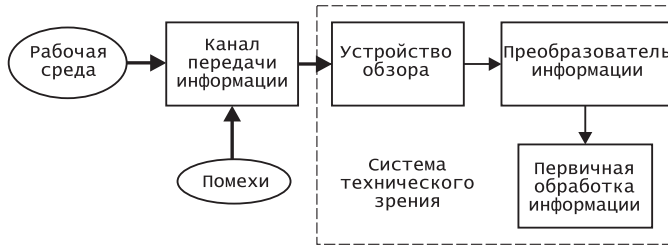


Рис. 4.18. Обобщенная структура системы технического зрения

Решение задач управления роботом с системой технического зрения выполняется на основе использования алгоритмов предварительной информации, алгоритмов выделения признаков изображений и алгоритмов планирование движений рабочего органа. Для предварительной обработки дискретных изображений в строительных роботах можно применять интегральные методы, основанные на определении некоторых суммарных свойств изображений. В большинстве случаев вполне приемлемыми являются преобразования Уолша или Адамара, отличающиеся простотой преобразований. Для предварительной обработки информации строительно-монтажных роботов лучше использовать дифференциальные алгоритмы, позволяющие выделять границы плоских объектов, ребра трехмерных объектов, находить отверстия и места крепления конструкций. Выбор признаков осуществляется на основе алгоритмов выделения признаков изображений. Основной их задачей является получение сжатого описания объекта в выбранной системе признаков, которое затем используется при решении задач планирования движений на основе адаптивных алгоритмов управления.

Планирование движений строительно-монтажных роботов должно происходить самостоятельно к указанной целевой позиции на основании полученного описания объекта манипулирования и окружающей его рабочей среды. Планирующие алгоритмы должны обеспечить корректировку и изменение маршрута перемеще-

ния монтируемых деталей или конструкций в случае непредвиденного появления в среде препятствий на пути движения. Для их построения могут использоваться различные подходы, обеспечивающие построение алгоритмов обхода препятствий в трехмерном пространстве или алгоритмов обхода запретных зон в различных заданных плоскостях. Наибольший интерес для строительной робототехники представляют алгоритмы, полученные на основе использования штрафных функций, нечеткого представления среды, нейросетевого подхода.

Алгоритмы обхода препятствий, основанные на определении штрафных функций, отличаются своей простотой. Их основная сущность заключается в получении и использовании в процессе планирования штрафных функций, которые представляют собой сумму штрафов отдельных препятствий. Значения штрафов для конфигурации, которая приводит к столкновениям, выбирается равным бесконечности и резко уменьшается по мере увеличения расстояния от препятствия (рис. 4.19). К штрафной функции добавляется штрафной член отклонения от заданной траектории. Решение выбирается в соответствии с локальным минимумом штрафных функций, обеспечивающих компромиссное решение между увеличением длины траектории движения и максимальным приближением к препятствиям. Такое планирование выполняется на уровне движений схвата. Планирование движений на основе штрафных функций может быть также использовано при

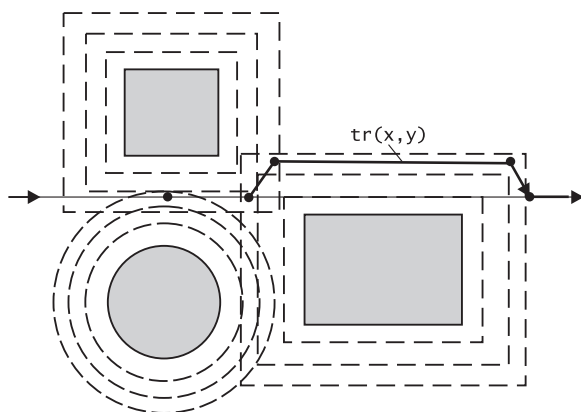


Рис. 4.19. Планирование движения робота на основе использования штрафных функций

выполнении роботом отделочных работ в ограниченном пространстве помещений. В этом случае штрафные функции составляются для различных конфигураций манипулятора и на их основе с помощью функции поиска выбирается последовательность конфигураций, обеспечивающих бесконфликтное движение.

Планирующие алгоритмы на основе нечеткого представления среды позволяют использовать один или несколько критериев оптимальности. В качестве критериев оптимальности могут выбираться путь, время транспортирования, энергозатраты и др. параметры. Алгоритмизация задачи планирования в этом случае включает получение информации о рабочей среде и на ее основе проведение последовательного выбора оптимальных участков траектории движения. В качестве исходной информации при расчете оптимальной траектории перемещения используется растровое изображение рабочей зоны, полученное путем сканирования (рис. 4.20).

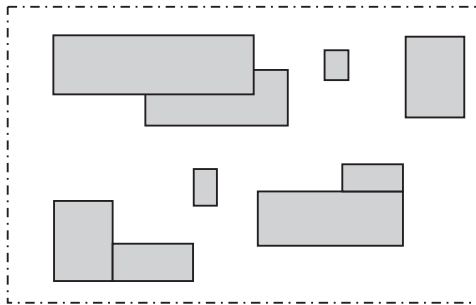


Рис. 4.20. Растровое представление рабочей зоны

Форма численного представления этой информации может различаться. Однако, вне зависимости от вида входных данных: битовые массивы, матрицы заполнения или другие скалярные массивы, описывающие геометрию рабочей зоны, информация должна быть преобразована в удобный для расчетов вид. Удобно на основе растрового изображения проводить его векторизацию и строить оптимизационный граф.

При решении задач управления строительными роботизированными системами возникает необходимость отслеживания динамически изменяющейся обстановки в пределах рабочей зоны, в которой одновременно функционируют несколько единиц строительной техники и роботы. Планирование движений робота и сопряженного с ним оборудования в данном случае целесообразно

производить на основе интеллектуальных алгоритмов управления, использующих нейросетевые модели. Существует ряд нейросетевых подходов для решения задачи планирования движений. Большая их часть может использоваться лишь для нахождения маршрута в стационарной среде [59, 60]. Однако в ряде работ описана динамика нейронной сети для планирования маршрута движения в динамической среде, представляющая определенный интерес для строительной робототехники [25]. Планирование движений выполняется на основе модели нейронной сети, реализующей волновую динамику. Такая нейросетевая модель рассматривается как дискретная динамическая система, которая полностью описывается набором векторов состояний нейронов  $X_i = [x_i, \tilde{W}_{S_i}] \in \mathfrak{R}^{2n+1}$ . Первый элемент  $x_i$  вектора  $X_i$  является скалярной величиной, характеризует уровень активизации нейрона, и представляет выход нейрона. Вектор  $\tilde{W}_{S_i} = [w_{i,i}, \dots, w_{i,i}, \bar{w}_{i,i}, \dots, \bar{w}_{i,i}]$  включает два набора весовых коэффициентов, определяющих силу синапсов между нейроном  $i$  и его ближайшими соседями. Уровни активности нейронов-соседей  $i$ -го нейрона совместно формируют вектор  $X_{S_i} = [x_{i_1}, \dots, x_{i_n}]$ . Нейрон  $i$  считается неактивным, если  $x_i = 0$ , и активным, если  $x_i > 0$ . С каждым нейроном в поле сети ассоциированы тормозящий  $o_i$  и возбуждающий  $e_i$  внешние входы, через которые в сеть поступает информация о дискретном представлении  $S$ . Динамическое описание нейронной сети выполняется с помощью системы уравнений:

$$x_i(t+1) = e_i + (1 - e_i) \left( \sum_{j \in S_i} e_j (x_j(t) + 1) + (1 - \sum_{j \in S_i} e_j) r \left( \sum_{j \in S_i} w_{ji} (x_j(t) + 2) \right) \right), \quad (4.61)$$

при этом правила изменения весовых коэффициентов описываются наборами уравнений:

$$w_{ji}(t+1) = U(P_k(X_{S_i}(t))), \quad \bar{w}_{ji}(t+1) = x_j(t), \quad j \in S_i, \quad (4.62)$$

где функции  $r(\cdot)$  и  $U(\cdot)$  заданы формулами:  $r(\delta) = \begin{cases} [\delta], \delta \geq 0 \\ 0, \delta < 0 \end{cases}$ ,

$$U(\delta) = \begin{cases} 1, \delta > 0 \\ 0, \delta \leq 0 \end{cases}$$

Правило движения объекта манипулирования выглядит следующим образом:

$$\tau(t_s + n) = \{p_j : w_{ji} + e_j > 0, j \in s_i\},$$

где  $p_j$  есть следующая конфигурация робота в пространстве  $S$ , ассоциированная с нейроном  $j$ , а  $t_s$  — время начала движения,  $n > 0$  —  $n$ -ый дискретный шаг эволюции. Перемещения робота, согласно описанному выше правилу, определяют цепочку нейронов, соответствующих безопасному пути от начальной до целевой конфигурации в  $S$ .



# **Глава 5. Управление строительными роботами**

## **5.1. Многоуровневый характер управления строительными роботами**

Строительный робот как объект управления представляет собой сложную, многоцелевую, многокритериальную систему с многозвенной механической конструкцией и единой целью функционирования. В общем случае управление пространственным движением манипуляционной системы робота при реализации заданной задачи носит многоуровневый характер. В общем случае, в системах управления строительных роботов можно выделить три уровня управления: исполнительный, тактический и стратегический [32]. Управление на каждом из них осуществляется путем формирования управляющей информации и передачи ее на низший по рангу уровень для достижения конечной цели управления (рис. 5.1).

Исполнительный уровень реализует управление приводами по отдельным степеням подвижности робота и определяет динамические и точностные свойства манипуляционной системы. Этот уровень имеет свои внутренние связи по скорости, положению, моментам, что обеспечивает требуемые динамические и статические характеристики для каждой степени подвижности.

Тактический уровень управления обеспечивает планирование элементарных движений рабочих органов, их разделение на согласованные перемещения следящих приводов каждой из степеней подвижности и формирование управляющих команд для исполнительного уровня.

Тактический и исполнительный уровни управления роботом должны обладать набором алгоритмов, позволяющих совершать элементарные движения, такие, как перемещение рабочего органа в определенную точку зоны обслуживания или движение его по заданной траектории и др. Формирование этих алгоритмов связано с кинематикой и динамикой манипуляционной системы робота.

Стратегический уровень управления определяет последовательность командных движений рабочего органа в соответствии с целью управления и осуществляет коррекцию программы управления с учетом информации о внешней среде. Алгоритмы управле-

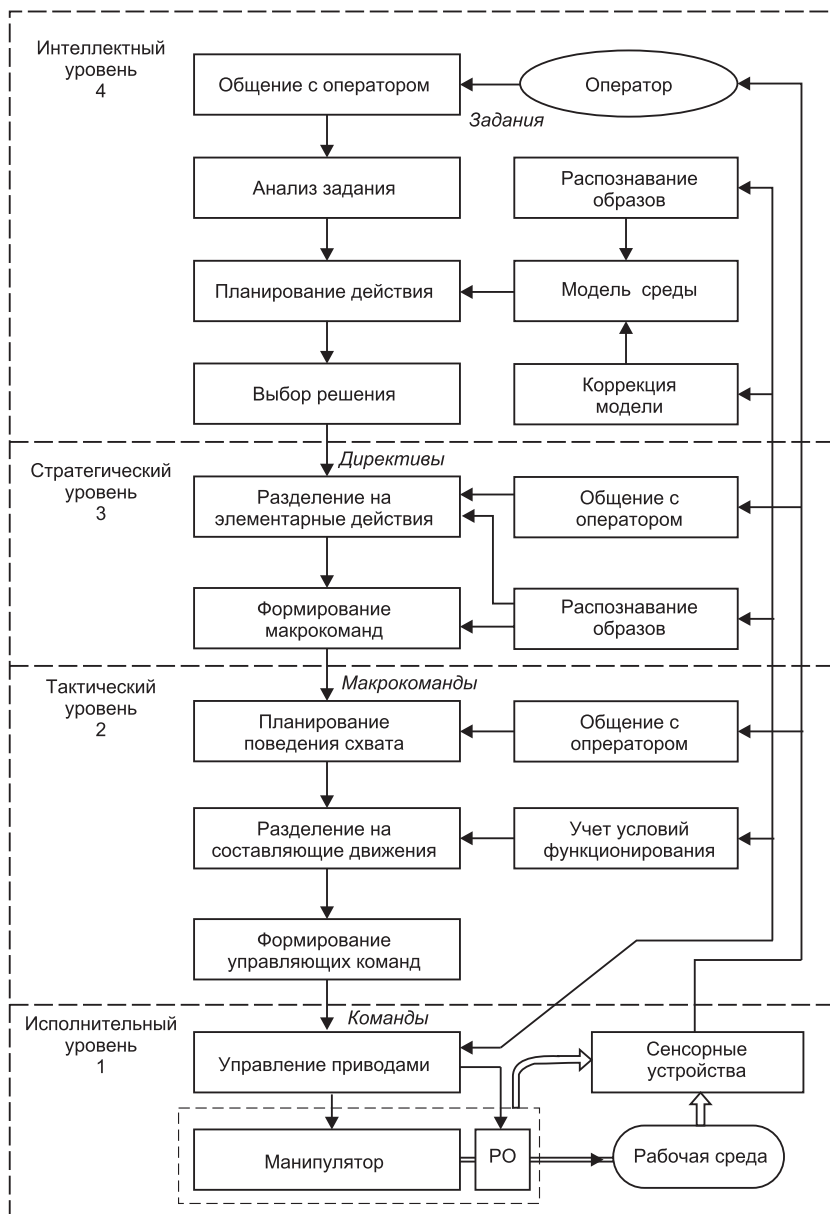


Рис. 5.1. Иерархическая структура управления роботом

ния стратегического уровня выполняют разложение планов действия на элементарные типовые операции с использованием методов эвристического программирования или лингвистических методов. Кроме того, алгоритмы этого уровня обеспечивают диалоговое общение оператора с системой управления на проблемно-ориентированном языке и выполнение заданных директив в реальном масштабе времени.

С развитием строительной робототехники совершенствуются способы управления роботами. Практический интерес для роботизации строительных операций представляют системы управления с элементами искусственного интеллекта. В этих системах управления выделяется еще один высший уровень управления — интеллектный. На этом уровне планируются действия робота с учетом прогнозирования изменений состояния внешней среды, а общение с оператором происходит в диалоговом режиме. Алгоритмы управления интеллектного уровня определяют степень сложности решаемых без участия человека задач, синтезируют и корректируют модели внешней среды разной степени абстракции и обеспечивают планирование действий робота. Кроме того, в их состав входят алгоритмы распознавания для речевого управления роботом.

Рассмотрим особенности управления на исполнительном, тактическом и стратегическом уровнях, представляющие наибольший интерес для строительной робототехники. Управление на исполнительном уровне для большинства строительных роботов связано с управлением следящими приводами многозвенной манипуляционной системы. Алгоритмы этого уровня отражают внутренние связи исполнительный системы робота, которые определяются выбранным способом управления манипулятором. Управление приводами исполнительный системы робота, как правило, строится с обратными связями по скорости или по скорости и положению (рис. 5.2) [39]. Задающими воздействиями для следящих приводов являются сигналы управления  $g_{pi}(t)$ , генерируемые тактическим уровнем, которые в общем случае задают закон изменения во времени обобщенных координат звеньев манипулятора. Выходом исполнительного уровня является вектор обобщенных координат  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$  или вектор положения и ориентации схвата в базовой системе координат. Алгоритмы управления этого уровня должны обеспечить требуемые показатели качества и точности обработки, определяемые технологическими условиями. Исполнительные механизмы робота должны обеспечить близ-

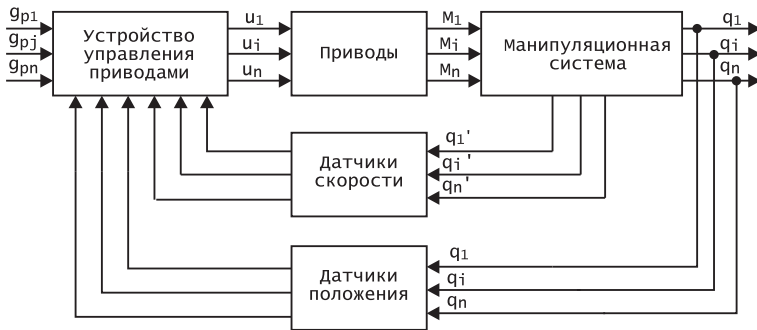


Рис. 5.2. Структурная схема исполнительного уровня управления

кие к оптимальному режимы работы, обладать широким диапазоном изменения скорости, иметь характерные периоды разгона  $t_p$ , установившегося движения  $t_{уст}$  и торможения  $t_m$  с доводкой звена в заданное положение на малой скорости. Плавность перемещения рабочих органов на различных скоростях, требуемые характеристики разгона и торможения с учетом инерционных факторов, заданная точность позиционирования достигаются за счет использования различных законов регулирования и введения дополнительных обратных связей. В приводах строительных роботов распространения получили пропорционально-интегрально-дифференциальные законы регулирования (ПИД-регулирование):

$$u_i(t) = k_{1i}\delta(t) = k_{2i}\dot{\delta}(t) + k_{3i} \int \delta(t)dt,$$

где  $k_{1i}$ ,  $k_{2i}$ ,  $k_{3i}$  — коэффициенты, учитывающие инерционность, демпфирование и упругость подвижных частей манипулятора.

Таким образом, задачи исполнительного уровня сводятся к автоматическому управлению приводами робота в соответствии с поступающим заданием. Алгоритмы такого управления достаточно хорошо разработаны в теории автоматического регулирования. При синтезе алгоритмов управления приводом основное внимание должно уделяться корректирующим элементам, обеспечивающим получение требуемых динамических характеристик.

Тактический уровень управления включает алгоритмы, позволяющие на основании обобщенных макрокоманд, задаваемых более высоким уровнем управления или оператором, определить программу перемещений рабочего органа. Задача управления на тактическом уровне включает несколько этапов. Это, прежде все-

го, планирование поведения рабочего органа в пространстве и расчет траектории его движения, в результате чего определяется последовательность узловых точек траектории. Планирование производится исходя из технологических особенностей операции. Алгоритм планирования узловых точек траектории движения строится эвристическим путем с учетом ограничений движения в рабочем пространстве и последующей проверкой возможности реализации того или иного решения. Число узловых точек зависит от сложности и протяженности выполняемой траектории. Следующим этапом является решение последовательности обратных задач для каждой узловой точки траектории и построение матрицы обобщенных координат:

$$R_{mp} = \begin{bmatrix} q_1^0 & q_1^1 & \cdots & q_1^m \\ q_2^0 & q_2^1 & \cdots & q_2^m \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_n^0 & q_n^1 & \cdots & q_n^m \end{bmatrix}.$$

Каждый столбец этой матрицы определяет конфигурацию манипуляционного механизма в конкретной узловой точке траектории, а каждая строка задает траекторию движения звеньев манипулятора. Заключительным этапом является формирование во времени управляющих сигналов для следящих приводов робота. Алгоритмы управления движением манипуляционной системы и рабочего органа наряду с логической последовательностью перемещения звеньев должны содержать законы изменения во времени обобщенных координат. Поэтому после составления матрицы дискретных значений обобщенных координат формируются непрерывные функции времени  $q_i(t)$  для каждого звена  $i = (1, 2, \dots, m)$ . При этом должно выполняться условие  $q_i(t_j) = q_{ij} \rightarrow j = 0, 1, 2, \dots, m$ , где  $t_0, t_j, \dots, t_m$  — последовательность точек разбиения интервала времени  $[0, T]$  обработки заданной траектории. С целью обеспечения качественного управления и выполнения технологических требований на эти функции могут налагаться дополнительные ограничения.

Реализация алгоритмов управления движением манипуляционной системы связана с решением нелинейных уравнений, определяющих конфигурацию механизма при заданном положении рабочего органа. Поэтому для построения алгоритмов управления на тактическом уровне прибегают к линеаризации уравнений, описы-

вающих поведение манипуляционной системы при малых изменениях координат элементов. Для этого дифференцируют по времени координаты положения звеньев для каждой конфигурации механизма. Полученные в результате этого скорости изменения координат положения звеньев для различных конфигураций будут удовлетворять линейным уравнениям. Эти уравнения можно использовать для расчета малых изменений координат манипуляционной системы. Линейные уравнения относительно скоростей, приращений положения звеньев и действующих сил могут служить основой для построения алгоритмов управления тактического уровня. Движение исполнительных механизмов во всех случаях задается на уровне поведения рабочего органа робота. Причем оператором или алгоритмами более высокого уровня задается необходимая скорость перемещения рабочих органов при определении нового положения, либо указывается новое положение, в которое они должны перейти, либо задается система сил, обеспечивающая вывод рабочих органов в целевое положение. На основании этой информации алгоритмы управления тактического уровня определяют командные сигналы управления для оптимального функционирования приводов робота. Формирование управляющих сигналов для исполнительного уровня выполняется с учетом ограничений конфигурации манипуляционной системы, которые описываются в виде линейных уравнений и неравенств. При этом применяют несколько методов управления планированием траектории движения рабочих органов: управление по вектору скорости; управление по скорости и положению; управления по вектору силы [41].

Алгоритмы управления по вектору скорости формируют на тактическом уровне скорость движения рабочих органов робота в виде командного вектора скорости  $V$  в базовой системе координат или вектора обобщенных скоростей  $\dot{q}(t) = J^{-1}V(t)$ , где  $J$  — матрица Якоби, зависящая от конфигурации манипулятора. Применение алгоритмов по вектору скорости обычно ограничивается режимом перемещения рабочего органа в заданное положение или осуществляется при отработке движений, не требующих большой точности. Алгоритмы управления по вектору скорости формируются в виде приращения координат манипуляционной системы робота за один цикл вычисления алгоритма. Основное уравнение алгоритма управления в данном случае имеет вид  $\Delta S = J(q) \Delta q$ , где  $\Delta S$  — командный вектор приращений положения рабочего органа,  $\Delta q$  —

искомый командный вектор приращений обобщенных координат манипуляционной системы. Командный вектор  $\Delta q$  служит управляющим сигналом для исполнительного уровня системы управления. Чтобы при переходе от точки к точке при планировании траектории получить требуемую картину движения, необходимо выбирать на сложной траектории узловые точки достаточно часто. Управление по вектору скорости эффективно использовать для большинства окрасочных и бетоноукладочных роботов, управление которыми позволяет применять приближенные решения, связанные с ограниченностью задания координат.

У строительных роботов, у которых предъявляются повышенные требования к точности отработки траектории движения, на тактическом уровне используют алгоритмы управления по скорости и положению. Их особенностью является формирование для исполнительного уровня вектора управляющих сигналов, пропорциональных обобщенным скоростям, рассчитанным на основе динамических моделей с учетом погрешностей отработки траектории движения на предыдущем шаге управления.

Тенденция к упрощению процесса управления привела к разработке алгоритма управления по вектору силы. В нем имитационно реализуется управление по заданному направлению. При этом методе управления следящие приводы развивают совокупность обобщенных сил, которые динамически эквивалентны имитационным силам, обеспечивающим при приложении силы к рабочему органу переход в заданное положение по определенной траектории. Этот метод управления отличается простотой реализации.

Стратегический уровень управления роботом содержит набор алгоритмов, состав которых определяется уровнем адаптации и степенью участия оператора в управлении. В общем случае в задачи стратегического уровня входят обработка информации о внешней среде, синтез адаптивных законов управления, а также преобразование смыслового задания, сообщаемого оператором на проблемно-ориентированном языке в последовательность элементарных типовых операций. Алгоритмы управления этого уровня позволяют оценить обстановку, складывающуюся в процессе функционирования робота, и на основании этого провести синтез и коррекцию программы движения. В простейшем случае адаптацию строительного робота к изменению условий работы можно выполнить на основе эвристического подхода. Исходя из анализа выполняемой операции и возможных ситуаций изменения условий функциони-

рования, для каждой комбинации сигналов тактильных датчиков строится эвристическая программа коррекции действия робота.

Стратегический уровень управления адаптивных роботов с системами осязания содержит алгоритмы обработки информации о внешней среде, состав которых определяется видом применяемых сенсорных устройств. При использовании тактильных датчиков информация обрабатывается с помощью простейших логических алгоритмов, формирующих корректирующие команды для тактического уровня. Сложность алгоритмов обработки тактильной информации характеризуется ее видом и объемом. Эффективно решать задачи адаптивного управления строительными роботами позволяют устройства технического зрения. В этом случае алгоритмы обработки зрительной информации имеют целью выделить контурное изображение объекта, которое используется для синтеза программ управления манипуляционной системой робота. Их состав включает набор алгоритмов видеоанализа, обеспечивающих выделение точек перепада яркости, определения контурных точек и аппроксимации контура изображения.

## **5.2. Дистанционное и интерактивное управление роботами**

Характерной чертой технологических операций в строительстве является неупорядоченность и вариативность окружающей среды, в которой они выполняются. В условиях строительных площадок весьма удобным и эффективным является использование роботов с дистанционным управлением. Их отличительной особенностью является непосредственное участие оператора в управлении роботом (рис. 5.3). Такие робототехнические системы с дистанционным управлением называют эргатическими (человеко-машинными) манипуляционными системами. Наличие человека в контуре управления обеспечивает выполнение высокоманевренных операций в сложных и изменяющихся по времени условиях строительства. Основным их преимуществом является то, что при этом не требуется сложного и дорогостоящего оборудования и соответствующих затрат на его эксплуатацию.

Различают командные, копирующие, полуавтоматические системы дистанционного управления [11]. На первых этапах роботизации строительно-монтажных, отделочных и др. работ интерес



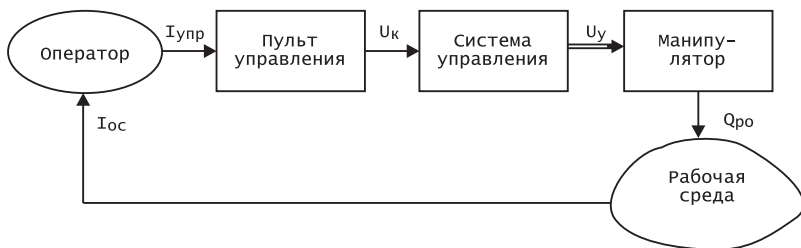


Рис. 5.3. Дистанционное управление строительным роботом

представляют системы командного управления, которые являются одними из наиболее простых и распространенных разновидностей дистанционных систем управления (рис. 5.4). При таком управлении оператор непосредственно управляет приводами манипулятора путем подачи соответствующих команд с пульта управления. Сигнал с пульта управления, связанного с роботом каналом связи, подается на устройство управления, которое запоминает их и передает на исполнительный привод каждой степени подвижности. Устройство управления контролирует исполнение каждой команды и выполняет контроль за предельными положениями каждой степени подвижности.

Оператор управляет поочередным включением приводов, приводящих в движение каждое звено манипулятора, формирует управление схватом для достижения им заданной точки пространства или движением инструмента по заданной траектории. Используя переносной пульт управления, оператор может наблюдать за работой робота и управлять им, находясь за пределами опасной зоны с вредными и неблагоприятными условиями. При выполнении строительных операций в загроможденном пространстве, в

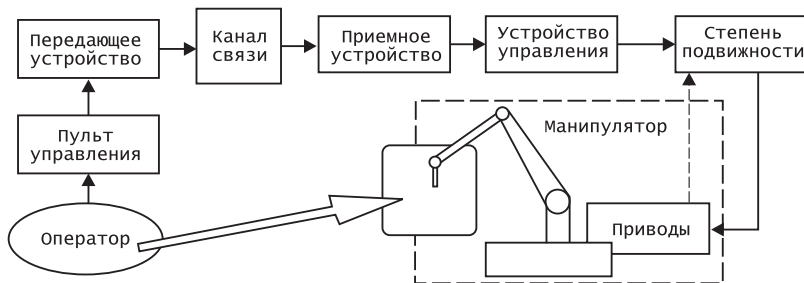


Рис. 5.4. Командное управление манипулятором

зоне загазованности организуется дистанционное наблюдение за выполнением процесса, для чего используют системы технического зрения. Визуальная информация с места работы манипулятора по каналу связи поступает на пульт управления оператора. Командное управление может эффективно использоваться на погрузочно-разгрузочных и монтажных работах, когда необходимо выполнять операции типа: «захватить объект», «поднять», «перенести», «установить».

В зависимости от вида используемых каналов связи различают системы проводного управления, радиоуправления и инфракрасного управления. Для строительных площадок и стройиндустрии в первую очередь интерес представляют системы радиоуправления. Структурная схема командной системы радиоуправления роботом показана на рис. 5.5. Система состоит из командно-передающего пульта управления оператора и радиоприемного устройства. Пульта управления включает клавиатуру управления, шифратор команд, модулятор и радиопередатчик. Радиоприемное устройство состоит из радиоприемника, детектора и дешифратора команд. Выделенные дешифратором командные сигналы через модуль ввода-вывода поступают в устройство управления робота. С помощью таких систем возможна реализация как позиционного, так и скоростного управления приводом манипуляторов. Выбор скорости производится на пульте управления переключателями скоростных команд, а режима торможения — переключателем тормозных команд. Используемые системы кодирования сигналов обеспечивают высокую помехоустойчивость и надежность работы этих систем. Недостатком дистанционных систем с радиоканалами связи является то, что для устойчивой их работы требуется широкий диапазон радиочастот, способных обеспечить независимую связь каждого робота без перекрестных искажений и помех.

В строительстве для передачи информации при командном управлении могут применяться системы дистанционного инфракрасного управления роботом. Структурная схема такой системы представлена на рис. 5.6. Она позволяет выполнять как поочередное, так и одновременное управление несколькими приводами манипулятора. Управление осуществляется в пределах видимости на расстоянии до нескольких десятков времени. Передаваемые оператором с пульта управления команды кодируются шифратором и управляют генератором импульсов. В результате полупроводниковым излучателем передается набор импульсов, несущих информа-

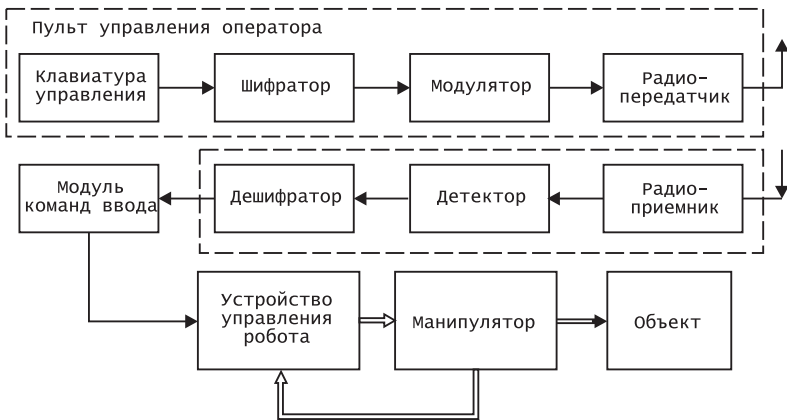


Рис. 5.5. Система радиуправления строительным роботом

цию о передаваемой команде. В качестве полупроводниковых излучателей используются инфракрасные светодиоды. Приемное устройство, установленное непосредственно на роботе, снабжается инфракрасным фотоприемником, на выходе которого размещается формирователь импульсов. Принимаемая команда распознается дешифратором и далее через модуль ввода-вывода попадает в устройство управления роботом.

Обладая такими достоинствами как простота и надежность, системы командного управления могут применяться для роботиза-

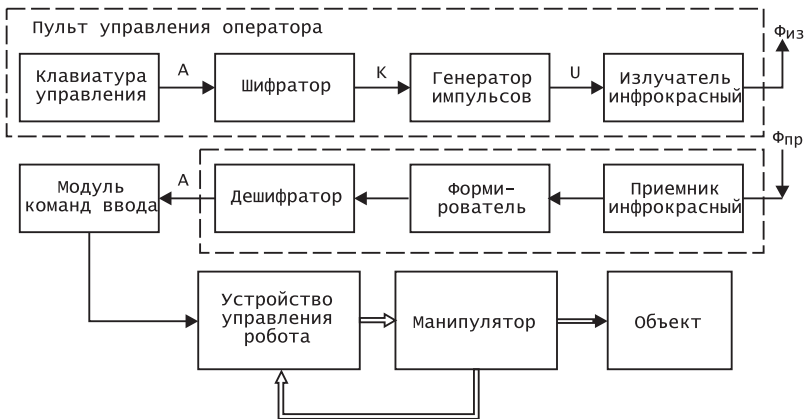


Рис. 5.6. Система дистанционного инфракрасного управления строительным роботом

ции строительных процессов, происходящих в неупорядоченной среде, организация которой невозможна или требует больших затрат ресурсов и времени. Эффективность применения командного управления в строительном производстве обусловлена еще и тем, что роботы здесь должны взаимодействовать с массивными объектами, имеющими большие габариты, у которых скорость перемещения небольшая, а точность позиционирования высокая. Вместе с тем, командное управление имеет и свои недостатки. Они заключаются в том, что управление осуществляется отдельными звеньями, в связи с чем, процесс управления затягивается и требует высоких навыков оператора по пространственному ориентированию объекта. Но каким бы пространственным воображением и навыками оператор не обладал, полностью решить задачу требуемого движения схвата ему не всегда удастся.

Для монтажных роботов интерес представляют копирующие системы дистанционного управления. Они позволяют автоматизировать процесс установки и ориентации конструкций. Характерной особенностью этих систем является использование специальных задающих устройств, а манипулятор снабжается следящими приводами с датчики обратной связи (рис. 5.7). При перемещении задающего устройства в соответствии с требуемой траекторией движения схвата все звенья исполнительного устройства манипулятора с большой точностью обрабатывают заданные движения. При такой системе оператору не нужно определять направления движения каждой степени подвижности, схват автоматически выводит в требуемую точку в соответствии с заданием. Оператор может управлять самыми сложными траекторными движениями с минимальными затратами времени. Эти системы могут снабжаться устройствами отображения информации, улучшающими обзор объекта манипулирования и окружающей его среды. Важной особенностью систем копирующего дистанционного управления является возможность получения в задающем устройстве ощущения усилия за счет дополнительной информации, поступающей от манипулятора с помощью специальных устройств. В этом случае копирующий манипулятор снабжается устройством управления двустороннего действия. Сигнал с датчиков усилия или момента приводов степеней подвижности передается в контур управления, и оператор имеет возможности не только наблюдать картину поведения манипулятора, но и чувствовать усилия, прилагаемые роботом для выполнения указаний оператора. Такое силовомоментное очув-

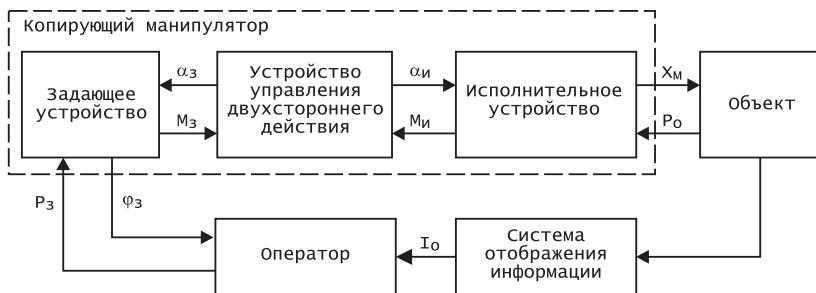


Рис. 5.7. Структурная схема системы копирующего управления манипулятором

ствление копирующих систем позволяет оператору более эффективно реагировать на изменяющиеся условия работы и организовать наиболее рациональное движение, при этом исключаются перегрузки и другие аварийные ситуации, связанные с выполнением заданного технологического процесса.

Разновидностью рассмотренных систем являются полуавтоматические системы, в которых задающим органом служит специальная управляющая рукоятка, выполненная в виде джойстика или штурвала-манипулятора и имеющая степени подвижности, позволяющие управлять перемещением и ориентацией объекта манипулирования. Оператор с ее помощью задает желаемое движение непосредственно рабочему органу. Управление выполняется на тактическом уровне в координатах схвата. Кинематическая схема рукоятки выполняется в удобном для оператора виде независимо от кинематической схемы исполнительного органа и обеспечивает задание необходимого числа подвижностей. Структурная схема полуавтоматической системы показана на рис. 5.8. Оператор соответствующим движением рукоятки через датчики задает сигнал необходимого направления движения схвата и его повороты, а микропроцессорное устройство управления запоминает движения задающего органа и на их основе формирует управления по степеням подвижности. Поскольку в такой системе дистанционное управление выполняется, как правило, со стационарного пульта управления, то наличие отражения информации на дисплее по телеканалам связи является обязательным.

В полуавтоматических дистанционных системах существуют различные способы управления: позиционный, скоростной и силовой [11]. Позиционный способ полуавтоматического управле-

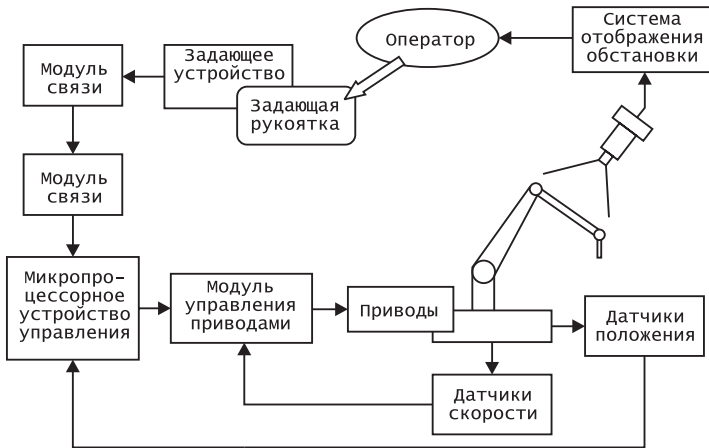


Рис. 5.8. Полуавтоматическое управление манипулятором

ния заключается в том, что оператор с помощью задающих рукояток управляет движением схвата по желаемой траектории и его поворотами. По заданным сигналам микропроцессорное устройство управления вычисляет направление и величину перемещения и формирует команды на приводы степеней подвижности. Такое управление обеспечивает высокую точность позиционирования. Оно эффективно в строительных роботах, обеспечивающих сборочные строительные работы, а также укладку строительных конструкций и материалов.

Скоростной способ управления заключается в том, что оператор движением рукоятки кроме направления движения схвата задает и вектор скорости его перемещения. С этой целью кинематические звенья рукоятки выполняются подпружиненными. При этом направление вектора скорости схвата задается направлением движения рукоятки, а величина скорости — нажимом на нее или значением смещения. На основе этой информации устройство управления вычисляет скорости движения приводов степеней подвижности манипулятора, обеспечивающие заданную скорость перемещения. Таким же образом формируются угловые скорости. Такое управление эффективно для управления бетоноукладочными и монтажными роботами, а также может использоваться при выполнении транспортных и др. операций, в которых первостепенное значение имеет скорость перемещения при невысокой точности позиционирования.

Силовой способ полуавтоматического управления заключается в том, что оператор с помощью рукоятки управления задает направление и величину вектора силы (момента), необходимые при осуществлении роботом технологической операции. Управляющее устройство по полученным сигналам вычисляет и распределяет по приводам степеней подвижности команды для формирования звеньями заданного усилия на схвате. Этот способ целесообразно применять в процессе контакта рабочего органа с объектами манипулирования. Он эффективен для строительных роботов, выполняющих штукатурные и другие отделочные работы, при которых существенную роль играет величина силового прижатия рабочего инструмента к поверхности. Вместе с тем следует отметить, что такое управление снижает точность позиционирования рабочего органа, так как вектор силы, задаваемый оператором, не всегда совпадает с вектором скорости необходимого движения схвата. На рис. 5.9 приведена структурная схема системы моментно-скоростного управления, которая может быть использована для управления роботами, предназначенными для позиционирования строительных конструкций в процессе их установки и закрепления.

Интерактивные системы управления представляют человеко-машинные системы, осуществляющие взаимодействие оператора с автоматическим роботом. Появление интерактивных систем обусловлено тем, что, с одной стороны, выполнение всех операций оператором в эргатической системе утомительно, а с другой стороны, в недетерминированной среде строительных объектов

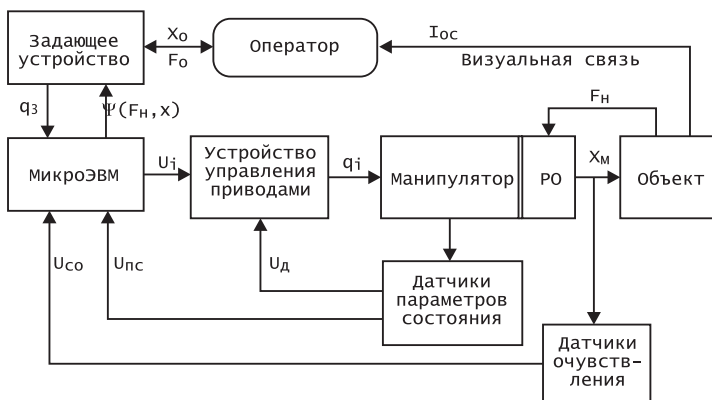


Рис. 5.9. Системы моментно-скоростного управления роботом

функционирование автономных роботов даже с адаптивной системой управления невозможно без участия человека. Поэтому возникает необходимость сочетания автоматического и дистанционного управления роботами и приспособление автоматически действующего робота к изменяющейся рабочей среде. Это достигается за счет возможности оператора вмешиваться в управление роботом, автономно функционирующим в окружающей среде. Оператор, участвующий в контуре управления, обеспечивает корректировку функционирования робота при возникновении нестандартных ситуаций. Различают интерактивные системы: автоматизированные, супервизорные и диалоговые. Для строительства наибольший интерес представляют строительные роботы с супервизорным управлением. Такого рода роботы представляют собой эргатические системы, в которых задаваемые роботу сложные действия выполняются им не полностью автономно, с частичным участием оператора. При супервизорном управлении оператор взаимодействует с роботом на уровне проблемно-ориентированного языка. Системы супервизорного управления обрабатывают в реальном времени командную информацию, а также информацию о состоянии внешней среды и о состоянии робота, и на основе обработанной информации планируют поведение рабочего органа [24]. При таком управлении запланированные заранее операции выполняются автоматически по заданным программам, а операции, возникшие в результате складывающихся непредвиденных ситуаций, осуществляются по указанию оператора. Оператор непрерывно контролирует процесс выполнения роботом команд-директив и в случае необходимости, при возникновении непредвиденных или аварийных ситуаций, непосредственно вмешивается в процесс управления роботом, осуществляя переключение автоматических режимов работы. Системы супервизорного управления имеют развитую информационно-измерительную систему, способную контролировать внешнюю среду и формировать на мониторе в реальном времени ее трех- и двухмерные представления в удобном для оператора виде (рис. 5.10). Набор разнообразных сенсорных устройств позволяет роботу в автоматическом режиме выполнять большой объем управляющих команд различной степени сложности.

Процесс супервизорного управления рассмотрим на примере эргатической системы, предназначенной для выполнения монтажных операций (рис. 5.11). Взаимодействие оператора с системой



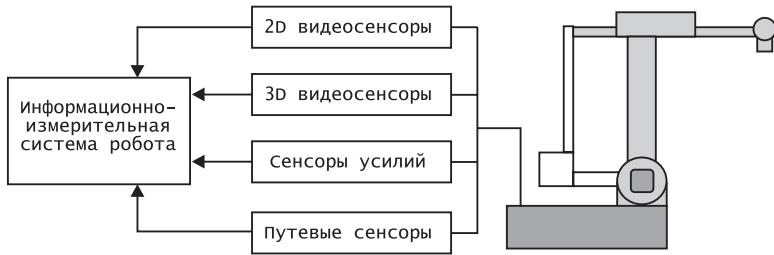


Рис. 5.10. Сенсорные средства контроля интерактивных роботов

управления робота происходит с командного устройства, выполненного на базе промышленного компьютера. На монитор командного устройства выводится информация о внешней среде и текущем положении робота, а также о параметрах его состояния. Общение оператора с системой происходит на стратегическом уровне управления с помощью проблемно-ориентированного языка. Оператор, наблюдая с помощью монитора за ходом выполнения установочных и ориентирующих операций, принимает решения по управлению и выдает директивы управляющей микроЭВМ. Директива выбирается из библиотеки директив и может быть скорректирована в соответствии с целями и сложившейся ситуацией, а в случае отсутствия таковой в библиотеке она составляется на проблемно-ориентированном языке.

Диалоговое управление предусматривает использование компьютерных технологий для управления. Общение оператора с робо-

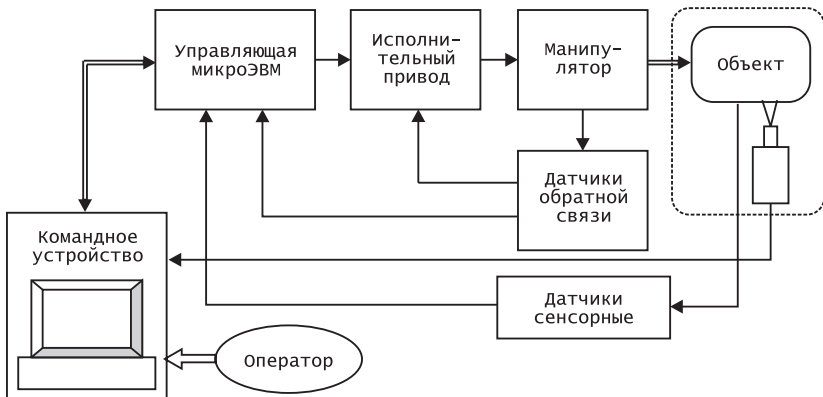


Рис. 5.11. Супервизорное управление роботом для выполнения монтажных операций

том осуществляется через ЭВМ на проблемно-ориентированном или естественном языке. Запланированные операции, как и в предыдущих случаях, выполняются автоматически, а незапланированные — по указаниям оператора. При этом планирование новых операций и их выполнение осуществляются свободно в активном взаимодействии человека и компьютера. Такие системы позволяют формировать роботу незапланированные действия при решении задач в экспериментальных условиях недетерминированной среды.

### **5.3. Системы программного управления роботами**

Программное управление роботом осуществляет автоматическое выполнение заданной программы. Все операции по перемещению звеньев манипулятора и движению схвата выполняются в соответствии с командами управляющей программы. Программа должна содержать всю совокупность команд, определяющих последовательность отработки всех движений для перемещения рабочего органа робота в пространстве и времени, ориентацию перемещаемого предмета или инструмента в пространстве, скорости его перемещения, а также взаимодействие с технологическим оборудованием. Управляющие программы составляются на основе предписания, характеризующего содержание и последовательность выполнения операций, которое служит алгоритмом управления. Алгоритм составляется на основе технологического процесса [20].

Системы программного управления делятся на разомкнутые и замкнутые. В разомкнутых системах отсутствует входная информация о фактическом состоянии управляемой исполнительской системы робота и технологического оборудования, с которым он взаимодействует. В связи с этим, изменение условий технологического процесса, технических характеристик робота и системы управления приводит к изменению таких характеристик позиционирования робота, как точность, время отработки движений и др. В замкнутых системах информация о действительном состоянии робота поступает с датчиков в устройство управления и используется для сравнения заданного и фактического состояния робота. Различают следующие виды программного управления роботами: цикловое, позиционное и контурное.

Цикловые системы программного управления осуществляют автоматическое позиционирование манипулятора по упорам координат манипулятора. Принцип циклового управления роботами заключается в выполнении запрограммированной последовательности позиционирования манипулятора по упорам. Характерными особенностями циклового управления являются: программирование логической и технологической информации дискретного вида, определяющей последовательность движения звеньев манипулятора, работы технологического оборудования и задание технологических выдержек времени; управление по разомкнутому циклу; выделение информации о перемещениях по отдельным степеням подвижности с датчиков положения; сравнение заданного и фактического положения звеньев. Они являются простейшими системами программного управления и обеспечивают ограниченное позиционирование. Различают два способа циклового управления: в функции пути и функции времени. При управлении в функции пути управляющая программа задает последовательность движения звеньев манипулятора, а исполнение каждой команды контролируется датчиками положения, располагаемыми в крайних положениях каждой степени подвижности. Управление в функции времени в качестве программных сигналов использует временные импульсы. В этом случае через определенные программируемые интервалы времени формируются тактовые импульсы.

В общем случае структура цикловой системы управления (ЦСУ) содержит микроконтроллер, модули ввода дискретной информации с датчиков положения звеньев и датчиков технологического оборудования; модули ввода управляющих сигналов на приводы манипулятора и технологическое оборудование; программируемый таймер для задания технологических выдержек времени (рис. 5.12). Программное обеспечение ЦСУ, включает монитор, интерпретатор команд, программу самотестирования и драйверы каналов ввода-вывода и последовательного интерфейса, программные модули обслуживания клавиатуры и дисплея. В этих системах обязательно предусматривается возможность связи с управляющей ЭВМ верхнего уровня, которая обычно выполняется через последовательный интерфейс. Один из каналов этого интерфейса используется для подключения внешней памяти, используемой для быстрого введения управляющих программ. В устройствах циклового управления предусматривается несколько режимов работы: автоматический, ручной, пошаговый, ввода программ, про-

смотрa программ. Управляющие программы состояются набором шестнадцатеричных кодов операций и содержит последовательность команд управления перемещением звеньев манипулятора, управления технологическим оборудованием, считывания состояния датчиков положения звеньев манипулятора и технологического оборудования, формирования необходимых выдержек времени. Кроме того, системой команд предусматривается возможность условного и безусловного ветвления программы. Описание функционирования цикловых роботов в составе технологических комплексов удобно выполнять на основе методов теории конечных автоматов, используя диаграммы состояний или графы перехода состояний. Наглядное моделирование процесса циклового управления получается с помощью графа состояний, у которого узлы характеризуют состояния, а ветви указывают на соответствующие переходы, из одного состояния в другое.

Использование роботов с цикловым управлением в строительстве имеет ограниченные перспективы. В основном они могут найти применение на предприятиях строительной индустрии для обслуживания технологического оборудования и транспортно-накопительных систем и перегрузочных пунктов.

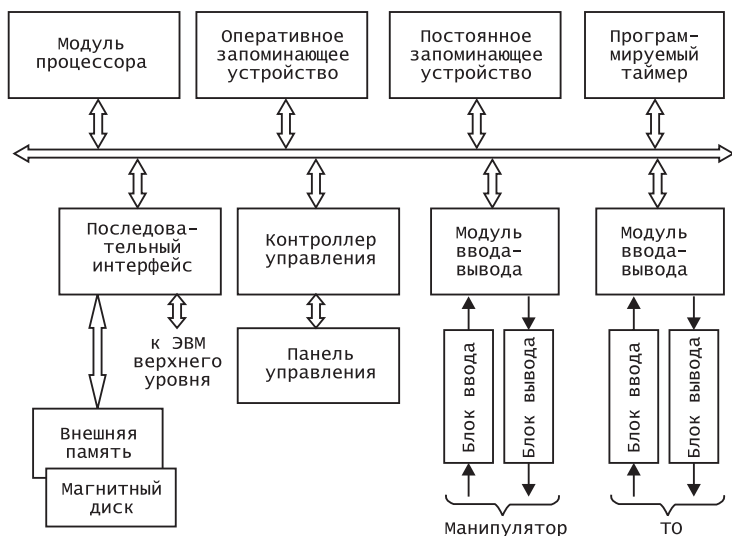


Рис. 5.12. Структурная схема системы циклового управления роботом

Позиционные системы программного управления управляют исполнительным устройством промышленного робота таким образом, что движение его рабочего органа происходит по заданным точкам позиционирования без контроля движения между ними. В отличие от цикловых систем они имеют большое число точек позиционирования. Отсутствие ограничений точек позиционирования значительно расширяет область применения программных роботов с таким управлением. Эти системы имеют расширенные информационно-преобразовательные и вычислительные функции для получения эффективного и надежного управления. Одним из факторов, способствующих такому управлению, является применение следящих или шаговых приводов, которые обеспечивают перемещение исполнительного органа на заданную величину. В зависимости от способа обработки информации различают централизованные и децентрализованные структуры позиционных систем. В централизованных структурах вся обработка информации выполняется одним вычислительным устройством в режиме разделения времени, а в децентрализованных структурах происходит параллельная обработка информации на индивидуальных процессорах каждой степени подвижности. Главными требованиями при позиционном управлении являются обеспечение быстрого и плавного подхода к заданному положению и получение требуемой точности останова в заданной точке. Первое из этих требований предусматривает движение механизма на максимально допустимой скорости, которая по мере приближения к заданной точке должна уменьшаться. Это осуществимо при использовании для управления приводами тахограммы (рис. 5.13), у которой разгон выполняется с постоянным ускорением  $\alpha_p$ , отработка основного участка пути проходит на максимальной скорости  $\omega^*$ , а торможение также осуществляется с постоянным ускорением. При таком алгоритме полное приращение угла поворота привода составит:

$$\Delta\varphi = |\varphi_k - \varphi_0| = \frac{(\omega^*)^2}{2\alpha_p} + \omega^*(t_o - t_p) - \frac{(\omega^*)^2}{2\alpha_m}$$

Несмотря на простоту аппаратной и программной реализации позиционных систем управления, они имеют ограниченное применение и при роботизации процессов в строительстве могут быть востребованы лишь на предприятиях стройиндустрии.

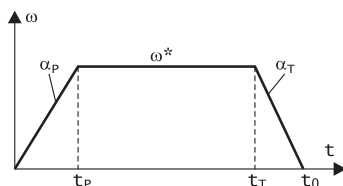


Рис. 5.13. Тахограмма работы приводов позиционных систем

Контурные системы программного управления перемещают рабочий орган промышленного робота по заданной траектории с установленным распределением во времени значений скорости. В рассмотренных системах циклового и позиционного управления главным условием функционирования является обеспечение перемещения схвата в заданные точки рабочего пространства с определенной имитацией перемещения деталей без учета характера траектории. В контурных системах движение манипулятора обеспечивается по непрерывной траектории с заданной скоростью и с сохранением требуемой ориентации рабочего инструмента или схвата в каждой точке траектории. Это позволяет роботу выполнять технологические процессы, которые определяют непрерывность траектории, такие, как окраска, малярные работы, непрерывная сварка строительных конструкций, окраска окон, монтаж конструкций и др. Специфика работы контурных систем, заключается в обеспечении синхронной отработки звеньями манипулятора заданной непрерывной траектории. Это определяет аппаратную и программную структуру контурных систем управления. Основными функциями контурного управления являются хранение программных траекторий, планирование движений по этим траекториям, формирование управляющих воздействий для приводов, обеспечивающих отслеживание схватом заданной траектории с необходимой точностью.

Структура контурных систем управления обычно имеет двухуровневую организацию (рис. 5.14). Верхний уровень реализуется на базе центрального процессора. Аппаратная часть этого уровня содержит память (ОЗУ, ПЗУ), интерфейс связи с периферийными устройствами и модуль связи с устройствами исполнительного уровня.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) осуществляет хранение системного программного обеспечения, программ самоконтроля системы управления, библиотеки прикладных подпрог-

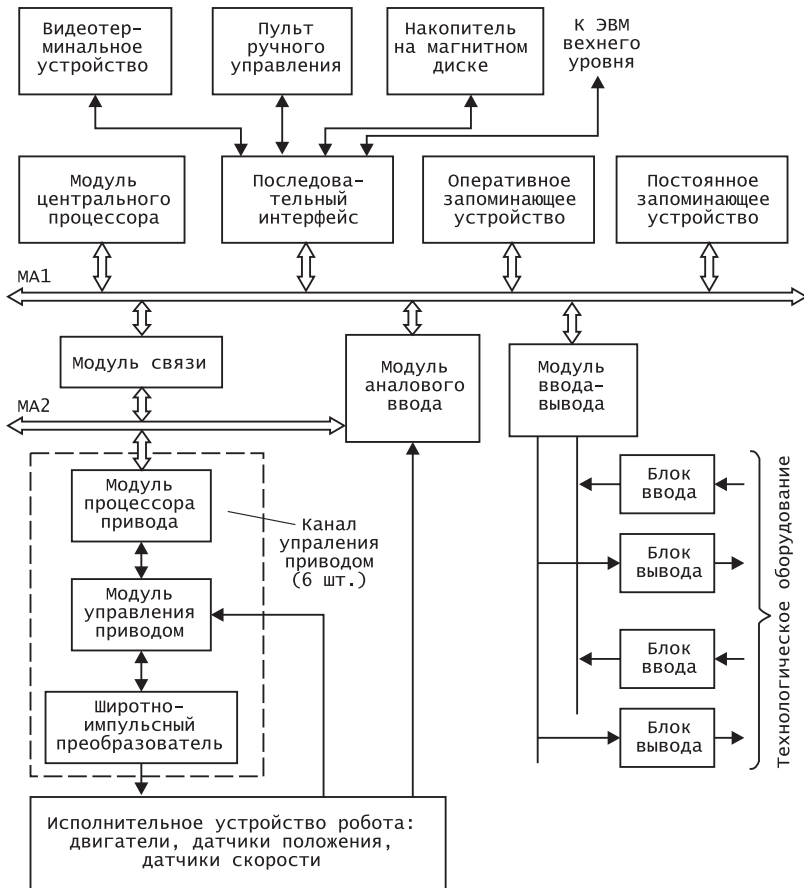


Рис. 5.14. Структурная схема системы контурного управления роботом

рамм, реализующих командные управления, а также основных параметров робота. В модуле оперативной памяти (ОЗУ) хранится управляющая программа, результаты промежуточных вычислений, параметры текущего состояния робота. В состав системы входит программируемый таймер, с помощью которого формируются временные выдержки.

Для связи с периферийными устройствами обычно используют последовательный интерфейс, через который к внутренней шине верхнего уровня подключаются:

- видеотерминальное устройство для общения оператора с системой;
- пульт ручного управления, используемый для ручного управления манипулятором и задания точек траектории движения методом обучения;
- накопитель на магнитном диске для записи и считывания управляющих программ и хранения диагностических тестов.

Последовательный интерфейс также позволяет обеспечить связь системы с управляющей системой верхнего уровня управления.

Центральный процессор верхнего уровня решает тактические задачи управления роботом:

- интерпретацию операторов управляющей программы;
- сбор и обработку информации с датчиков приводов манипулятора;
- представление измеряемых и управляющих параметров в различных системах координат;
- интерполяцию и формирование управляющих воздействий для исполнительного уровня управления;
- обмен осведомительной и управляющей информацией с ЭВМ верхнего уровня;
- обеспечение диалогового режима между оператором и системой управления;
- отображение необходимой информации на дисплее;
- обеспечение режима ручного управления манипулятором;
- редактирование управляющих программ.

Нижний уровень управления образуют каналы управления приводами, число которых соответствует числу степеней подвижности. Основными задачами этого уровня являются: формирование требуемого закона регулирования привода; отработка заданных параметров управления; расчет действительных значений положения и скорости привода по показаниям импульсных датчиков; контроль предельно-допустимых значений параметров привода и выдача сигналов на верхний уровень об аварийных ситуациях. Каждый канал управления представляет следящий привод с обратными связями, который удобно выполнять на базе однокристалльных микроЭВМ. В случае использования приводов постоянного тока выходные модули каналов управления представляют широтно-импульсные преобразователи. В связи большим числом каналов управления исполнительного уровня, их связь с шиной цент-



рального процессора следует выполнять через модуль связи, расширяющей ее нагрузочную способность. Обмен информацией между центральным процессором и процессорами приводов выполняется в режиме прямого доступа к памяти. Рассчитанные на верхнем уровне значения скорости и положения передаются на модули процессоров приводов, которые в зависимости от значения от разности значений текущих и запрограммированных величин определяют направление и скорость вращения приводов.

Системы контурного управления снабжаются модулями ввода-вывода, через которые подаются управляющие команды на технологическое оборудование и считывается информация с управляющего устройства оборудования о его состоянии и положении отдельных органов. Как правило, модули ввода-вывода снабжаются дополнительными блоками ввода и вывода, которые обеспечивают оптическую развязку цепей и необходимые входные и выходные параметры.

Контурное управление поддерживается набором алгоритмов и реализующих их программ. Для строительных роботов с контурным управлением основными алгоритмами этого набора являются:

- алгоритмы решения кинематических задач о положениях и скоростях;
- алгоритмы считывания и обработки информации датчиков положения;
- алгоритмы линейной, круговой и кубической интерполяции;
- алгоритмы управления перемещением манипулятора в заданную точку;
- алгоритмы управления траекторным движением манипулятора;
- алгоритмы определения и переопределения точек позиционирования;
- алгоритмы преобразования систем координат;
- алгоритмы управления перемещением манипулятора в базовой системе координат или системе координат схвата.

Алгоритмы решения кинематических задач обеспечивают расчет положения и ориентации схвата на основании текущей информации о положениях и скоростях перемещения степеней подвижности манипулятора. Положение и ориентация схвата вычисляются на базе соотношений, связывающих их с обобщенными координатами:

$$[x_c, y_c, z_c]^T = F_1[u(q_1), u(q_2), \dots, u(q_6)],$$

$$[\varphi_c, \psi_c, \theta_c]^T = F_2[u(q_1), u(q_2), \dots, u(q_6)],$$

где  $u(q_1), u(q_2), \dots, u(q_6)$  — масштабированные значения обобщенных координат, полученные на основании считывания информации датчиков.

Скорость перемещения схвата в проекциях на координатные оси базовой системы координат  $X_0Y_0Z_0$  вычисляется через обобщенные скорости степеней подвижности:

$$[v_x, v_y, v_z]^T = F_3[u(\dot{q}_1), u(\dot{q}_2), \dots, u(\dot{q}_6)],$$

на основании которых определяется модуль скорости движения схвата

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

В контурных системах управления в качестве датчиков положения звеньев манипулятора обычно используются инкрементные фотоэлектрические датчики, обладающие высокой надежностью, достаточной точностью и относительно простой конструкцией. В этом случае алгоритмы считывания и обработки информации датчиков положения обеспечивают периодический опрос датчиков степеней подвижности, запись полученной информации в таблицу не декодированных значений, расчет абсолютных значений обобщенных координат, запись полученных значений в таблицу абсолютных значений координат.

Интерполяционные алгоритмы выполняют планирование движений между точками траектории на основе использования соотношений линейной, круговой или кубической интерполяции [37]. Алгоритмы управления перемещением схвата в заданную точку и управления траекторным его движением служат для реализации командных движений манипулятора. Они позволяют на основе заданных векторов координат начальной и конечной точек выполнить заданное командой движение по прямолинейной траектории или с интерполяцией.

В контурные системы управления включаются алгоритмы определения и переопределения точек позиционирования, основное назначение которых запоминать текущее положение манипулятора, задавать массив точек в режиме ручного управления, просматривать значения координат точек, хранящихся в памяти устройства управления, корректировать значения точек и записывать новые значения. Алгоритмы преобразования систем координат

позволяют преобразовывать параметры точек из одной системы координат в другую, просматривать и использовать при управлении точки позиционирования в обобщенных координатах, базовой системе координат или в системе координат схвата.

Подготовка управляющих программ контурных систем управления выполняется на робото-ориентированном или объектно-ориентированном языке программирования. При использовании робото-ориентированных языков программирования роботов с контурным управлением, описание движений рабочего органа выполняется путем задания опорных точек траектории и модуля траекторной скорости. При этом имеется возможность применения нескольких видов траекторной интерполяции, обычно линейной, круговой и кубическими сплайнами. В случае применения объектно-ориентированных языков программирования появляется возможность описывать точки пространства в виде фреймов, учитывающих не только их координаты, но и ориентацию в этих точках. Кроме того, они позволяют использовать векторное представление величин. Объектно-ориентированные языки удобны для программирования монтажных роботов и технологических роботов в стройиндустрии. Основу программного обеспечения контурных систем управления строительных роботов составляет операционная система реального времени. В состав системного программного обеспечения таких систем входит набор программ, составляющий систему подготовки управляющих программ. В него включаются интерпретатор языка, редактор, отладчик и загрузчик программ. Системное обеспечение контурных роботов содержит также служебные и сервисные программы и библиотеку прикладных подпрограмм.

## **5.4. Адаптивное управление роботами**

Рассмотренный класс программных роботов не чувствителен к неопределенности и изменениям внешней среды и технологического процесса. Неопределенность функционирования робота в окружающей среде зависит от изменяющихся параметров среды, параметров объектов манипулирования, геометрических параметров рабочей зоны, погрешностей, возникающих из-за изменения состояния робота или появляющихся в информационных и управляющих каналах. В строительстве таких примеров очень много.

При установке и перегрузке строительных конструкций (балок, перекрытий, стеновых панелей и др.) роботами с программным управлением должно быть жестко регламентировано их положение, что требует дополнительных затрат времени и труда. Если робот сможет различать, в каком положении находятся конструкции и детали, требования к их упорядочению значительно снизятся и соответственно уменьшатся связанные с этим непроизводительные затраты. Такая же ситуация возникает при окраске различных конструкций с изменяющейся формой. В других случаях роботы должны ориентироваться в окружающей обстановке и обходить всевозможные препятствия в рабочей зоне. Организация внешних условий для программного робота занимает не меньше времени и труда, чем выполнение процессов вручную, и тогда такой робот становится неэффективным для использования.

С целью расширения возможностей программных роботов применяют адаптивные системы управления, позволяющие использовать их в неупорядоченной среде, с изменяющейся окружающей обстановкой или в неупорядоченных технологических процессах, когда жесткие программы не могут обеспечить правильное и четкое их функционирование. В таких случаях роботы должны сами приспосабливаться к окружающей обстановке и изменениям технологического процесса. Реакция адаптивных роботов на внешние изменения обеспечивается техническими средствами, способными выдавать информацию о состоянии окружающей среды. Одной из задач очувствления роботов является снижение объема необходимой предварительной информации, позволяющей выполнить основные операции по заданной программе, поэтому такие роботы в отличие от программных имеют более развитую информационную систему. Кроме информации о внутреннем состоянии робота, которая обеспечивается датчиками перемещения и скорости, необходима внешняя информация о состоянии окружающей среды и технологического процесса, которая обеспечивается датчиками внешней информации.

Построение систем адаптивного управления определяется уровнем и используемыми методами адаптации [19]. В системах управления роботами элементы адаптивного управления могут вводиться на различных уровнях. На исполнительном уровне в регуляторах приводов монтажных и бетоноукладочных целесообразно применять адаптивную подстройку коэффициентов закона регулирования в зависимости от величины нагрузки на привод положе-

ния звеньев манипулятора и скорости их движения. Учитывая тенденцию развития управляющих систем, следует отметить, что при построении адаптивных систем предпочтение следует отдавать многопроцессорным устройствам, у которых регуляторы приводов реализуются на процессорных модулях. В этом случае используемые алгоритмы адаптации реализуются программным путем [38]. На рис. 5.15 в качестве примера представлена структурная схема устройства адаптивного управления приводом постоянного тока монтажного робота. Для его построения использован стандартный привод с широтно-импульсным преобразователем и с обратными связями по положению ( $\alpha$ ) и скорости ( $\omega$ ). Для измерения усилий и моментов, действующих на приводы звеньев манипулятора используется косвенный способ их измерения по величине возникающих деформаций  $\sigma$ . Модуль процессора, кроме формирования закона ПИД-регулирования, обеспечивает реализацию адаптивной настройки коэффициентов регулятора. С этой целью в состав математического и программного обеспечения процессора привода включены модули расчета параметра адаптации  $\tau = I(\alpha, \omega, \sigma)$  и коэффициентов настройки  $k_i(\tau)$ . Расчет параметра адаптации выполняется на основе текущих значений положения  $\alpha$ , скорости  $\omega$ , деформации  $\sigma$  и с учетом возникшей ошибки позиционирования

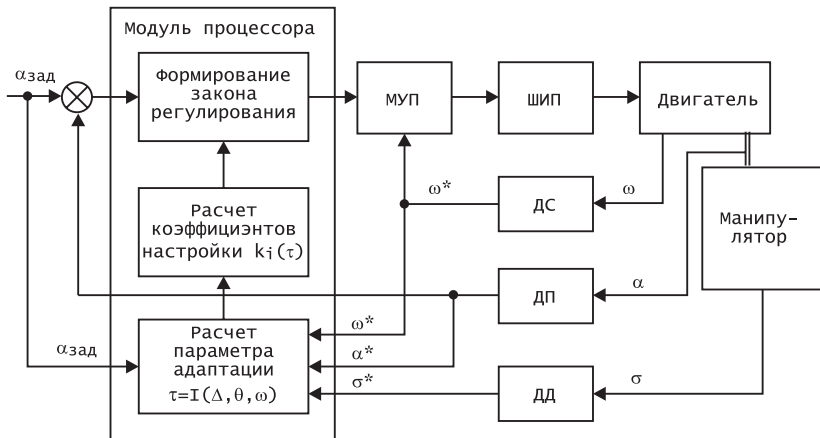


Рис. 5.15. Устройство адаптивного управления приводом робота  
 МУП — модуль управления приводом; ШИП — широтно-импульсный преобразователь; ДС — датчик скорости; ДП — датчик перемещения; ДД — датчик деформаций (усилий)

$\Delta\alpha = \alpha_{зад} - \alpha$ . Его расчет проводится с помощью оценочной функции  $I$ , для каждого шага движения.

В нестационарных условиях с неопределенностью законы программного управления во многих случаях оказываются малоэффективными. Это связано с возможностью появления неконтролируемых возмущений, влияние которых в сочетании с постоянно действующими возмущениями может привести к нежелательным динамическим эффектам и снижению точности отработки движений. Корректировка траектории перемещения инструмента с учетом информации, получаемой с сенсорных датчиков или силового очувствления робота, выполняется средствами адаптивного управления на тактическом уровне [16]. В этом случае система адаптивного управления роботом представляет многопроцессорное двухуровневое устройство, у которого приводы исполнительного уровня обрабатывают задаваемые верхним уровнем скорости движения. На рис. 5.16 представлена структурная схема системы адаптивного управления, предназначенная для работы в условиях действия неконтролируемых возмущений.

На этой схеме исполнительный уровень управления представлен набором следящих приводов с обратными связями по положению и скорости. Управляющая ЭВМ тактического уровня, кроме решения задач планирования движений и разделения их на составляющие движения звеньев, выполняет оценку ошибок движения и формирует вектор корректирующих параметров, который используется при построении составляющих траектории движения. Оценка ошибок движения производится с использова-

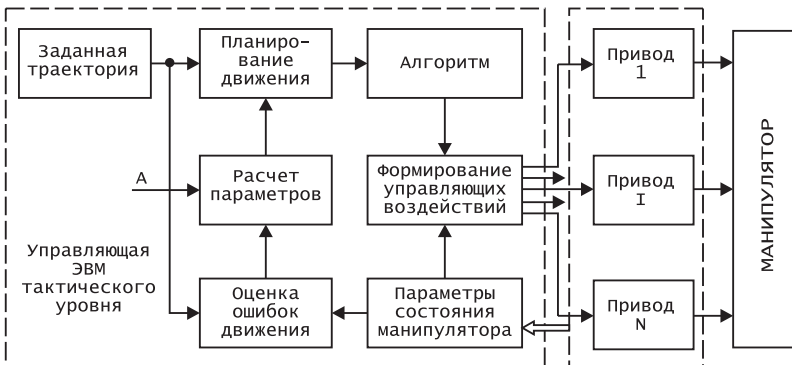


Рис. 5. 16. Адаптивное управление роботом на тактическом уровне

нием кинематической модели по результатам измерения обобщенных координат. Текущее состояние манипулятора представляется в виде таблицы состояния, которая также используется при формировании управляющих воздействий для исполнительного уровня, обеспечивая реализацию глобальной обратной связи на тактическом уровне. В рассмотренной структуре управление осуществляется на основе кинематических алгоритмов, что связано с простотой их реализации. Для роботов, обладающих большими инерционными массами, предпочтение следует отдавать динамическим управляющим алгоритмам. Для адаптации робота к условиям рабочего пространства используется корректировка траектории перемещения инструмента на основе информации, получаемой с сенсорных датчиков. В этом случае рассмотренная структура должна быть дополнена информационно-измерительным модулем, обеспечивающим сбор, обработку и хранение информации о рабочей среде. Сбор такой информации выполняется с помощью сенсорных датчиков, а ее обработка ведется с помощью логических неравенств и построения таблицы состояния, в которой отображается текущее состояние сенсоров. На основе этой таблицы выполняется эффекторный анализ, результаты ( $A$ ) которого используются при расчете параметров адаптации. Описанный принцип построения адаптивных систем управления можно успешно использовать в монтажных роботах при автоматизации процесса установки деталей. Наличие развитых средств очувствления и алгоритмов, обеспечивающих корректировку параметров планирования движений и законов управления исполнительными устройствами, позволяет автоматизировать многие строительные операции.

При работе строительных роботов в недетерминированных средах возникает проблема обхода препятствий, исключения столкновений объекта манипулирования с внешними препятствиями. Решение таких задач возможно с помощью систем управления с адаптацией на стратегическом уровне, которые позволяют прогнозировать движение и осуществлять выбор его направления, обеспечивающего обход препятствий и достижение цели. Эти системы имеют развитую сенсорную подсистему, информация которой используется для формирования модели внешней среды. Учитывая необходимость обработки большого объема информации за один шаг управления, реализация стратегического уровня управления производится на отдельной ЭВМ. Структура этого уровня включа-

ет модель внешней среды, подсистему отображения, подсистему эффекторного анализа и подсистему принятия решений (рис. 5.17). На каждом шаге управления с помощью сенсорных средств контроля производится корректировка модели среды, в которой функционирует робот и выполняется анализ отображающей структуры. Для построения программы будущих движений осуществляется прогнозирование поведения робота на основе информации о текущей ситуации во внешней среде, поступающей с модели, и цели функционирования, определяемой программным заданием. Прогнозирование поведения робота включает анализ отображающей структуры, определение наличия случайных препятствий на траектории движения, афферентный синтез возможных направлений движения [49]. При выполнении афферентного синтеза используется не только текущая информация о состоянии среды и объекта, но также информация, полученная на предыдущих шагах управления. Программа принятия решений обеспечивает выбор наилучшего набора траекторного движения для обхода препятствия или группы препятствий, на основе которого формируются таблицы опорных точек траекторий движения. Такая структура управляющего устройства придает ему определенные интеллектуальные свойства.

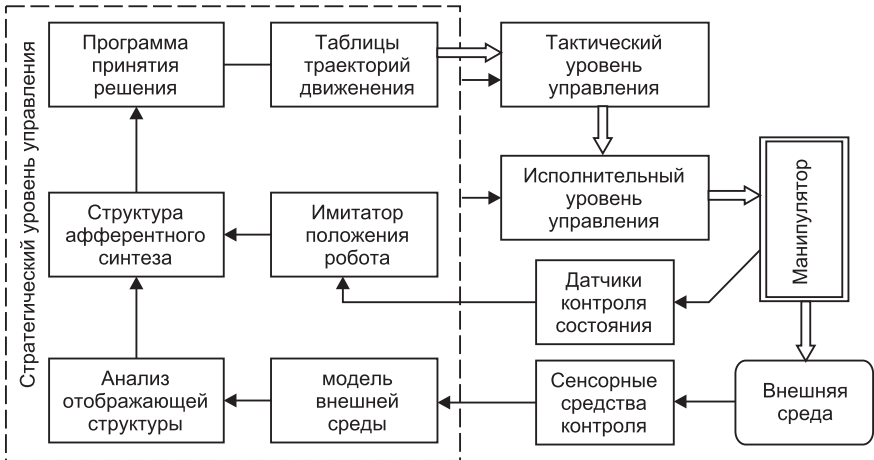


Рис. 5. 17. Адаптивное управление роботом на стратегическом уровне



## 5.5. Логическое управление робототехническими комплексами

Взаимодействие робота с технологическим оборудованием требует общей организации управления. Такое управление осуществляется системами логического управления, в задачу которых входит синхронизация действий управляемых объектов, управления их работой в строгом соответствии с технологической последовательностью выполняемых операций, обеспечение необходимых выдержек времени между отдельными операциями. Такая задача актуальна для управления робототехническими комплексами для монтажных, отделочных, бетоноукладочных, свайных и др. работ на строительных площадках. Задачи логического управления приходится решать также при роботизации процессов на предприятиях строительной индустрии. Например, при роботизации монтажных работ необходимо предусматривать управление несколькими автономно действующими роботами или башенным краном, позиционирующим роботом, автоматизированными траверсами и другим технологическим оборудованием. При этом в задачи логического управления входит согласование работы отдельных роботов при различных ограничениях их движений, согласование действий робота, крана и обслуживающего оборудования. При управлении работой отделочных комплексов, системой логического управления решаются задачи согласование работы робота с технологическим оборудованием, оперативный контроль состояния оборудования. На предприятиях стройиндустрии в функции этих систем входит согласование взаимодействия роботов и технологических машин, распределение по времени энергопотребления оборудования с целью минимизации затрат энергии.

В общем случае, логическое управление выполняется на основе логического автомата, который легко реализуется на базе микроконтроллера. На рис. 5.18 представлена структура системы логического управления, основу которой составляет микроконтроллер, включающий процессор и память. В состав системы обязательно включается программируемый таймер для формирования выдержек времени между программируемыми командами. Многоканальный параллельный интерфейс позволяет вести обмен информацией с системами управления технологическим оборудованием и устройством логического управления РТК. При этом могут использоваться как проводные каналы связи (ПК), так и радиоканалы

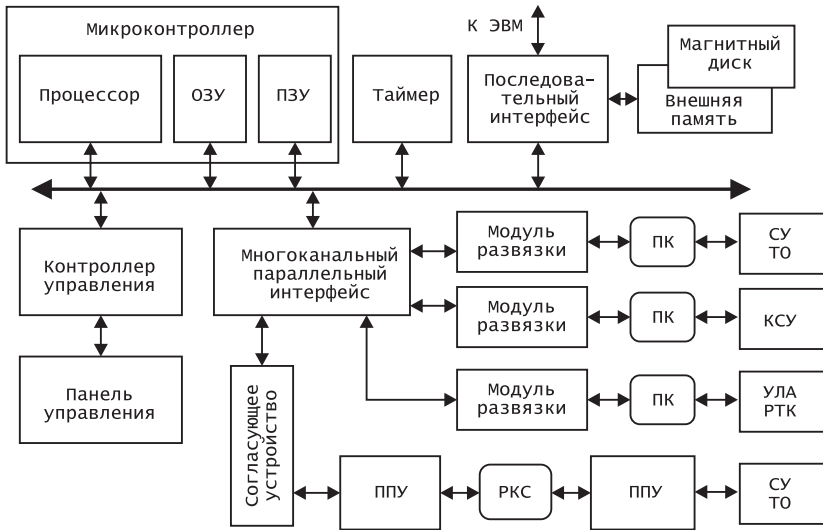


Рис. 5.18. Система логического управления робототехническим комплексом

*ПК — проводной канал; РКС — радиоканал связи; ППУ — приемно-передающее устройство; СУ ТО — система управления технологическим оборудованием; КСУ — контурная система управления робота; УЛА РТК — устройство логического управления робототехническим комплексом*

связи (РКС). Обмен информацией осуществляется через модули развязки, обеспечивающие согласование уровней сигналов и гальваническую развязку цепей. Для связи системы с управляющей ЭВМ верхнего уровня используется последовательный интерфейс. Построение таких систем выполняется на базе типовых промышленных модулей. При большом объеме связей и частой смене программ системы логического управления снабжаются внешней памятью на магнитных дисках. Это позволяет проводить подготовку программ вне строительных площадок.

Алгоритмы логического управления составляются с использованием уравнений алгебры логики на основе использования циклограмм технологического процесса. Для выделения совокупности функциональных задач и установления одновременности использования программно-аппаратных ресурсов системы выполняется формализация логической структуры РТК [17]. Формализацию структуры удобно решать с помощью сетей Петри. Применение се-

тей Петри позволяет отобразить асинхронные параллельные процессы выполнения функциональных задач и их иерархическую структуру. В общем случае сеть Петри представляет ориентированный двухдольный мультиграф, который определяется набором вида  $S = \{P, T, I, O, \mu\}$ , где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  — множество позиций,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  — множество переходов,  $I$  и  $O$  — множество входных и выходных функций,  $\mu$  — множество маркеров. Входные и выходные функции представляют собой отображения переходов в комплекты соответственно входных и выходных позиций:  $I: T \rightarrow P^\infty$ ,  $O: T \rightarrow P^\infty$ . Набор этих множеств позволяет однозначно описать сеть Петри и на его основе можно построить граф, отображающий описанное состояние системы. Набор маркированных сетей, составленных для различных моментов времени, позволяет провести анализ функционирования моделируемой системы. Динамика в модель вносится механизмом смены маркировки позиций и соглашением о правиле срабатывания переходов. В качестве примера на рис. 5.19 приведена сеть Петри, моделирующая функционирование захватного устройства монтажного робота.

Позиции  $P_1$  и  $P_6$  отражают поступление команд управления устройством:  $P_1$  — команда «сжать»,  $P_6$  — команда «разжать». Позиции  $P_3$  и  $P_4$  соответствуют переходу (движению) захватного устройства из одного состояния в другое, а позиции  $P_2$  и  $P_5$  отображают положение устройства после выполнения команды, которое контролируется конечными выключателями или датчиками положения. Представленная на рисунке маркировка соответствует разжатому состоянию захватного устройства и поступлению команды на сжатие. С помощью сети Петри можно задавать функционирование по иерархическому принципу. Такое задание осуществляется за счет соответствующей интерпретации позиций и переходов. В этом случае переход с инцидентными ему входной и выходной позициями интерпрети-

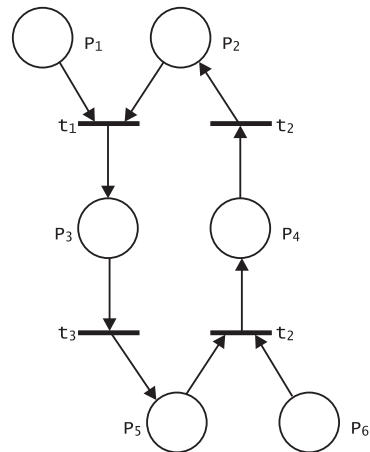


Рис. 5.19. Сеть Петри захватного устройства

руется в виде подпроцесса, который при необходимости может быть детализирован.

Учитывая особенности функциональных алгоритмов строительных РТК, удобно использовать модифицированную сеть Петри, рассмотренную в [13]. Такая сеть позволяет отразить циклический характер работы функциональных алгоритмов управления и отображать условия, имеющие два и более условий. В этой сети использо-

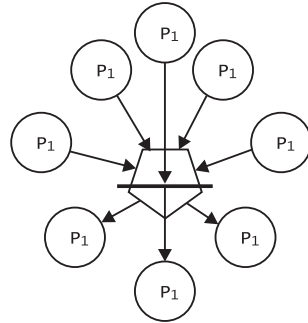


Рис. 5.20. Переходы модифицированной сети Петри

ваны дополнительные изобразительные возможности: используются позиции двух видов, а переходы могут дополняться входными и выходными многоугольниками (рис. 5.20). Дуги, входящие в переходы могут заканчиваться либо на переходах, либо на ребрах многоугольников, изображаемых с входной стороны. Число ребер определяется числом конъюнкций, входящих в дизъюнктивную форму спусковой функции. Дуги, исходящие из переходов, могут начинаться либо на переходе, либо на окаймляющих его с выходной стороны многоугольника. Количество ребер выходного многоугольника определяется числом возможных логически различных исходов выполнения соответствующего оператора. Дуги, инцидентные специальным вершинам, взвешиваются с помощью предикатов, значения которых изменяется только оператором, имеющим для изображающего его перехода в качестве одной из выходных дугу, входящую в эту вершину. Модифицированная сеть Петри определяется набором вида:  $S = (\tilde{P}, \bar{P}, T, K, L, F, H, M_0)$ , где  $\tilde{P}, \bar{P}$  — множество обычных и специальных позиций;  $T$  — множество переходов;  $K, L$  — множества, элементы которых характеризуется числом ребер многоугольников, окаймляющих переходы соответственно с входной и выходной сторон;  $F, H$  — функции инцидентности;  $M_0$  — начальная разметка сети. Модифицированная сеть Петри функционирует, переходя от разметки к разметке. Смена разметок, характеризующих ее новое состояние, происходит в результате срабатывания одного из переходов по одному из ребер многоугольника с входной его стороны. Модифицированная

сеть Петри представляет удобный инструмент для описания логических структур управления роботизируемых процессов.

## 5.6. Программное обеспечение и языки программирования роботов

Характерной особенностью систем управления роботов является расширенное программное обеспечение, включающее большой набор управляющих и обрабатывающих программ, имеющих важное значение для функционирования робота. Программное обеспечение роботов должно обеспечивать формирование, редактирование и отлаживание программ управления, их выполнение в пошаговом или непрерывном режиме. Весь процесс сложной микропроцессорной обработки информации и формирование управляющих воздействий протекает в реальном масштабе времени. Программное обеспечение роботов должно способствовать достижению гибкости и многоплановости управления.

Программное обеспечение микропроцессорных систем управления роботов представляет собой набор различных программ. Оно содержит комплекты управляющих программ, функциональные программы, тесты и др. В состав программного обеспечения роботов также включаются языки программирования и трансляторы этих языков. Система программного обеспечения строится таким образом, чтобы основные группы программ могли работать одновременно. При задании и отладке управляющих программ этой системой обеспечивается общение оператора с устройством управления. Важнейшей функцией программного обеспечения является достижение согласованной работы всех подсистем робота при реализации процессов программирования. Построение программного обеспечения связано с реализацией диалоговых языков различного уровня сложности.

Программное обеспечение робота в общем случае можно разделить на прикладное и системное (рис. 5.21). Прикладное программное обеспечение включает управляющие программы и служит для реализации алгоритмов управления роботом и отдельными его устройствами. Оно содержит информацию о требуемых действиях робота в ходе технологических операций. Системное программное обеспечение (СПО) предназначено для организации вычислительных процессов в управляющей ЭВМ и создания основы для разра-

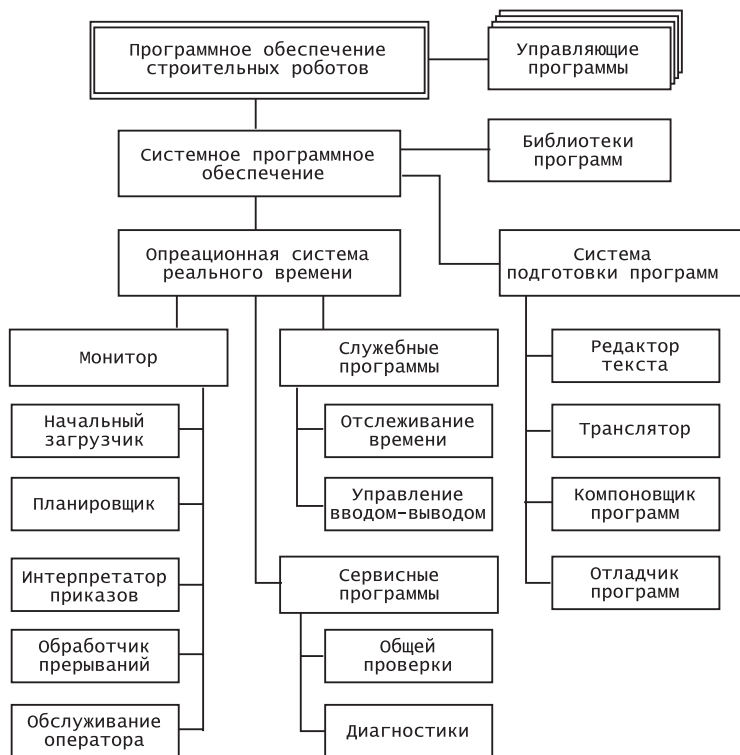


Рис. 5.21. Состав программного обеспечения строительного робота

ботки и выполнения прикладных программ. Системное обеспечение можно разделить на две главные части:

- программные средства управления работой микропроцессорной системы управления, которые образуют операционную систему;
- программные средства повышения эффективности разработки управляющих программ, которые составляют систему программирования.

Основу СПО строительных роботов составляет операционная система реального времени, представляющая собой совокупность специальных программ [33]. Операционная система предназначена для управления всеми аппаратными средствами и программными ресурсами. Она автоматизирует процесс прохождения управляющих программ через процессор, обеспечивает необходимую про-

пусковую способность вычислительной системы. Операционная система обрабатывает разнообразные прерывания, реализует операции ввода-вывода, обеспечивает организацию и доступ к файловой системе и поддерживает диалоговую связь с оператором. К основным функциям операционной системы также относятся распределение и защита оперативной памяти, планирование работы процессора, управление данными и библиотеками программ. Операционная система СПО роботов обеспечивает выдачу управляющих воздействий для управления приводами и обработку информации датчиков. Она функционирует в условиях многочисленных и разнотипных событий, возникающих независимо друг от друга в различные моменты времени. Основными компонентами операционной системы СПО робота являются монитор и набор служебных и сервисных программ.

Монитор СПО представляет собой ядро операционной системы и осуществляет функции управления заданиями, данными, задачами и объектами. Он организует связи между аппаратными и программными средствами, а также между системой управления и оператором. Монитор представляет собой набор программ, которые обеспечивают запуск и контроль выполнения системных и управляющих программ робота, управление операциями ввода-вывода, организацию взаимодействия оператора с системой управления, а также распределяет память управляющей ЭВМ и манипулирует файлами. В состав монитора операционной системы реального времени включаются ряд программных модулей: планировщик задач, обработчик прерываний, интерполятор приказов, начальный загрузчик и программа обслуживания оператора. При этом программа-планировщик выбирает задачи, подготавливаемые к выполнению. В управляющих системах эта программа одновременно выполняет функции диспетчера и вырабатывает разрешение на выполнение задач из состояния готовности или ожидания. Задача, инициируемая этой программой, поступает в процессор для исполнения. Процесс ее выполнения продолжается до полного завершения либо до поступления команды перехода в состояние ожидания. Выполнение задачи прекращается при возникновении ошибки или вмешательстве оператора. По окончании решения текущей задачи управление возвращается к планировщику для выбора следующей задачи. Планировщик обеспечивает работу системы в реальном времени и позволяет реализовать взаимодейст-

вие задач друг с другом. Он управляет оперативной памятью и обменом данных в системе управления.

Обработчик прерываний управляет системой прерываний в управляющей ЭВМ. Он обрабатывает различные виды прерываний с сохранением состояния прерываемых задач. Решение задачи в зависимости от источника сигнала может быть прервано немедленно или по истечении некоторого времени. Наличие такой программы в составе монитора позволяет в случае необходимости переводить процессор на выполнение других задач. В микропроцессорных системах управления роботами могут осуществляться внутрипроцессорные, общесистемные или программные прерывания. Внутрипроцессорные прерывания связаны со сбоем аппаратуры, ошибочным кодом операции или другими непредвиденными событиями внутри процессора. Общесистемные прерывания могут произойти по запросу внешних устройств управляющей ЭВМ или оборудования робота. Программные прерывания планируются в управляющей программе с помощью специальных команд. Они позволяют выполнять обращение к специальным программам и программным модулям в ходе осуществления заданий. В момент прерывания задачи ее состояние отражается в системных таблицах. После выполнения своих операций обработчик прерываний передает управление планировщику для определения дальнейшего задания.

Программа начального загрузчика, входящая в состав монитора, служит для начальной установки микропроцессора системы управления при включении робота в работу или при возврате к началу выполнения системной программы. В ходе осуществления заданий этой программы обеспечивается установка исходных значений всех переменных, а также начальных значений программного счетчика, маски прерываний, указателя стека.

Программы обслуживания оператора поддерживают связь оператора с операционной системой и выполняют операции над файлами через клавиатуру системы управления. Эта часть монитора обеспечивает взаимодействие оператора с системой управления роботом и позволяет ему незамедлительно вмешиваться в действия робота, получать необходимую информацию о его состоянии, оперативно создавать и отлаживать новые управляющие программы. В нее включаются подпрограммы, обслуживание клавиатуры и подпрограммы обслуживания дисплея.



Группу служебных программ операционной системы составляют программа отслеживания времени и программы управления вводом-выводом. Программа отслеживания времени периодически наращивает абсолютное время. Она реализует временные задержки, задаваемые различными задачами. Эта программа имеет наивысший приоритет и выполняется при каждом прерывании таймера. Для микропроцессорных систем управления роботов важным компонентом операционной системы являются программы ввода-вывода или, так называемый, супервизор ввода-вывода. Эти программы обеспечивают обмен между задачами, решаемыми в рамках операционной системы реального времени, и внешними устройствами системы управления: датчиками, приводами робота, внешней памятью и др. При выполнении задач запросы на ввод-вывод информации формируются в виде макрокоманд. Наличие этого вида программ позволяет избавиться от необходимости детального программирования операций ввода-вывода при составлении управляющих программ.

Сервисные программы систем управления роботов составляют комплект тестовых программ для проверки и диагностики работоспособности процессора, оперативной памяти, внешней памяти, датчиков и приводов робота. Для роботов лучше использовать тестовые программы общей проверки, составленной на языке управляющих программ. Комплекты тестовых программ позволяют быстро определить нарушения в работе аппаратуры и используя специальные программы провести локализацию отказавшего компонента. Диагностические тесты вводятся с внешнего программноносителя.

В системах управления роботов, программирование которых выполняется на специальных языках, в состав СПО включается набор сервисных программ, которые применяются при разработке прикладного программного обеспечения. Эти программы составляют систему программирования. В них входят редактор текста, транслятор с языка программирования, и отладчик программ [39]. В этот набор программ могут быть включены библиотеки программных модулей и программы сопровождения. Эта часть системного программного обеспечения облегчает процесс создания и отладки новых управляющих программ и значительно сокращает время их подготовки. Каждая из перечисленных программ выполняет определенный цикл операций при подготовке управляющих программ. Редактор текста позволяет готовить текст программы, дает возможность ее редактировать, вносить в нее изменения и дополнения.

Трансляторы позволяют исходную программу, выполненную на робото- или проблемно-ориентированном языке, преобразовать в рабочую программу на машинном языке. Обычно в качестве трансляторов в роботах используются интерпретаторы. Подготовленная и отредактированная рабочая программа может содержать логические ошибки из-за использования неправильных команд, нарушения порядка их следования и т. д., что вызывает необходимость ее отладки. Для этих целей используется служебная программа — отладчик, которая позволяет проверять содержимое ячеек памяти и регистров процессора, изменять в случае необходимости их первоначальное содержание. С помощью отладчика программ проводится пошаговое выполнение программы, проверяется правильность работы отдельных команд или части программы. Возникающие ошибки устраняются путем изменения содержимого ячеек памяти. После отладки управляющих программ процесс их подготовки заканчивается и они выводятся на программноноситель. В состав СПО включается библиотека программ, которая содержит подпрограммы используемых команд, процедур, функций.

Подготовка системных и управляющих программ осуществляется с помощью специальных языков программирования, которые в зависимости от своего назначения делятся на два класса: инструментальные и аналитического программирования [34]. Инструментальные языки программирования используются для создания собственного программного обеспечения микропроцессорных систем управления роботов. Эти языки служат для написания операционных систем реального времени, создания служебных и сервисных программ, при разработке трансляторов алгоритмических языков, а также используются при разработке специальных сред и оболочек для удобства работы с управляющими программами. В качестве инструментальных языков программирования используют языки ассемблера и высокого уровня. Учитывая, что язык ассемблера позволяет максимально использовать возможности микроЭВМ и обеспечивает разработку наиболее эффективных программ, то его широко используют для написания отдельных модулей или фрагментов программ, которые вставляются в программы, написанные на алгоритмических языках высокого уровня. Это дает возможность для отдельных участков программы получить требуемое быстрое действие и сократить объем памяти. Особенно эффективно использование макроассемблера, который позволяет заменять в про-

цессе программирования повторяющиеся группы ассемблерных операторов макрокомандами и уменьшает время разработки.

Так как инструментальные языки высокого уровня не обладают особенностями, присущими исключительно программному обеспечению роботов, то для подготовки СПО в робототехнике используют широко распространенные универсальные языки программирования C++ и Pascal. Язык C++ характеризуется экономной записью выражений, современными механизмами современными механизмами управления вычислениями и структурами данных, богатым выбором операций. Этот язык популярен среди системных программистов благодаря сочетанию возможностей языков высокого и низкого уровней и эффективности машинных программ. Язык C++ является объектно-ориентированным языком и предоставляет возможность программисту работать более чем с 300 библиотечных функций. Эффективным и высокопроизводительным инструментом разработки программ на языке C++ является использование интегрированных сред «Borland C++» и «Visual C++». Они отличаются, удобной интерактивной средой, содержат средства для ввода и редактирования программ, их компиляции, компоновки нескольких объектных модулей для получения выполняемой программы, средства отладки программ. Их использование значительно сокращает время разработки программ за счет сокращения времени на создание программ, кодирование, компиляцию и отладку. Интегрированные среды «Borland C++» и «Visual C++» имеют многооконный интерфейс, поддерживают работу с мышью, имеют возможность быстрого перехода к работе с ассемблером, предоставляют разработчику систему меню, а также диалоговую систему отладки программ.

Язык Pascal является традиционным языком программирования и отражает принципы структурного программирования. Он является процедурным языком с традиционной блочной структурой. Несмотря на относительную простоту языка, он используется для разработки широкого спектра приложений, в том числе и операционных систем. Интерес к этому языку повысился с разработкой интегрированной среды «Borland Pascal», позволившей выйти на новый уровень подготовки и отладки программ.

Перейдем к рассмотрению языков аналитического программирования, которые представляют наибольший интерес для пользователей промышленных и строительных роботов. Языки аналитического программирования являются средствами описания функ-

ционирования робота и выполняемых им задач [18]. Их применение позволяет оператору полнее использовать возможности исполнительных механизмов, сенсорных устройств, внешних запоминающих устройств и другого оборудования. Они упрощают процесс составления управляющей программы и сокращают время программирования. В свою очередь, язык программирования должен быть удобным для обучения, чтения и написания программ. В настоящее время в робототехнике для подготовки управляющих программ применяются языки аналитического программирования трех уровней: робото-ориентированные, объектно-ориентированные и задачно-ориентированные.

Робото-ориентированные языки относятся к языкам нижнего уровня и описывают управляющую программу на уровне действий робота. Эти языки программирования роботов наиболее многочисленны и отличаются простотой реализации. С их помощью подробно программируются требуемые действия робота, перемещения его степеней подвижности, операции по сбору информации о внешней среде и собственном состоянии. В программе указываются точки траектории движения, команды на управление рабочим органом и технологическим оборудованием. Состояние робота описывается геометрическими данными, которые задаются декартовой координатой характеристической точки робота и ориентацией схвата с помощью эйлеровых углов [49]. Ядро этих языков составляют два типа операторов: описания состояния робота и указания процесса изменения состояния. Кроме того, в большинстве языков имеются операторы для управления программой. Представителями роботоориентированных языков являются языки WAVE, VAL, AML, TEACH и др. [42]. Для строительных роботов интерес представляют языки VAL и ARPS, которые могут успешно использоваться для программирования действий строительно-монтажных, отделочных, бетоноукладочных, подъемно-транспортных и других роботов, задания которых связаны с однотипными многократно повторяющимися действиями. Отличительной особенностью языка AML является повышенная гибкость взаимодействия оператора с роботом в процессе программирования. Он позволяет выполнять операции над векторами и матрицами поворота, программировать алгоритмы планирования траектории с учетом ограничений на скорости и положения звеньев и рабочего органа. С помощью этого языка можно организовать взаимодействие с системой технического зрения. Язык TEACH специально разработан

для решения задач группового управления. Он дает возможность программировать несколько параллельно выполняемых заданий.

Язык VAL получил наибольшее распространение среди роботориентированных языков. Он был разработан в 1977 г. для роботов семейства PUMA. Эта система программирования реального времени, имеющая усовершенствованные методы расчета траектории, позволяющая исключить этап предварительных расчетов. В состав языка входит набор инструкций, с помощью которых происходит управление конфигурацией манипулятора, его движением, рабочим органом, проводятся арифметические действия над числами и координатами точек позиционирования, а также управление прохождением программы и связь с внешними устройствами. Язык VAL имеет несколько операторов управления движением: GO, GOS, MOVE, MOVES, с помощью которых задается перемещение в указанную точку или на указанное расстояние. Причем эти движения могут выполняться по прямой (GO, MOVE) или с интерполяцией (GOS, MOVES). В качестве параметров в операторах движения используются либо абсолютные координаты целевых точек (GO, GOS), либо относительные перемещения (MOVE, MOVES). Язык позволяет выполнять преобразования в обобщенных, декартовых координатах или в произвольной системе координат. С его помощью можно программировать простейшие арифметические операции и условные ветвления программ. Система VAL имеет развитый монитор, который в совокупности с языком программирования обеспечивает взаимодействие оператора с роботом. Монитор языка VAL задает и преобразует координаты точек позиционирования как в декартовой системе, так и на уровне углов в соединениях звеньев. В его функции входит редактирование программ, управление исполнением программ пользователя, а также выполнение сервисных операций: работа с файлами, управление состоянием системы, калибровка датчиков. Система VAL допускает стыковку с системой технического зрения. Язык VAL-II является новой версией VAL, которая обладает возможностью выполнения сложных вычислений при определении состояния робота и имеет расширенные связи с внешними процессорами.

Система ARPS представляет собой систему программирования робота, которая обеспечивает подготовку новых программ, позволяет формировать библиотеку подпрограмм, содержит инструкции программирования робота методом обучения. Система программирования ARPS состоит из команд монитора и команд программ

пользователя. Команды монитора используются для подготовки системы к выполнению пользовательских программ. Команды программ пользователя предназначены для описания действий робота и связей с технологическим оборудованием. В состав системы ARPS входит редактор текста, который используется для ввода и корректировки текста управляющих программ.

Мониторные директивы системы ARPS разделяются на следующие группы команд: определения точек, выполнения программ, управления системой, для работы с магнитными дисками, проверки и установки состояния. Группа команд определения точек содержит несколько команд, которые позволяют запоминать текущее положение манипулятора (HERE), выполнять групповое задание точек (LTEACH), просматривать значения координат точек, хранящихся в памяти (LLIST), корректировать значения точек и записывать новые значения (CHANGE), удалять точки из памяти (LDEL), а также выводить на экран текущее положение манипулятора (WHERE). Команды управления выполнением программ позволяют инициировать выполнение желаемой программы (RUN), прервать выполнение программы или продолжить ее выполнение (ABORT), остановить выполнение программы при окончании рабочего цикла (EXIT). Команды управления системой позволяют получать информацию о состоянии устройства управления (LIST STATUS), мониторных директивах (LIST COMAND), производить калибровку датчиков (CAL), вести просмотр каталога программ (PLIST), переводить систему в режим монитора (SYS-MON) и выполнять другие директивные инструкции. В состав системы ARPS входит группа директивных команд, которые поддерживают файловую систему.

Команды программ пользователя состоят из пяти групп: назначения и переопределения точек, управления манипулятором и схватом, управления вводом-выводом, специальные команды. Команды назначения и определения точек позволяют задавать положение точек (HERE), корректировать их координаты (SHIFT), переопределять точки (LOCATE), формировать рабочие плоскости для робота (FRAME) и переопределять основную систему координат (BASE), а также производить вычисление расстояния между двумя точками (DISTANCE). Команды управления манипулятором включают большую группу команд управления перемещением схвата, задания скорости движения, управления работой схвата и рабочего инструмента. В этих операторах все расстояния задаются

в миллиметрах, а каждый аргумент является абсолютной или координатной точкой. Команды GO, GOS передвигают манипулятор в желаемую точку и обеспечивают необходимую ориентацию в этой точке. При этом команда GOS осуществляет движение манипулятора прямолинейно в заданную точку, а команда GO перемещает схват по интерполированной траектории. Разновидностью этих команд являются операторы GONEAR и GOSNEAR, которые позволяют передвинуть схват к заданной точке и расположить его на нужном расстоянии от нее в направлении оси Z системы координат инструмента. Другой их разновидностью служат операторы GO&OPEN, GOS&OPEN, GO&CLOSE, GOS&CLOSE, которые дополнительно управляют сжатием и разжатием схвата в начале движения. Команды MOVE, MOVES передвигают манипулятор на заданное расстояние относительно базовой системы координат. При этом команда MOVE выполняет движение манипулятора по прямолинейной траектории, а MOVES — с интерполяцией. Операторы TMOVE, TMOVES отличаются тем, что в них перемещения задаются в системе координат схвата. С помощью команды MOVE JOINT обеспечивается управление перемещением звена, указанного в команде. В состав этой группы команд включен оператор ALING, позволяющий провести выравнивание инструмента по осям основной системы координат. Управление схватом выполняется с помощью операторов OPEN и CLOSE, которые соответственно открывают и закрывают схват манипулятора. По умолчанию время выполнения этих операций составляет 0,2 сек, используя дополнительные команды ODELAY и CDELAY, можно устанавливать желаемые выдержки времени до 328 сек. В состав команд языка включена группа операторов, которая для управления конфигурацией манипулятора. Установка требуемой скорости движения осуществляется с помощью команды SPEED.

Команды управления программой включают группу операторов, которые обеспечивают ветвление программы, работу с подпрограммами. Команда JUMP выполняет безусловный переход к оператору с меткой, заданной в команде. Команда IF является оператором условного перехода и выполняет переход по результату сравнения значений двух переменных. В случае получения истинного результата происходит ветвление программы. Команда CALL осуществляет переход на подпрограмму. Выполнение пользовательской программы заканчивается командой STOP, по которой на экран монитора выводится сообщение, указанное в коман-



де. Команды управления входом-выходом обеспечивают связь с внешним оборудованием и синхронизацию действий робота с ним. Команда OUT управляет линиями выхода и позволяет устанавливать их в активное или пассивное состояние, а с помощью команды RUNOUT можно обнулить выходные линии при нормальном выполнении всех циклов программы, прерывании ее из-за ошибки. При помощи команды IN считывается текущее состояние входных линий, а команда WAIT IN позволяет проверять входные линии и ожидать заданного состояния перечисленных в команде линий. Группа специальных команд содержит операторы позволяющие устанавливать необходимые выдержки в программе (DELAY), определять точность позиционирования манипулятора в заданной точке (TOL NARROW, TOL WIDE), осуществлять масштабирование относительно какой либо точки (SCALE). С помощью специальной команды SET можно устанавливать значение переменной, равное результату выражения, которое находится в правой части. В выражении можно использовать арифметические операции: сложение, вычитание, умножение, целочисленное деление, деление с остатком, логическое сложение и умножение.

Набор текста прикладных программ производится с клавиатуры в режиме редактирования. Команды редактирования позволяют создавать новые программы и редактировать существующие. Переход в режим редактирования осуществляется мониторной директивой EDIT, а выход из редактора и передача управления монитору производится командой E. Редактор системы программирования ARPS содержит набор команд, который позволяет передвигать операторы, осуществлять замену, удалять строки, переходить в режим обучения. В качестве примера на рис. 5.22 приведен листинг программы на языке ARPS управления монтажным роботом, осу-

PROGRAM MAT		
1. SET N=4	10. CLOSE	19. OUT 2
2. SET NI=1	11. MOVE 0,0,-3	20. WAIT IN 1
3. LOCATE PAL=P0	12. WAIT IN 1	21. MOVE 0,0,3
4. OUT 1	13. GOS P1	22. OPEN
5. GOSNEAR P0,3	14. GOS P2	23. MOVE 0,0,-3
6. OPEN	15. GOS P3	24. RETURN
7. SPEED 50	16. SPEED 10	
8. SET NI=NI+2	17. WAIT IN 2	
9. MOVE 0,0,3	18. GOSNEAR P0,3	

Рис. 5.22. Листинг программы управления монтажным роботом на роботоориентированном языке ARPS



шествующим взятие панели с панелевоза и перемещения его в зону установки. Маршрут движения соответствует рис. 4.7.

Объектно-ориентированные языки составляют средний уровень языков аналитического программирования [49]. Они описывают работу роботов на уровне задания движения объектов и основаны на использовании моделей объектов роботизации, что существенно усложняет их реализацию. Однако применение языков данного уровня позволяет значительно упростить программирование заданий робота, которые в данном случае выражаются в терминах манипулирования объектами. Наиболее простыми из этой группы языков являются языки AL, PAL, LM, которые используют фреймовое представление ситуаций. Фреймы задают положение и ориентацию координат и позволяют описывать характеристические точки объектов манипулирования и самого робота. В состав объектно-ориентированных языков входит группа языков, которые располагают специальными конструкциями для задания геометрической формы предметов. В одних языках (AUTOPASS, EMULA) форма предметов задается с помощью машинной графики и хранится в базе данных, а в других (ROBEX, RAPT, MCL) — программируется на специальных языках (APT и др.). Причем в последнем случае, как правило, не требуется полного описания формы предмета, а указываются фрагменты, необходимые для выполнения заданий, и предусматривается возможность дополнения этих фрагментов. Предметы описываются без привязки к конкретным пространственным положениям, так как информация о положении и ориентации предметов поступает из описания связанных с ними осей. Полное описание ситуации в таких языках дополняется отношениями между этими предметами. Языки этого уровня заслуживают определенного внимания при решении вопросов роботизации монтажных операций и ряда других строительных работ с использованием средств адаптивного управления.

В связи с этим, ознакомимся более подробно с одним из наиболее распространенных языков этого уровня — языком AL, в котором специализированные робототехнические функции сочетаются с возможностями алгоритмических языков высокого уровня ALGOL и PASCAL. Язык AL использует скалярные, векторные, размерные и безразмерные типы данных. Для скалярных величин вводятся операции сложения, вычитания, умножения, деления и операции присвоения. Скалярные величины могут иметь размерность времени, линейного и углового расстояния, массы. Характеристи-

ческие точки робота и предметов задаются одним или несколькими фреймами. В системе AL реализованы типы данных и управляющие конструкции языка ALGOL, способы представления геометрической информации с помощью векторов, матриц поворота и систем координат. Язык располагает разнообразными средствами моделирования рабочей обстановки, которые позволяют проводить взаимную привязку систем координат, в том числе и временных. Структура программы на языке AL состоит из двух разделов: описания и операторов, причем раздел операторов выделяется операторными скобками BEGIN и END. Кроме вещественных и целых типов данных, в язык AL включены новые типы данных: EVENT — событие, FRAME — система координат, PLANE — плоскость, ROT — вращение относительно заданной оси. В язык AL введены скалярные и векторные величины: SCALAR — простая переменная, VECTOR — векторная переменная, TRANS — преобразование одной величины в другую. Для скалярных величин используются обычные арифметические действия. В языке AL введено понятие размерностей и единиц измерения, причем кроме типовых размерностей: TIME (время), MASS (масса), ANGLE (угол), имеется возможность введения своих единиц с помощью оператора DIMENSION. В качестве скалярных единиц измерения в языке используются сантиметр (sm), секунда (sec), грамм (gm), градус (deg). Этот список можно расширить с помощью оператора DEFINE.

Основным оператором управления движением робота является оператор MOVE, который определяет специфику языка AL и содержит в своем составе разделы для задания позиций (VIA), требований (WITH), условий (ON). В качестве операндов в операторе MOVE указываются имена исходного и целевого фреймов. В разделе условий указываются особые промежуточные точки траектории и при необходимости скорости в них. В разделе требований параметры перемещения (длительность, усилие и др.), а в разделе условий перечисляются некоторые условия и допустимые действия в случае их возникновения. В язык AL включено два дополнительных оператора движения, обеспечивающих выполнение спиральных движений в указанной плоскости (SEARCH) и центровку схвата относительно объекта до его захвата (CENTER). Язык располагает группой операторов для управления схватом и технологическим инструментом: OPEN — открыть хват, GRASP — сжать хват, DREVE — выполнять движения, SCREW — ввинчивать, RELEASE — сбрасывать. Оператор OPERATE позволяет управлять

технологическим инструментом (поворотным столом, автоматическими тесками, отверткой и т. д.) С помощью операторов AFFIX и UNFIX объединять и разъединять фреймы. Особенностью языка AL является наличие средств для организации параллельных процессов и их синхронизации. Параллельность процессов задается путем формирования распараллеливаемых блоков, каждый из которых может быть запущен в работу одновременно с некоторыми другими блоками. В распараллеливаемых блоках в качестве операторных скобок используются ключевые слова COBEGIN и CO-END. Синхронизация параллельных процессов осуществляется при помощи операторов SIGNAL и WAIT, операндом которых служит событийная переменная.

Задачно-ориентированные языки относятся к языкам высшего уровня и дают возможность описывать задачи робота в наиболее естественной и компактной форме. Они основаны на использовании моделей рабочего пространства, степень детализации которых определяется уровнем языка. Отличительной особенностью языков этого уровня является их универсальность и возможность формирования широкого круга заданий для роботов различного назначения, в том числе и для строительных. Действия робота в данном случае программируются в виде спецификации задач, определяемых технологическим процессом. При использовании задачно-ориентированных языков система управления робота должна содержать модели внешней среды, средства планирования действий робота, а также спецификации решаемых задач. Для строительных роботов использование задачно-ориентированных языков несомненно представляет интерес и является делом ближайшего будущего. Однако уже сегодня можно однозначно определить наиболее целесообразные области их применения. Это в первую очередь роботизация монтажных и штукатурных работ.

## **Глава 6. Роботизация и автоматизация земляных работ**

### **6.1. Технологические предпосылки и особенности применения средств роботизации в строительстве**

Роботизация технологических операций является важным направлением автоматизации технологических процессов в строительстве. Роботизации строительных работ предшествует тщательный анализ технологических операций и процессов. В ходе анализа должны быть подвергнуты разбору технические, организационные и социальные факторы, а также проведена оценка экономической целесообразности. В первую очередь в ходе обследования оценивается уровень механизации и автоматизации строительных процессов, оценивается уровень сложности операций и выполняется пооперационный их анализ. Результаты пооперационного анализа позволяют предварительно установить уровень сложности роботизируемого процесса и техническую целесообразность использования средств робототехники. Анализ средств технологического оснащения позволяет оценить возможность совместной работы используемого технологического оборудования со средствами роботизации или принять решение о необходимости его замены. При анализе проводится оценка возможности автоматизации отдельных операций на основе традиционных средств механизации и целесообразности использования промышленных роботов. В процессе оценки целесообразности роботизации строительного процесса учитываются возможности максимальной загрузки технологического оборудования и внедряемых средств робототехники, затраты времени на перемещение оборудования в пределах объекта и на другой объект, а также потери времени на монтаж и наладку оборудования. Программирование, эксплуатация и техническое обслуживание средств робототехники требует специальной квалифи-

кации, поэтому на стадии анализа роботизируемых строительных процессов следует рассмотреть вопросы структуры кадров и уровня их квалификации.

Оценка экономической целесообразности роботизации отдельных строительных процессов осуществляется на основе анализа затрат и расчета их окупаемости. При этом учитывается совместимость внедряемых средств робототехники с другим технологическим оборудованием. Объекты роботизации считаются выбранными, если они обеспечивают экономический эффект. Окончательное решение о целесообразности внедрения средств робототехники лучше принимать на основании экспертных оценок и заключения специалистов о том, что роботизация данных операций или процессов технически и экономически осуществима.

При разработке роботизированной технологии строительного процесса необходимо также изучить проектную документацию зданий и сооружений, где предполагается использование роботов, особенности их конструктивных элементов. Это позволит произвести группировку конструктивных элементов здания по определенным признакам на основе общности конструктивно-технологических особенностей и предоставит возможность точной оценки объемов, выполняемых работ. Кроме того, в процессе анализа возможна разработка рекомендаций и предложений по унификации конструктивных элементов здания, повышению их технологичности при роботизации строительных операций. На основе информации, полученной в результате анализов, составляются технические условия на роботизацию технологической операции или процесса. При разработке роботизированного технологического процесса анализируются все особенности и приемы выполнения операций действующего технологического процесса и выбираются те, которые обеспечивают наибольшую производительность и наилучшее качество. Роботизируемый технологический процесс должен иметь или допускать использование автоматической подачи материалов к рабочему месту, оснащение механизированным и автоматизированным инструментом, приспособлениями и оснасткой.

Анализ трудозатрат показал, что наиболее трудоемкими являются малярные и монтажные работы, которые составляют соответственно 25 и 23,5% от общих трудозатрат по строительству наземной части здания. Операции монтажного процесса делятся на две группы: операции монтажного цикла и вспомогательные операции. Операции монтажного цикла связаны с установкой эле-

ментов в проектное положение, а вспомогательные операции связаны с закреплением элементов, герметизацией и бетонированием стыков, антикоррозийной защитой закладных деталей, заделкой швов на фасаде здания. Наиболее трудоемкими из перечисленных операций являются операции монтажного цикла, доля которых превышает 65% общих монтажных трудозатрат. Вспомогательные операции существенно разнородны, относительно не связаны между собой, существенно зависят от конструктивных решений и используемой технологии. Поэтому наибольший интерес представляют основные операции монтажного цикла, включающие захват панели, ее подъем и транспортирование к месту установки, позиционирование и посадку панели на место, выверка планового положения панели и закрепление панели. Эти операции полностью определяют период цикла и составляют 50% всех монтажных трудозатрат. Кроме того, они характеризуются тяжелыми и опасными условиями труда. Исходя из изложенного следует сделать вывод, что роботизация монтажных работ на строительстве зданий и сооружений является первоочередной. При строительстве объектов из сборного железобетона в первую очередь следует решать вопросы автоматизации и роботизации операций строповки и расстроповки, подачи и установки элемента в проектное положение с заданной точностью. Эти задачи в настоящее время вполне решаемы на основе использования кранов-манипуляторов, позиционирующих роботов и специальной монтажной оснастки.

Другой группой строительных операций, представляющих первоочередной интерес для роботизации, являются отделочные работы. В первую очередь это относится к малярным и штукатурным работам. Малярные работы отличаются технологичностью, обеспечивающей использование роботов с традиционной структурной организацией. Однако, выполнение указанных работ в отдельных помещениях различного объема предъявляет ряд дополнительных требований к конструктивному исполнению малярных роботов. Они должны обеспечивать удобное перемещение из одного помещения в другое, быструю подготовку к работе на новом месте. Выполнение малярных работ включает ряд технологических операций: очистка поверхности, ее шпатлевка, грунтовка, нанесение окрасочных составов. Поэтому при роботизации малярных работ необходимо предусматривать возможность смены технологического инструмента и подачи различных материалов. Особенностью выполнения названных операций является то, что каждая из них

имеет свою особую технологию выполнения. Так технология очистки предусматривает непосредственное взаимодействие рабочего инструмента с поверхностью. Причем это взаимодействие должно выполняться при определенном его нажатии на поверхность. В тоже время такие операции как грунтовка и окрашивание могут выполняться без непосредственного взаимодействия с поверхностью и рабочий инструмент может находиться на определенном расстоянии от нее. Особенностью малярных работ является разнообразие используемых способов нанесения грунтовочных и окрасочных составов на рабочие поверхности, а также разнообразие схем окраски. Поэтому при роботизации этих работ необходим тщательный анализ технологических процессов малярной отделки зданий, выбор рациональных способов и схем окрашивания. При выборе должны учитываться виды и формы поверхностей, их площади, вид используемых окрасочных материалов, требования к фактуре поверхности и др. Технологическими особенностями малярных работ, выполняемых распылением окрасочных составов, является образование в рабочей зоне мелкодисперсной аэрозольной воздушной среды, которая вредна для обслуживающего персонала, а в случае использования лакокрасочным материалов является взрывоопасной. Эти особенности должны учитываться при проектировании малярных роботов и выборе способа управления ими. Технологическими предпосылками роботизации в данном случае является наличие методов и средств подготовки и подачи к рабочему инструменту (например краскопульту) грунтовочных и окрасочных материалов. Анализ технологий и оборудования для малярных работ показал, что данный вид работ является наиболее подготовленным для роботизации. Этот вид работ располагает различными агрегатами с автоматическим и дистанционным управлением для подачи и распыления красок, нанесения грунтовок.

В последние годы интенсивно проводятся исследования и разработки по роботизации штукатурных работ. В отличие от малярных работ они отличаются более сложной технологией и использованием в основном ручных методов работы. Большой объем штукатурных работ и их высокая трудоемкость являются хорошими стимулами их роботизации. В настоящее время строительство располагает новыми технологиями для приготовления, подачи и нанесения штукатурного раствора на рабочую поверхность. Разработаны и выпускаются промышленностью специализированные штукатурные станции, обеспечивающие смешивание компонен-



тов, подачу штукатурного раствора к месту выполнения работ, его перемешивание на месте и подачу и набрызг готового раствора. Однако нанесение раствора и перемещения сопла выполняется вручную. Автоматизированные штукатурные станции являются хорошей предпосылкой роботизации штукатурных работ. В последние годы проводятся интенсивные разработки в области совершенствования технологии штукатурных работ, из которых для роботизации работ интерес представляют готовые сухие смеси и средства их механизированной обработки. В современном технологическом процессе выполнения штукатурных работ выделяется три основных рабочих этапа: нанесение штукатурного раствора на поверхность, грубое разравнивание материала в состоянии набора прочности, выравнивание поверхности с выдержкой допустимых отклонений на неровность поверхности, окончательная обработка нанесенной штукатурки и получение желаемой структуры поверхности. Автоматизация штукатурных работ на основе робототехники должна решаться совместно с разработкой новых технологий и комплексного подхода к автоматизации всех рабочих этапов. Особенностью штукатурных работ является разнородность используемых технологий для выполнения отдельных операций. Если для нанесения растворов применяется технология набрызга, то для разравнивания материала и окончательной обработки нанесенной штукатурки используются методы силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Особенностью штукатурных работ также является необходимость провешивания поверхности и выдерживания ее в процессе выполнения работ.

Бетонные работы в жилищном и гражданском строительстве занимают самый большой объем работ, достигающий почти 22%. Поэтому их роботизация представляет огромный интерес. В настоящее время созданы хорошие технологические и технические предпосылки в решении задач роботизации бетонных работ. Разработана и применяется механизированная технология укладки бетона. Созданы средства для транспортирования и подачи бетона к местам его укладки. Дальнейшее совершенствование технологии бетонных работ должно быть направлено на решение задач комплексной механизации и автоматизации всех операций технологического цикла бетонных работ. Учитывая сложность решаемых задач, следует их роботизацию выполнять поэтапно. Основу роботизируемой технологии должны составить трубопроводный способ доставки бетона к месту укладки и использование манипуляцион-



ных стрел для его распределения. При роботизации бетонных работ необходимо учитывать ряд технологических особенностей. Среди них в первую очередь должны выполняться требования равномерного распределения бетона в процессе укладки, его уплотнения, сохранения положения закладных деталей и арматурных изделий. Технологией выполнения бетонных работ следует предусматривать обход всевозможных препятствий в виде арматурных стержней, рам опалубок и пр. При решении задач роботизации бетонных работ следует учитывать отличительные особенности укладки бетона в опалубочные формы и при заливке площадок различной протяженности.

Определенный интерес для роботизации представляют земляные и свайные работы. Земляные работы являются наиболее трудоемкими, однако здесь широко используются землеройные машины. Основной технологической особенностью землеройных работ является наличие неконтролируемых изменений нагрузки в процессе работы оборудования. Кроме того, технологией выполнения земляных работ предусматривается контроль положения, направлений, уклонов и неровностей выполняемых траншей, котлованов, площадок и других объектов. Это требует использования специальных средств задания направлений, осевых линий и плоскостей. Внедрение роботизированной технологии на этих работах должно быть связано с совершенствованием манипуляционных механизмов экскаваторов, перевода их на интерактивное и супервизорное управление, использования адаптивных законов управления режимами. При решении задач управления группой механизмов должны решаться вопросы синхронизации работы оборудования. Технология выполнения свайных работ предусматривает подачу свай, их позиционирование, забивку до скального грунта или на заданную глубину. Если забивка свай выполняется специальными сваебойными механизмами, то их подача и установка выполняется с помощью средств малой механизации, не позволяющих полностью механизировать и автоматизировать этот вид работ. Перспективным направлением решения задач автоматизации этих работ является роботизация процессов подачи и установки свай в проектное положение. Технологическими особенностями роботизации этих операций являются большие массы объектов роботизации, необходимость внешнего контроля выполнения установочных операций, неодинаковая твердость грунтов в различных местах свайного поля.

## 6.2. Бортовые информационные системы землеройных машин

Основным элементом систем автоматизации современных землеройных машин является центральный процессор (ЦП) в виде большой интегральной схемы, обрабатывающий информацию в соответствии с программой, подаваемой по командам на его входы [70]. Центральный процессор, тактовый генератор, системный контроллер, устройства ввода-вывода, система памяти СП и блок питания БП определяют структуру бортового вычислительно-управляющего устройства, которым может быть специализированная микро-ЭВМ или контроллер программного управления. Современная технология производства электронной аппаратуры позволяет разместить все перечисленные блоки на одном кристалле и свести до минимума размеры этих устройств при снижении вероятности их отказа в работе.

Фирма «CLI Corporation» разработала систему контроля состояния машин VMS (Vehicle Monitoring System), представляющую собой легко перепрограммируемое микропроцессорное устройство, которое может дополнительно устанавливаться на всех известных средних и крупных строительных машинах [71, 72]. Оно обеспечивает постоянный контроль и сравнение с граничными значениями важнейших параметров двигателя, коробки передач и других основных узлов машины, например, таких величин, как давление, температура, ток и напряжение, частота вращения вала, уровень жидкости. Выбор соответствующих параметров определяется типом машины и условиями ее эксплуатации. Информация выводится на дисплей или монитор [73]. Водитель не должен постоянно держать во внимании все показатели. Это значительно облегчает работу и способствует повышению производительности труда. Лишь при превышении отклонений параметров заданных значений водитель подключается к их устранению (рис. 6.1).

Фирма «CLI» рекомендует контролировать 11 различных входных величин, однако возможен контроль максимум 40 величин. Разработанная фирмой система включает в себя датчики, управляющие компьютеры и индикаторное устройство. Датчики, являющиеся основным компонентом системы, созданы фирмой специально для работы в тяжелых условиях, в которых эксплуатируются строительные машины. Устойчивые к воздействию вибрации гибкие линии соединяют датчики с компьютером, размещенным в

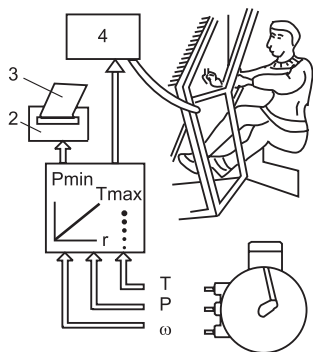


Рис. 6.1 — Схема бортовой системы контроля

1 — двигатель; 2 — печатающее устройство; 3 — протокол ошибок; 4 — монитор; T — температура; P — давление масла; ? — частота вращения.

герметически закрытом, прочном металлическом кожухе. Каждый датчик легко заменяется и не требует никакой специальной юстировки. Контрольный компьютер может отличать ложное срабатывание датчика от действительных повреждений, благодаря чему эксплуатационная надежность системы VMS возрастает.

Информация о всех величинах выводится постоянно или по вызову на индикаторное устройство в кабине оператора, но она может также накапливаться для последующего контроля или для сбора статистических данных. При определенных крупных неполадках (этот случай также программируется в «индивидуальном порядке») в кабине оператора раздается сигнал тревоги, на индикаторном устройстве появляется отчетливый мигающий сигнал.

Возможности контроля состояния машины посредством системы VMS приведены в табл. 6.1.

Система VMS позволяет своевременно обнаружить неполадки, утечки и т. д. В большинстве случаев предотвращаются возможные повреждения, ликвидация которых обошлась бы дорого. Часто облегчаются также техническое обслуживание или ремонт, потому что система VMS помогает быстро обнаружить источники неполадок.

Другая известная система, типа AID (Alarm Indicating Device) [73], предназначенная для контроля состояния машин, подобна системе VMS и контролирует в общем те же функции, но информирует исключительно о неполадках и нарушениях, о которых со-

общается также в аудиовизуальной форме в кабине оператора. Некоторые используемые на практике устройства

Таблица 6.1

Основные параметры	Дополнительные параметры
Двигатель частота вращения вала уровень масла давление масла уровень хладагента температура хладагента Состояние подшипников коленвала Загрязнение воздушного фильтра Напряжение аккумулятора Проверка двигателя посредством увеличения частоты вращения	Скорость движения Двигатель температура масла Коробка передач уровень масла давление масла Тормоза уровень масла температура масла давление масла Гидравлика уровень масла температура масла давление масла Топливо уровень давление

Параметры машины, контролируемые посредством системы VMS AID контролируют даже содержание смазки в ведущих мостах и температуру выхлопных газов.

Система AID контролирует максимум 7 основных функций, которые у разных строительных машин могут быть различными. В одной машине можно установить два устройства AID и тогда они будут контролировать до 14 функций. Конструкция AID очень проста, прочна и может быть установлена в машинах более старых выпусков, что обходится примерно во столько же, сколько стоит современный телевизионный приемник.

Фирма «Flight Systems» предлагает систему «Demon» для контроля состояния дизельных двигателей строительных машин [73]. Система обнаруживает первые признаки сбоя, прежде чем о них сообщат обычно устанавливаемые в кабине оператора приборы, и принимает необходимые меры: подает предупредительный сигнал, производит отключения или определенную регулировку. «Demon», как и системы VMS и AID, постоянно контролирует различные

параметры двигателя, в том числе систему охлаждения, а также коробки передач. Системы «Демон» для транспортных средств и для строительных машин неодинаковы по своему исполнению, что объясняется спецификой эксплуатации тех и других машин. Фирма предлагает в дополнение к системе «Демон» индикаторный пульт для установки в кабине оператора, который не только может подавать предупредительный сигнал, но и показывает оператору несколько рабочих параметров.

Требования к единству представления информации по мере развития техники постоянно повышались. От двухстрочного дисплея с минимальной информацией в первых бортовых системах сейчас пришли к графическим дисплеям большой площади. Они позволяют представлять информацию в обычной форме (рис. 6.2). Количество круглых световых индикаторов может быть различным. Здесь важную роль играет стоимостный фактор [73].

Кроме этого при помощи клавиатуры бортовой микро-ЭВМ может быть в любой момент отражена информация о состоянии разных функциональных блоков (рис. 6.3) в соответствии с таблицей 6.1. При появлении помех в работе водитель предупреждается световым и звуковым сигналами, а также тестом сообщаемым об ошибках на дисплее. Специальная клавиша служит для вызова на дисплей информации, точно отражающей состояние машины в данный момент. Во многих случаях это способствует скорейшему

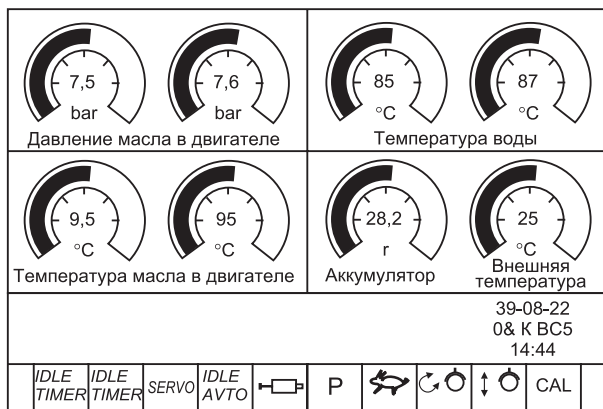


Рис. 6.2 — Схема поля графического дисплея с индикаторами давления масла, температуры масла и воды в двигателе, напряжения аккумулятора и внешней температуры

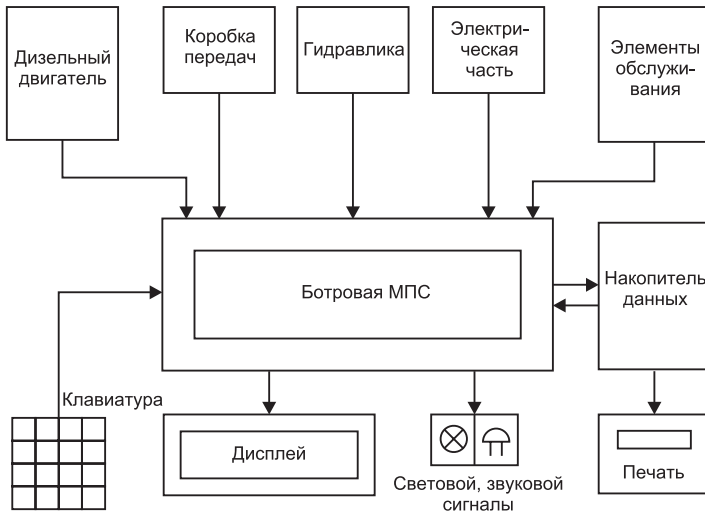


Рис. 6.3. Структурная схема бортовой микропроцессорной системы

устранению ошибок. Одновременно с этим информация обо всех отклонениях в работе заносится в накопитель данных и считывается при подключении печатающего устройства.

Изменения в информационной ситуации вызывают формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы машин. Критические ситуации, связанные с предельными или аварийными режимами работы приводов, учитываются при математическом описании функционирования каждого подкласса машин [70]. Математическая модель является основой для разработки программного обеспечения.

## 6.3. Автоматизация выемки и перемещения грунта

### 6.3.1. Автоматизация экскаваторов

В строительстве для выполнения большой группы земляных работ, таких как возведение насыпи, рытье котлованов и выемок, профилирование земляного полотна, планировка площадок и др., применяют многоцелевые землеройно-транспортные машины. Среди них выделяются одноковшовые экскаваторы, которые по кинематической структуре представляют манипулятор, снабжен-

ный прямой или обратной лопатой. Эти машины могут составить основу для разработки роботизированной технологии производства земляных работ на строительных площадках. На их базе возможно применение эффективных механизмов с автоматизированным и автоматическим управлением для отрывки котлованов и траншей под фундаменты, зачистки неровностей в малообъемных выемках, подготовки траншей для укладки инженерных коммуникаций и других работ.

Создание на базе экскаваторов землеройных роботов связано с автоматизацией режимов работы и управления перемещением рабочего органа, обеспечением требуемого качества обрабатываемой поверхности и защитой машин при возникновении аварийных моментов во время эксплуатации. При автоматизации режимов копания обеспечивается полное использование мощности двигателя и наибольшая производительность. В основу построения CAP режимов копания положен принцип стабилизации нагрузки приводного двигателя от сил сопротивления резанию путем изменения толщины срезаемого слоя. Регулируемым параметром в этих системах является нагрузка на двигатель, а регулирующим — положение рабочего органа. Величина нагрузки контролируется косвенными методами путем измерения крутящего момента, тягового усилия, угловой скорости вала двигателя или степени буксования ведущих колес. Создание на базе экскаваторов землеройных роботов связано с решением проблемы перевода отдельных операций цикла на программное управление и решением задачи планирования движений рабочего органа. В настоящее время задачи программного управления решаются на базе использования бортовой управляющей микроЭВМ. При этом необходимо оснастить машину информационно-измерительной системой контроля основных параметров состояния. На первых этапах создания землеройных роботов следует использовать интерактивное и супервизорное управление. Процесс обучения выполняется в ручном режиме, в ходе которого запоминается последовательность и основные показатели выполнения отдельных операций. Затем эти действия могут многократно повторяться в автоматическом режиме.

Создание на базе экскаваторов землеройных роботов в первую очередь связано с разработкой более совершенных рукоятей-манипуляторов. Значительно больший эффект достигается в сочетании с телескопической рукоятью экскаватора (рис. 6.4). Ее применение обеспечивает прямолинейное движение рабочего органа.

В результате решается проблема устранения волнообразного профиля основания (дна) котлованов и траншей.

Для решение проблемы отрывки выемок вблизи стен, фундаментов, а также с наклонной осью в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси движения машины и различной конфигурации в плане, разработан манипулятор с цепным рабочим органом (рис. 6.5). Работа землеройной машины заключается в следующем. При отрывке линейно-протяженных выемок и траншей, землеройная машина работает, как существующие экскаваторы с цепным рабочим органом. Для отрывки круглых в плане выемок, с помощью гидропривода приводится во вращение стол и цепной рабочий орган. Одновременно с этим включается в работу рабочий орган, который перемещается относительно стрелы вниз. В результате этого отрывается выемка цилиндрической формы. Аналогично с помощью этого манипулятора осуществляется отрывка выемок овальной и другой формы.

На основе экскаваторов создаются различного рода многофункциональные роботы, предназначенные для монтажа

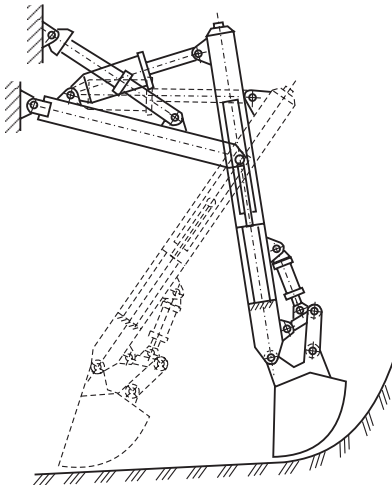


Рис. 6.4. Рукоять-манипулятор гидравлического одноковшового экскаватора

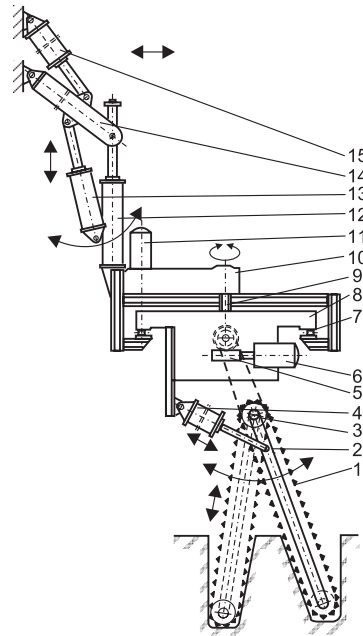


Рис. 6.5. Манипулятор с цепным рабочим органом для отрывки земляных сооружений заданного профиля



инженерных коммуникаций, уплотнения грунта, установки опалубки. Экскаваторы являются объектом широкого и эффективного внедрения средств автоматизации и микропроцессорной техники. Если раньше на первом плане стояла задача возможно более полного использования мощности дизельного двигателя, то с появлением электронных систем управления экскаваторами совместно с электрически управляемыми гидронасосами открываются и совершенно новые возможности [73], например, оптимизация работы двигателя в определенной области и частичное преобразование его мощности в гидравлическую мощность. Применение таких гидроприводов требует не только знания характеристик гидронасосов, но и учета свойств двигателя, гидросистемы и других приборов. Все эти вопросы решаются при помощи бортовой микро-ЭВМ (рис. 6.6). Особое преимущество изготовителей строительных машин в том, что вся система регулирования приводной цепочкой, состоящей из дизельного двигателя, гидронасоса, гидравлических клапанов и других электрических, электронных и механических элементов,

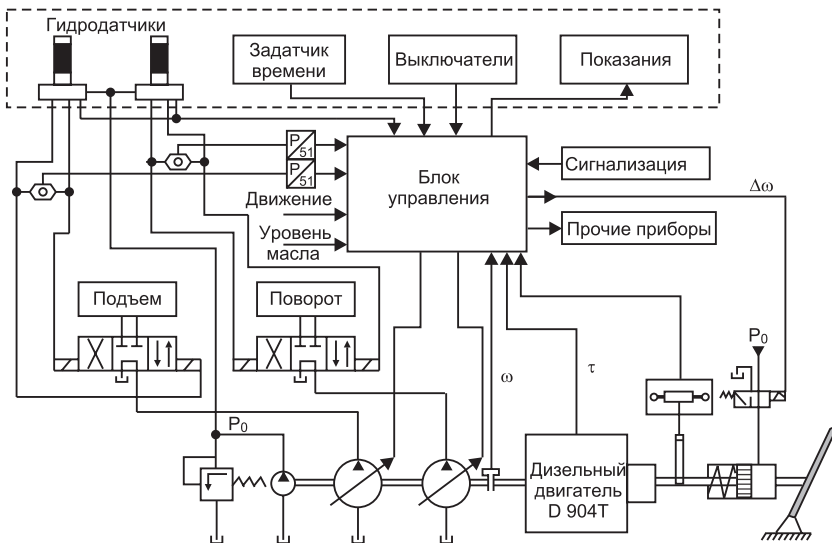


Рис. 6.6 — Блок-схема гидравлического экскаватора «Litronic A/R 912»  
 $\omega$  — частота вращения вала двигателя;  $\Delta\omega$  — отклонение частоты вращения от заданного значения;  $T$  — температура охлаждающей воды;  $P_0$  — задаваемое давление

может быть размещена в отдельном компактном и хорошо защищенном от внешних воздействий блоке.

Английская фирма «Litewate» предлагает разработанную ее систему «Liftwatch» для установки на гидравлических экскаваторах [71]. При использовании устройства «Liftwatch» может быть достигнута максимальная полезная нагрузка экскаватора, что положительно сказывается на эксплуатационной надежности и производительности прежде всего при работах по подъему грузов, например, плит для крепления стенок траншей или крупных строительных элементов. В результате во многих случаях отпадает необходимость в гидравлических экскаваторах большей мощности или даже в кранах. Устройство «Liftwatch» позволяет измерить угол наклона стрелы, а также давление с точностью от одной десятой до одной тысячной (в зависимости от типа экскаватора) в гидравлической системе. Микрокомпьютер постоянно сравнивает полезную нагрузку в каждый данный момент с допустимой при каждом данном наклоне стрелы технической нагрузкой и передает полученные величины (при необходимости подаются акустические и оптические предупредительные сигналы) на дисплей в кабине оператора. При смене экскаваторного оборудования оператор может свободно ввести в «Liftwatch» новую программу.

Фирма «McDonnell Douglas» поставляет систему DIGS 3232 для определения объема работы, выполняемой гидравлическим экскаватором. Эта система регистрирует в каждый данный момент параметры приводных двигателей и гидравлической системы, а также процессы движения рабочего оборудования и переводит все это в цифровые сигналы. Важнейший элемент данной системы — компьютер с запоминающим устройством, который размещен в машинном отсеке экскаватора в кожухе, защищенном от воздействия температуры, пыли и вибрации. Входные сигналы принимаются рядом датчиков и подаются в компьютер, который анализирует эти сигналы и затем передает подсчитанные контрольные и производственные величины на дисплей в кабине оператора. Таким образом, оператор постоянно располагает разнообразной информацией о движениях рабочего оборудования и выполняемой работе. На дисплей выводятся величины, показывающие положение ковша по высоте (по глубине), угол поворота поворотной платформы в каждый момент и требуемый угол ее поворота, а также радиус копания и полезную нагрузку в каждый данный момент. Поэтому при использовании устройства DIGS 3232 более

точно используется грузоподъемность транспортных средств. Четыре колонки, в которых представлены регистрируемые величины, показывают, как выполняются рабочие процессы «наполнение ковша», «поворот для выгрузки», «поворот для наполнения», «продолжительность цикла» по сравнению с определенной средней величиной, полученной на основе предшествующих рабочих операций и производительности экскаватора.

С помощью клавиатуры можно немедленно вызвать на дисплей до 30 показателей. При определенных перегрузках в кабине оператора раздается сигнал. Все нарушения в работе, вызванные, например, погодными условиями, техническими неполадками и техническим обслуживанием, фиксируются: информация о них вводится оператором в устройство DIGS 3232, и они учитываются при вычислении средних показателей, что имеет важное практическое значение. Бортовая микро-ЭВМ позволяет автоматизировать различные режимы работы. Оператор управляет лишь движением экскаватора, а выемка, поворот и выгрузка осуществляются автоматически по заложенной в компьютер программе [74,75], причем во время подъема можно регулировать угол наклона ковша из условия минимальных потерь грунта (рис. 6.7).

В университете г. Карлсруэ (ФРГ) разработана система EMSI 3, построенная с учетом кинематики экскаватора и геометрических параметров технологического процесса. Центральным элементом

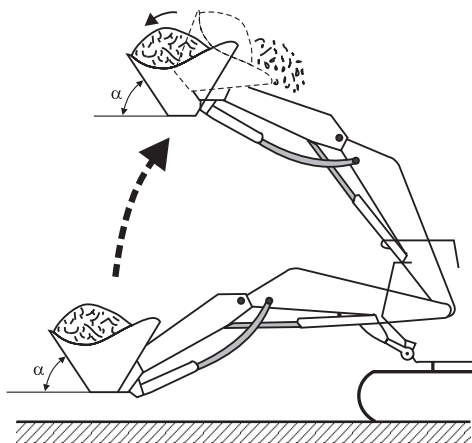


Рис. 6.7. Автоматическое управление положением ковша при выемке грунта

системы является микро-ЭВМ, с которой связаны система контроля горизонта (в данном случае она состоит из лазерного нивелира и фотоизмерителей), датчики различных параметров и элементы управления гидроцилиндрами, подключаемые к интерфейсу. Программа управления основана на эталонной модели. Сравнивая действительные значения физических параметров, измеряемых датчиками, с их заданными значениями, компьютер вырабатывает управляющие воздействия на электро-гидрозолотники и вентили гидропривода. Система обеспечивает повышение производительности труда на 20 % и значительно облегчает работу оператору.

Повышению качества выполнения работ способствует устройство для автоматического контроля положения стрелы экскаватора [77]. Оно содержит датчики положения, смонтированные на элементах стрелы и основании машины, цепь управления с микропроцессором и элементы сигнализации о достижении стрелой предельного положения. Датчики определяют как взаимное положение стрелы и машины, так и положение машины относительно поверхности, по которой она передвигается. Электрические сигналы датчиков поступают в цепь микропроцессора, соединенного с запоминающими устройствами, регистрирующими положение стрелы, и с переключателями. С их помощью оператор устанавливает предельные положения стрелы и имеет возможность постоянно сравнивать действительное положение стрелы с предельным. При достижении стрелой предельного положения микропроцессор включает систему блокировки стрелы, световые и звуковые устройства, расположенные внутри и снаружи кабины оператора.

Фирма «Hitachi» (Япония) оснастила свой экскаватор УН-16, имеющий ковш вместимостью 1,6 м<sup>3</sup>, массу 41 т, двигатель мощностью 184 кВт и вылет ковша 11,97 м, обеспечивающий глубину копания 7,73 м, автоматизированной системой управления на базе микро-ЭВМ. Система позволяет контролировать и сигнализировать режимы работы дизеля и гидросистемы в зависимости от реальных нагрузок на двигателе и рабочих органах экскаватора, создать безаварийные условия работы двигателя и переводить его в режим холостого хода и в результате сократить расход топлива на 10—15 %. Видеотерминал НСМ-1 позволяет следить за движением и расположением ковша, его заполнением и нагрузками, вести учет вынутого грунта, ограничивать движение ковша заданной зоной и предупреждать об опасных уклонах [78] .

С октября 1986 г. фирма «Hitachi» выпускает новую серию гидравлических экскаваторов типа EX, в которых широко применяются электронные управляющие элементы для постоянного контроля всех рабочих параметров, таких, как давление масла в смазочной системе двигателя, напряжение генератора, температура охлаждающей жидкости, проницаемость фильтров и так далее. Контроль осуществляется посредством монитора, установленного в кабине. Электроника используется также для постоянного согласования частоты вращения вала двигателя с мощностью гидронасоса, т. е. частота вращения вала двигателя неизменно приводится в соответствие с выходной мощностью гидронасосов. Возможно управление различными режимами работы при использовании гидравлического экскаватора для выполнения легких, средних и тяжелых работ, при различных скоростях движения, а также автоматическое регулирование частоты вращения вала двигателя при простое экскаватора. Эти параметры можно заранее выбрать на приборной панели. Различным управляющим элементам дано обозначение ETS (Electronic Total Control System) — «электронная система полного управления». Это шаг к созданию думающей машины — экскаватора, наделенного искусственным интеллектом [74].

Фирма «Hitachi» предлагает также другое дополнительное электронное устройство для экскаваторов с эксплуатационной массой 12—40 т. Однако датчики, являющиеся его составной частью, могут быть установлены только при изготовлении новой машины. Этот «вычислительный монитор» (Computing Monitor) благодаря электронному контролю позволяет максимально использовать кпд экскаватора. Производительность машины при копании и погрузке увеличивается без какого-либо ущерба для безопасности производства работ.

Контроль рабочих параметров, сбор данных и их анализ при помощи микро-ЭВМ играет важную роль в гидравлических экскаваторах «Mannesman Demag Baumaschinen» (Германия). Устройство «Detronic Eco» информирует оператора об экономичности работы машины. Оператор ориентируется по световой полоске с зеленой зоной (до 100 %) и красной зоной, означающей перегрузку. Прибор регистрирует очень продолжительное и частое движение при максимальном противодавлении. При помощи измерительного устройства Detronic ELM определяется и регистрируется производительность гидравлического экскаватора при погрузке. По давлению в гидроцилиндрах и программе, введенной в данное

устройство, точно определяется масса материала, находящегося в ковше. Для контроля за состоянием двигателя разработано устройство Comrusave, позволяющее определять различные параметры при работе двигателя внутреннего сгорания; давление масла в коленчатом валу, температуру охлаждающей жидкости, давление охлаждающей жидкости и частоту вращения. В настоящее время фирма приступила к выпуску экскаваторов с программированием рабочих операций. Как считают специалисты, это повысит производительность, надежность, безопасность и рентабельность экскаваторов [74].

#### 6.3.2. Автоматизация бульдозеров

Дальнейшее совершенствование конструкций бульдозеров связано с внедрением электронных систем контроля и управления их работой [79—81]. Фирмы «Caterpillar» и «Komatsu» устанавливают в качестве стандартного оборудования на мощных тракторах электронные системы управления работой двигателя и трансмиссии. Это дает возможность сокращать разрыв в производительности бульдозеров, управляемых машинистами различной квалификации при одновременном снижении расхода топлива [76, 82].

Работа такой системы основана на анализе технологических особенностей, для чего оператор вводит систему в режим обучения, установив переключатель на панели приборов в положение «Обучение», и осуществляет разработку грунта в ручном режиме, меняя скорости движения и заглубления отвала. В течение этого времени бортовой компьютер получает информацию от смонтированных на машине датчиков и анализирует ее. После перевода переключателя в положение «Управление» отвал поднимается и заглубляется автоматически, обеспечивая производство работ в автоматическом режиме. Благодаря применению системы на бульдозере средней мощности, управляемом опытным оператором, производительность труда возрастает на 13,6 % при одновременном снижении расхода топлива на 13 %. У мощных бульдозеров производительность возрастает на 25 %, а расход топлива сокращается на 32 %.

Использование бортовой компьютерной системы для управления бульдозером обеспечивает плавное изменение скорости его движения, высокую маневренность и прямолинейность движения в автоматическом режиме. На рис. 6.8 приведена упрощенная блок-схема, отражающая принцип построения электронной сис-

темы управления гидросистемой бульдозера типа PR 722 [73]. Дизельный двигатель приводит в действие обе гусеницы с пропорциональным электрическим управлением. Частота вращения вала двигателя задается при помощи потенциометра, а действительное ее значение измеряется тахогенератором. Оба сигнала подаются на вход блока управления бульдозером, осуществляющего включение, контроль, регулирование и представление информации о рабочих параметрах. Кроме того, на вход блока подаются сигналы с датчиков скорости гидродвигателей, а при помощи замыкающего выключателя задается ход вперед или назад. На выходе блока вырабатываются сигналы для гидронасосов, гидродвигателей, тормозного вентиля, а также сигнальных ламп («Помехи», «Рабочий режим»).

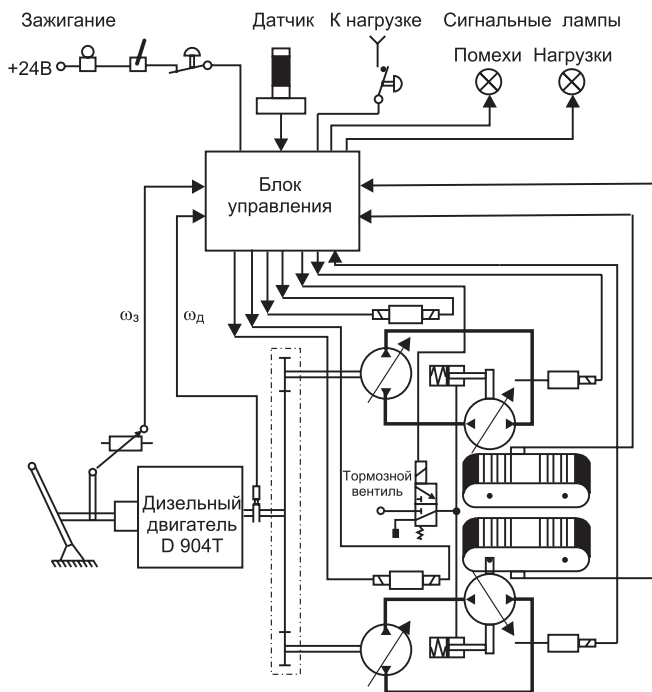


Рис. 6.8. Блок-схема системы управления бульдозером PR 722  
 $\omega_з$  — заданное значение частоты вращения вала двигателя;  $\omega_г$  — действительное значение частоты вращения вала двигателя.

### 6.3.3. Автоматизация погрузчиков

В погрузчиках для контроля различных параметров электронные приборы применяются давно. С появлением микропроцессоров появилась возможность автоматизировать функции регулирования, и даже управления. В колесном погрузчике PL 10 В и в гусеничном погрузчике PL 14 Е фирмы «Fiatallis Baumaschinen» (Германия) впервые были установлены мониторы данных, через которые посредством специальных датчиков запрашиваются и в наглядной форме сообщаются оператору рабочие параметры. Например, информация о давлении масла, уровне масла и топлива, температуре, засорении фильтров, неполадках сообщается оператору мигающим предупредительным световым сигналом и одновременно зуммером. Монитор данных, оснащенный системой оптической и звуковой предупредительной сигнализации, упрощает техническое содержание (отпадает необходимость в ежедневном контроле за уровнем масла) и повышает качество контроля за функционированием агрегатов (давление масла, температура). Благодаря непосредственной индикации неполадок повреждения влекут за собой незначительные последствия.

Фирма «Case Poclairn» (Великобритания) разработала мобильную электронную систему для измерений и проверки, благодаря которой техники, занимающиеся техническим обслуживанием колесных погрузчиков, могут снимать и документально фиксировать все важные для надежного функционирования машины параметры: давление, перепады давления, объемную подачу, частоту вращения и температуру. Здесь также применяют электронику для более точного управления рабочими операциями и регулирования насосов соответственно требуемой мощности. При этом одной из главных целей является дальнейшее снижение потребления топлива в сокращении эксплуатационных расходов [74].

Фирма «Pfreundt» (Германия) выпускает специально для колесных погрузчиков всех типов электронное устройство, регистрирующее массу груза в ковше. Измеренные значения выводятся на индикаторное устройство в кабине водителя, складываются, что очень удобно для оптимального использования грузоподъемности самосвала и печатаются на карточке. О чрезмерной загрузке ковша оператору сообщается посредством особой индикации и одновременно аварийным сигналом зуммера.

Определение нагрузки на машину производится измерением нагрузки на стреле колесного погрузчика, при этом точность из-



мерения колеблется в пределах 1% массы груза в ковше. Данное устройство может быть дополнительно установлено на всех известных колесных погрузчиках без внесения в них каких-либо существенных изменений. При приобретении нового колесного погрузчика не возникает особых проблем с установкой данного устройства. Оно может быть установлено также на вилочных погрузчиках, отвальных самосвалах и бетоновозах. Особое достоинство этого устройства фирмы «Pfreundt» в том, что оно удовлетворяет требованиям регламентирующих положений, касающихся взвешивания материалов. Колесный погрузчик может одновременно выполнять функцию официально признанных весов и печатать карточки с указанием массы, что явно ускоряет процесс погрузки, поскольку отпадает необходимость в поездке к весам и простаивании в очереди на взвешивание.

Аналогичная система, получившая название Microload, разработана фирмой «Exco Instruments Ltd.» (Великобритания). Она обеспечивает автоматическую индикацию каждого ковша перегружаемого материала и суммирование измеренных величин, что также служит для контроля загрузки грузового автомобиля или самосвала. Здесь также отпадает необходимость в последующем взвешивании грузового автомобиля. Система Microload суммирует измеряемые величины в течение продолжительного промежутка времени, поэтому без проблем можно снять показания — объем погрузки за день или неделю.

В устройстве Microload датчики, измеряющие давление, установлены в гидравлических подводящих линиях подъемных цилиндров ковшовой стрелы. Благодаря применению специальных контрольных выключателей измерение полезной нагрузки ковша всегда производится в одном и том же положении стрелы, обычно в ее горизонтальном положении. В начале работы колесного погрузчика прежде всего происходит автоматическая проверка самого устройства Microload (о неполадках оператору сообщается посредством кода). Затем оператор может ввести в него любую «целевую полезную нагрузку», например, в случае загрузки бункеров, грузовых автомобилей, ленточных транспортеров. Из этой величины вычитается масса каждого последующего ковша перегружаемого материала, пока Microload не покажет, что перегружено достаточное количество материала. Этот процесс отсчета до нуля может повторяться столько, сколько необходимо. Поскольку взвешивание и учет могут производиться автоматически во время езды, то такие устрой-

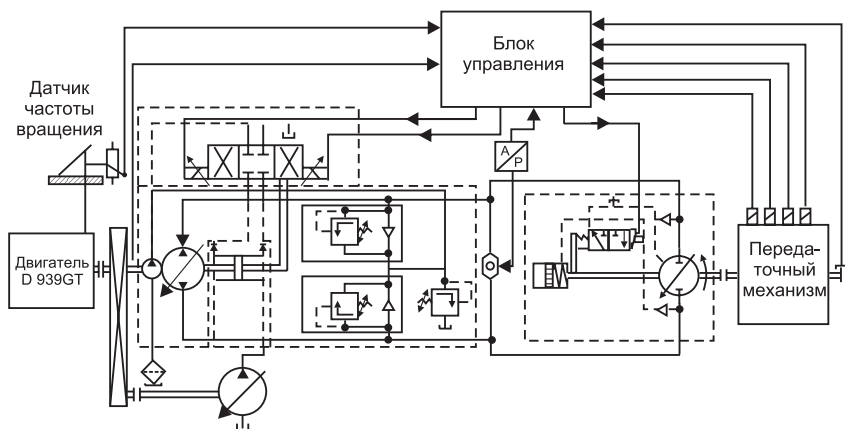


Рис. 6.9. Блок-схема микропроцессорной системы управления погрузчиком

ства идеально пригодны для использования на объектах, на которых выполняются крупные объемы перегрузочных работ.

Блок-схема микропроцессорной системы управления приводом колесного погрузчика показана на рис. 6.9. В качестве задающей величины для блока управления служит сигнал с потенциометра, пропорциональный задаваемому значению частоты вращения приводного вала дизельного двигателя. Кроме того, на вход блока подаются сигналы о действительных значениях частоты вращения и давления в гидросистеме. Блок осуществляет контроль, регулирование и управление гидросистемой, передаточным механизмом и обеспечивает плавное перемещение машины, загрузку, подъем и выгрузку ковша. Система непрерывно представляет информацию обо всех основных параметрах в кабину водителя.

## 6.4. Роботизированные комплексы для выполнения свайных работ

В последние годы при выполнении свайных работ достигнута производительность труда, которая еще недавно казалась невозможной. Предпосылкой этому стало современное буровое оборудование. За счет применения индивидуального гидропривода все сопутствующие процессу бурения работы сведены до минимума, а физически тяжелые операции, выполняемые обычно вручную,

полностью исключены. Конца столь стремительному развитию буровой техники в обозримом будущем не предвидится. Электронные системы контроля и управления облегчают работу бурового мастера за счет автоматизации как основных, так и вспомогательных технологических операций.

Автоматические средства для учета параметров бурения обеспечивают выбор и поддержание оптимальных значений параметров бурения на основании результатов оценки геологических и геомеханических исследований. Предпосылкой для возможности измерения показателей бурения являются вариации тесно связанных с геологическими свойствами грунта параметров. Известно, что подача и скорость вращения бурового инструмента зависят от твердости грунта. По их значениям можно судить о наличии щелей, пустот, скальной крошки.

Измерительный инструмент для учета параметров бурения состоит из регистрирующего прибора и связанных с ним датчиков физических величин, установленных на буровой установке и обеспечивающих выдачу информации в цифровой или графической форме. Отображение результатов на дисплее оператора позволяет ему судить об актуальном состоянии процесса бурения и оптимизировать технологический процесс. Кроме основной информации на экране представляются дополнительные данные, например, о глубине нахождения бурового исполнительного инструмента. Сохранение информации в памяти бортового компьютера производится постоянно. Наряду со значениями параметров бурения запоминаются также дата, время и номер буровой машины. Число измерительных датчиков определяется количеством и типом подлежащих измерению параметров. При этом речь идет о датчиках глубины, давления, числа оборотов, перемещения, колебаний и т. д. Все они являются водонепроницаемыми, прочными и выполненными таким образом, чтобы их обслуживание было возможным для персонала установки.

К числу наиболее совершенных буровых установок, используемых при устройстве свай, относится установка фирмы Bauer (Германия). Ее управление осуществляется в автоматизированном режиме (рис. 6.10). Буровая часть состоит из привода вращения, буровой штанги и бурового инструмента. Гидравлической рабочей жидкостью она снабжается от базовой установки.

Буровой инструмент в виде силовой сверлильной головки во время выполнения рабочей операции крепится к буровой штанге.



*Рис. 6.10. Насадка буровой установки FLY DRILL*

Для опорожнения оболочки, в которой находится исполнительный орган, она отводится в сторону и механизм зажима открывается [83]. За счет использования подвесного каната работа может осуществляться при меняющихся значениях высотных отметок и рабочего радиуса (рис. 6.11), например, при устройстве свай в откосах. Буровой инструмент может крепиться к мачте при помощи дополнительного домкрата. При этом могут выполняться вспомогательные работы (крепление трубы с вибратором, установка армирующей оболочки, исполнение грейферных функций) без демонтажа бурового инструмента. Система FLY DRILL может использоваться в комбинации с аэролифтным устройством (для утяжеленных буровых труб и буропроеходческого инструмента). За счет этого становится возможным устройство свай в смешанных грунтах (обычный и скальный грунт) посредством одного испол-

Цилиндрическая оболочка подачи

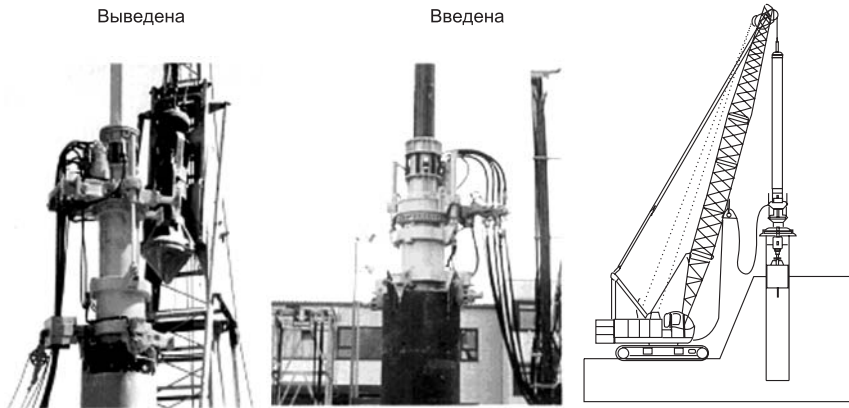


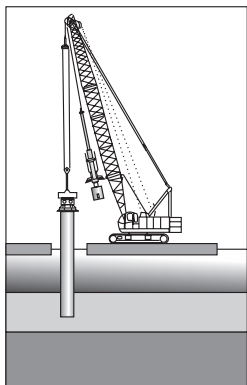
Рис. 6.11. Цилиндрическая оболочка подачи системы FLY DRILL

нительного устройства (рис. 6.12). Буровой мастер контролирует в своей кабине показатели технологического процесса. Все функции оборудования реализуются в режиме автоматизированного управления. Наряду с аналоговыми индикаторами информации в распоряжении оператора имеются два жидкокристаллических дисплея, являющихся элементами системы программного управления (СПУ). СПУ осуществляет контроль параметров состояния установки и вырабатывает на их основании необходимые управляющие сигналы (рис. 6.13). Она позволяет предупреждать перегрузку буровой штанги, наматывание каната на барабан или развитие чрезмерного усилия, когда на пути встречаются пустоты или мягкие включения грунта.

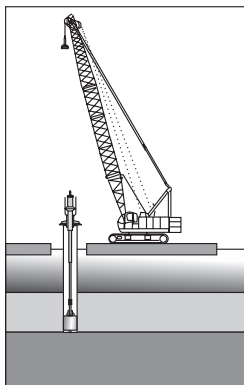
Автоматически измеряются значения глубины бурения, наклона мачты, а также силы на главном и вспомогательном канатах и эта информация через компьютер представляется на дисплее. Для измерения наклона мачты используются сенсоры без механических элементов, не требующие за собой ухода и работающие без помех [84].

Для измерения всевозможных параметров бурения при различных способах работы применяются как компьютер, так и графический дисплей. Например, при устройстве железобетонных свай измеряются давление бетона и другие величины контура сваи, а значения величин представляются на графическом дисплее, рас-

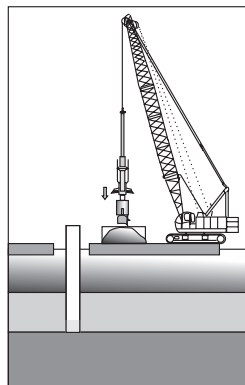
1. Бурение в нормальном грунте



Крепление оснастки

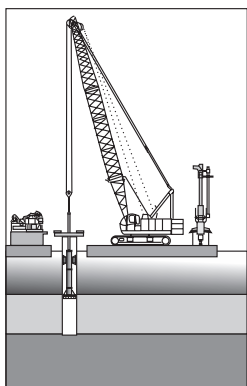


Бурение

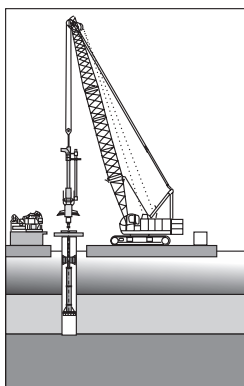


Удаление грунта

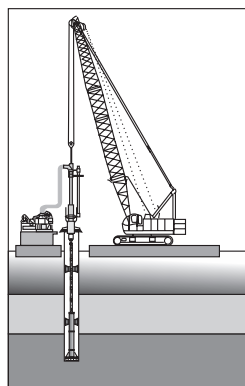
1. Бурение в скальном грунте



Установка буровой головки и штанги



Установка оснастки с гидро-устройством



Бурение с гидропромывом

Рис. 6.12. Технологический процесс с системой FLY DRILL

печатываются с помощью принтера или запоминаются для дальнейшего использования. Компьютер обеспечивает также представление текстовой информации при сборке и обслуживании установки, подачу предупреждающих сигналов и всевозможных помехах и способах их устранения. Функции контроля, управления и коммуникации являются также гибко программируемыми и могут расширяться.

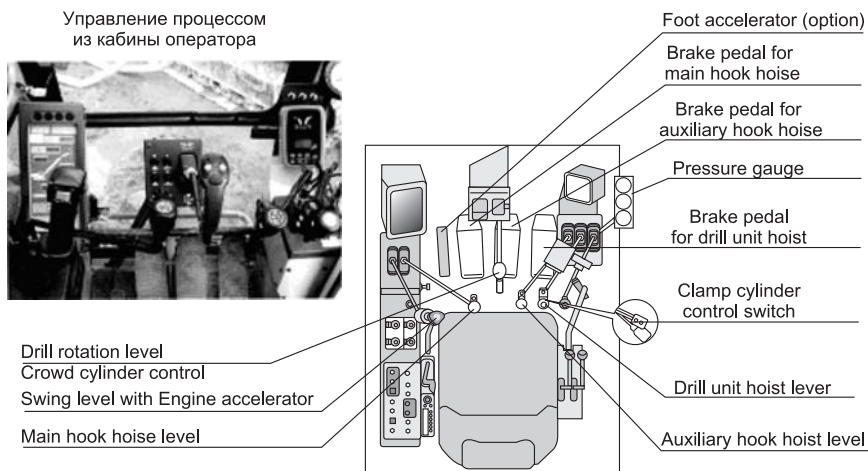


Рис. 6.13. Программное управление системой FLY DRILL

Эффективно использование роботизированных буровых установок для проходки шпуров, колодцев и скважин различного назначения. Основу таких роботов составляет машина на гусеничном ходу и многозвенный манипулятор с гидроприводом. На рис. 6.14 представлен робот-землекоп RX2000-2 фирмы «Hitachi Construction Machinery Co., Ltd» [85]. На гусеничной самоходной платформе установлен трехзвенный гидравлический манипулятор, который снабжается вибромолотом и буром. Машина отличается компактностью, что дает возможность работы в узком участке. Она снабжена системой управления, реализованной на микроконтроллере, позволяющей свободно перемещать рабочий инструмент в вертикальном или в горизонтальном направлении. Основное преимущество многозвенного робота-землекопа — обеспечение линейного движения рабочего инструмента. Ручное управление таким движением представляет достаточно трудную задачу, требующую специальных навыков. Результирующая погрешность позиционирования не превышает  $\pm 50$  мм.

Применение роботов и создание на основе сваебойных агрегатов РТК, оснащенных лазерными системами контроля, позволяет автоматизировать процесс забивки свай, их подрезки. В состав комплекса включается сваебойная установка, робот для подачи свай и их подрезки со сменным рабочим органом. На рис. 6.15 приведен пример такого комплекса, оснащенного лазерной систе-



мой контроля. Аппаратура контроля состоит из лазерного излучателя ЛИ, фотодатчика ФД и панели контроля ПК. Для задания проектной оси забивки свай вдоль нее направляется лазерный луч. На мачте 1 сваебойной установки монтируется фотодатчик, фиксирующий положение луча в горизонтальной плоскости. Установка мачт выполняется в створе луча. При забивке свай до заданной отметки фотодатчик размещается на наголовнике и фиксирует положение луча в вертикальной плоскости. Если лазерный луч используется только для задания горизонтального уровня

погружения свай, то в этом случае его удобно разворачивать в плоскость, располагая лазерный прибор за пределами рабочей площадки. Контроль срезки свай под проектную отметку также целесообразно проводить при помощи лазерного прибора, задающего горизонтальную плоскость. Относительно этой плоскости и выполняется контроль за положением рабочего органа 3 установки. Фотодатчик ФД размещается на рабочем органе. Информация с фотодатчика поступает в систему управления комплексом и используется для установки свай и рабочего инструмента в заданное положение. С помощью лазерного луча задаются разбивочные оси и высотные отметки при забивке и подрезке свай. Кроме того, лазерный луч, развернутый в вертикальную плоскость, позволяет контролировать вертикальность погружения свай и положение направляющей-мачты копра. При сооружении свайных фундаментов лазерное визирование в сочетании с линейными измерениями в направлении разбивочных осей позволяет автоматизировать процесс установки свай в заданное место и их погружения до заданной отметки. Использование лазерной системы в составе РТК позволяет автоматизировать процесс разбивки свайного поля, передвижение оборудования и его ориентирование в новой точке по створу разбивочных осей. Автоматизация процесса погружения

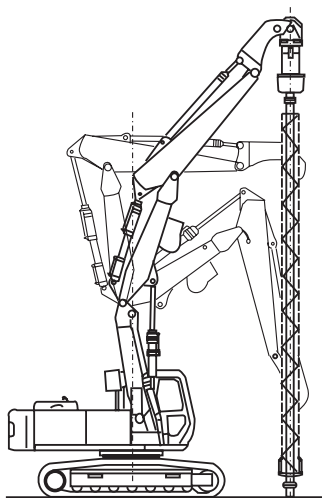
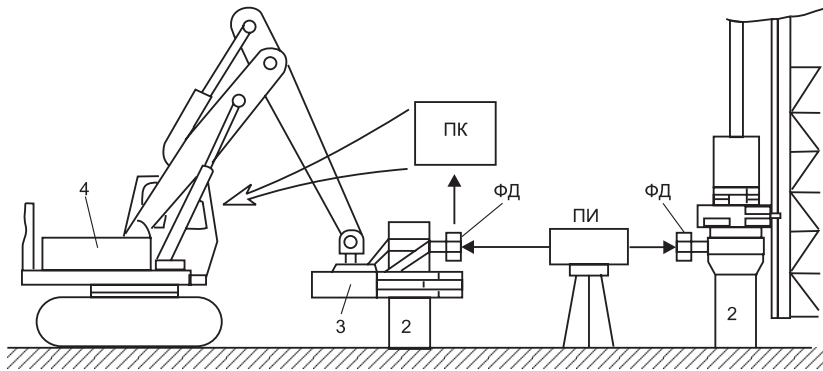


Рис. 6.14. Робот-землекоп  
RX2000-2





*Рис. 6.15. Роботизированный комплекс для свайных работ  
1 — сваебойная установка; 2 — свая; 3 — рабочий орган; 4 — робот  
для подачи, установки и подрезки свай; 5 — лазерная система  
контроля*

свай на основе роботов и лазерных систем позволяет значительно улучшить качество возведения фундаментов, повысить производительность труда и сократить сроки выполнения работ.

# **Глава 7. Роботизация установки и монтажа строительных блоков и элементов**

## **7.1. Краны-манипуляторы**

Операции по захвату, переносу строительного элемента к предназначенному месту монтажа, выверке и фиксации там могут с высокой точностью выполняться при помощи манипуляторов. Использование их совместно с кранами обеспечивает существенное расширение функциональных возможностей. Выполнение монтажных операций становится возможным без применения традиционных средств крепления. Такие системы называются кранами-манипуляторами. При этом исполнению узла между несущим элементом (крюком крана, несущим канатом) и средством крепления (в данном случае — схватом) придается особое значение.

Каждая механическая система подобного крана-манипулятора состоит из звеньев. Соседние звенья образуют элементарные пары, которые в манипуляционных системах обладают только одной степенью подвижности (степенью свободы): одной поступательной или одной вращательной относительно оси элементарной пары. Число степеней подвижности определяется числом интегрированных кинематических пар. В общем, механическая система манипулятора представляет собой открытую кинематическую цепь с закрепленной базой. Для отдельных движений требуются устройства с индивидуальным приводом.

Для подъема строительной детали от места строповки к месту ее установки необходимо иметь как минимум три степени свободы: одну вертикальную и одну горизонтальную поступательные, а также одну горизонтальную вращательную степень свободы. Для произвольной пространственной ориентации строительного изделия посредством ориентирующего звена манипулятор должен иметь шесть степеней подвижности. В московской строительной академии, например, разработаны различные кинематические схемы, которые в зависимости от рода соединения между краном и манипулятором выполнены с жесткой связью или канатным подвесом (рис. 7.1) [7].

На рис. 7.1а приведена схема, представляющая собой комбинацию из самоходного шасси и поворотного вертикального звена-башни. Перемещаемое вдоль стрелы подвижное звено состоит из трех телескопических секций с закрепленным на последней выдвинутой секции ориентирующим органом.

В отличие от этого вариант, представленный на рис. 7.1б, характеризуется наличием поворотной телескопической опоры, предназначенной для дополнительной опоры стрелы крана-манипулятора на перекрытие монтажного горизонта с целью подавления случайных отклонений монтируемого элемента от воздействия ветровой нагрузки.

На рис. 7.1с показана схема с перемещаемым несущим основанием, поворотным вертикальным звеном-башней, подвижной относительно стрелы и башни горизонтальной траверсой, связанной с перемещаемым канатами контргрузом, и с двумя пространственными полиспадами. Ориентирующий орган имеет возможность смещаться вдоль траверсы.

Схема на рис. 7.1д включает в себя подвижное шасси с глобальной степенью подвижности; поворотную башню; два подвижных вдоль башни горизонтальных звена-стрелы, имеющих привод поворота в плане, уравнивающие друг друга посредством соединения канатами. На каждой стреле установлен подвижный ориентирующий орган. В результате процесс монтажа из циклического превращается в непрерывный.

Схема на рис. 7.1е характеризуется тем, что на одном вертикальном поворотном звене-башне установлены две стрелы с возможностью индивидуального раздельного привода и две противовесных консоли. По каждому горизонтальному звену перемещается ориентирующий орган. Его движение осуществляется посредством индивидуального привода с противовесной консоли, в зоне которой происходит захват груза. Кинематическая схема, показанная на рис. 7.1ф имеет самоходное основание; поворотную башню; подвижные относительно башни стрелы и рукояти. Отличием схемы на рис. 7.1г по сравнению с предыдущей является то, что она предназначена для стрелового крана-манипулятора, а ориентирующий орган снабжен телескопическим устройством для временной опоры.

Особенность кинематики ориентирующего органа, представленного на рис. 7.1н, заключается в том, что жестко захваченный объект за счет одновременного сдвига и вращения в трех взаимно

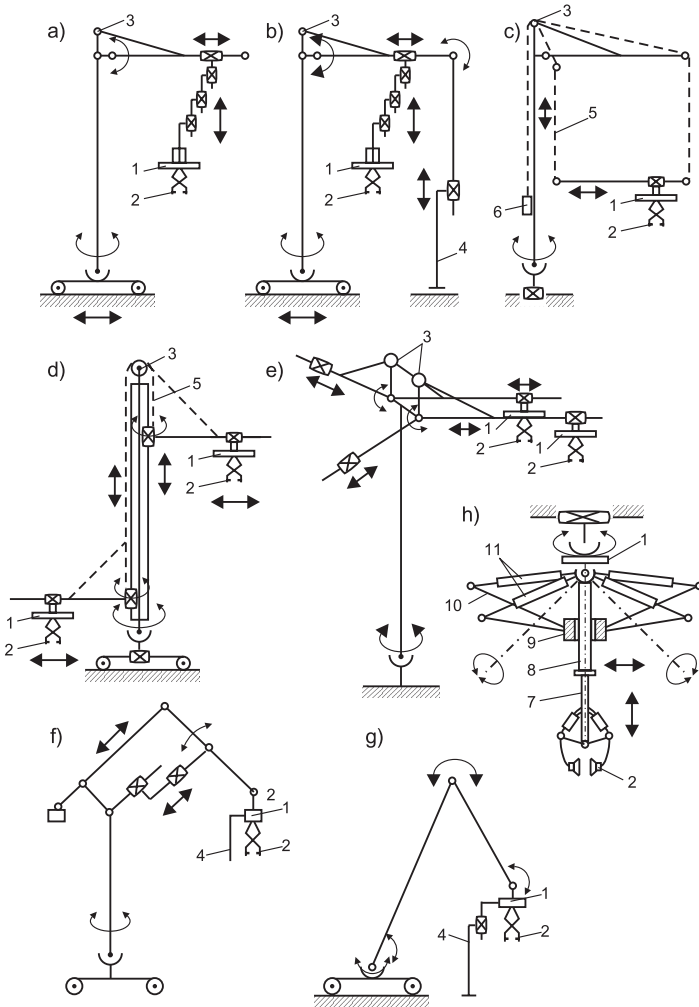


Рис. 7.1 — Кинематические схемы кранов-манипуляторов с различными типами связи между устройством транспортировки и ориентирующим органом:

a,b,d — с жесткой связью; c,e — с комбинированной связью; h — ориентирующего органа с схватом; f,g — с жесткой связью для манипуляторов в стреловом исполнении; 1 — ориентирующий орган; 2 — схват; 3 — блок; 4 — устройство для опоры; 5 — канат; 6 — подвижный контргруз; 7 — шток; 8 — силовой цилиндр; 9 — ползун; 10 — тяги; 11 — горизонтальные цилиндры

перпендикулярных осях может быть перемещен в любое положение. Кроме того, отклонения перемещаемого объекта от вертикали могут постоянно корректироваться.

Из такого многообразия кинематических решений может быть выделена схема, представленная на рис. 7.1с. Принцип действия подобного крана-манипулятора можно пояснить с помощью рис. 7.2 [7]. Он содержит башню 2, смонтированную на ходовой части 1, грузовую стрелу 5 с полиспастом 6 и противовесной консолью 4, траверсу 7, подвешенную на канатах грузового полиспаста пирамидальной формы 10, опорно-поворотный круг 3, грузовую тележку 9. К последней жестко присоединена верхняя часть 8 поворотного механизма 11. К нижней опорной части 12 поворотного механизма 11 закреплены радиально расположенные в горизонтальной плоскости сдвоенные гидроцилиндры двойного действия 13. Подвижные концы сдвоенных гидроцилиндров сведены в одну точку — центр перемещения их продольных осей, к которому посредством шарового шарнира присоединен вертикальный ориентирующий гидроцилиндр 14. На наружной поверхности последнего в обхват смонтирован ползун 15, соединенный жесткими тягами 16 одинаковой длины со штоками 24 радиально расположенных попарно гидроцилиндров 13. Шток 23 вертикального гидроцилиндра 14 соединен при помощи силовых цилиндров 17, их штоков 18, рычагов 19, оси вращения 20 с грузозахватным приспособлением 21. Грузозахватное приспособление обеспечивает жесткий захват монтируемого элемента 22.

Этот кран-манипулятор предназначен для монтажа крупногабаритных элементов. Траверса 7 подается в зону их расположения. При помощи ходовой части 1 и стрелы 5 грузозахватное приспособление подводится к строительному элементу 22 и жестко захватывает его. При помощи полиспастов 10 производится подъем траверсы 7 и одновременно с этим поворачивается стрела 5, грузовая тележка 9 подает ориентирующий орган и монтируемый элемент 22 на монтажный горизонт. Посредством поворотного механизма 11 производится разворот в горизонтальной плоскости. Точное позиционирование осуществляется при помощи радиально расположенных в горизонтальной плоскости гидроцилиндров двойного действия 13, ориентирующего вертикального гидроцилиндра 14 и ползуна 15. В зависимости от направления и величины отклонения от вертикали, возникающего в грузовом полиспасте крана-манипулятора, посылаются сигналы команды на меха-

низмы 12, 13, 15, которые реализуются в кратковременные импульсы с убывающей частотой и амплитудой со знакопеременной направленностью по отношению к основным движениям. Отклонения от заданных значений составляют  $\pm 1$  см. Заданные значения достигаются после двух-трех шагов точного позиционирования в течение от 1 до 3 с.

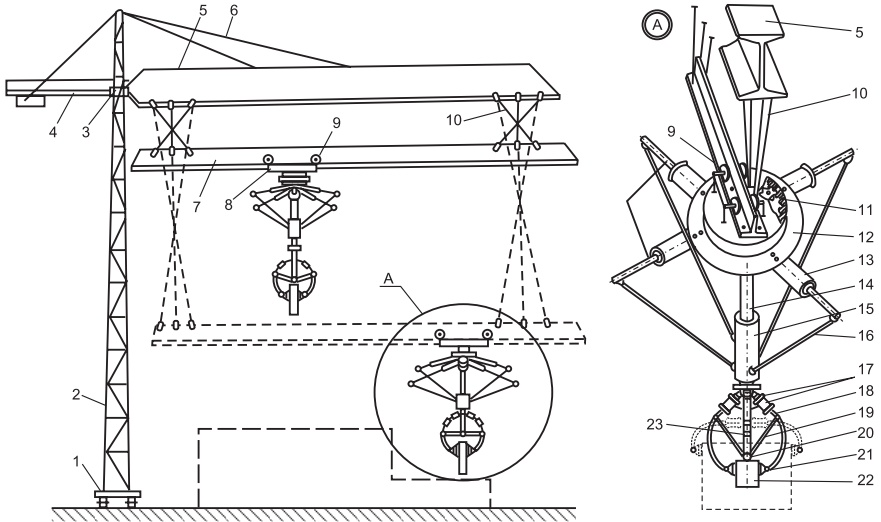


Рис. 7.2. Схема монтажа конструкций при помощи крана-манипулятора

Обычные строительные краны предназначенные для выполнения простых транспортных операций и для точного выполнения монтажных операций нуждаются в повышении степени управляемости.

Предназначенный для монтажа элемент, раскачивающийся на гибком канате, не может быть установлен непосредственно путем управления краном.

Одним из возможных решений является использование специальных траверс (рис. 7.3), обеспечивающих возможность дистанционного управления процессом позиционирования и юстировки положения монтируемого элемента [86].

Фиксировать положение груза в пространстве, предотвращая его свободные колебания во всех плоскостях и разворот под действием ветровых нагрузок, позволяет использование приводных лебедок, регулирующих в обоих направлениях длину и натяжение удерживающего каната. Такая конструкция представляет собой гибкий манипулятор с дистанционным управлением (рис. 7.4). На башенных кранах лебедки и отводные блоки устанавливаются на башне, а на самоходных кранах — на стреле. Аппаратура управления, включающая блок магнитных пускателей, релейно-контактную схему и пульт управления, размещается в кабине машиниста. Сократить в 1,5 раза продолжительность монтажа крупнопанельных зданий и повысить качество работ позволяет башенный кран,

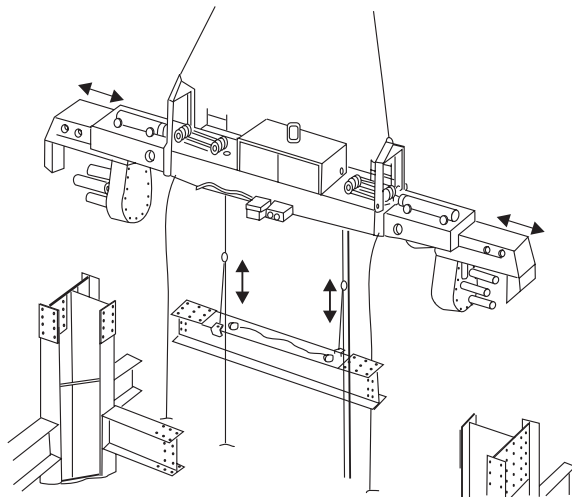


Рис. 2.3. Монтажная траверса

снабженный манипулятором и накопительным устройством. Этот кран содержит две стрелы: основную 1, с грузовой тележкой и установленным на ней манипулятором 2, и вспомогательную неподвижную стрелу с перемещающейся по ней кареткой (рис. 7.5). Кроме того, кран содержит повороттно-передаточное устройство 4, выполненное в виде кольцевой рамы с шестью парами кронштейнов для подвешивания к ним специальных траверс с элементами, которые выполняют функцию магазинного устройства. Конструкция этого крана позволяет выполнять одновременно операции по подъему одних элементов и установке в проектное положение других. При такой конструкции крана элементы, поступившие на строительную площадку, разгружаются с помощью вспомогательной стрелы и подаются ею в магазинное устройство, где они навешиваются на кронштейны. Необходимый для монтажа элемент снимается манипулятором с кронштейна магазинного устройства, транспортируется им вдоль основной стрелы к месту установки и ориентируется там в заданное положение. Недостатком такой схемы является высокая подвижность самого крана, поэтому очень сложно добиваться требуемой точности монтажа.

Высокую стабильность ориентирующего органа обеспечивает подвесная система, Stewart-Platform, разработанная в США [87].

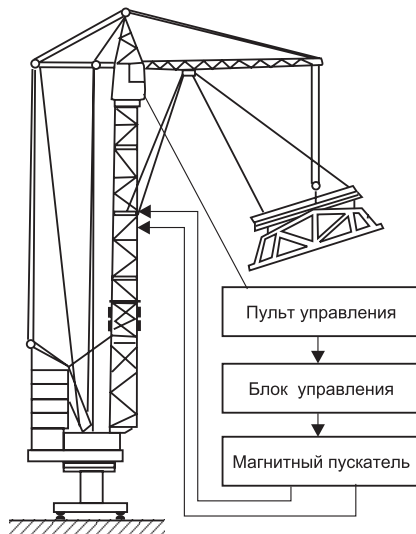


Рис. 2.4. Башенный кран с дистанционным управлением



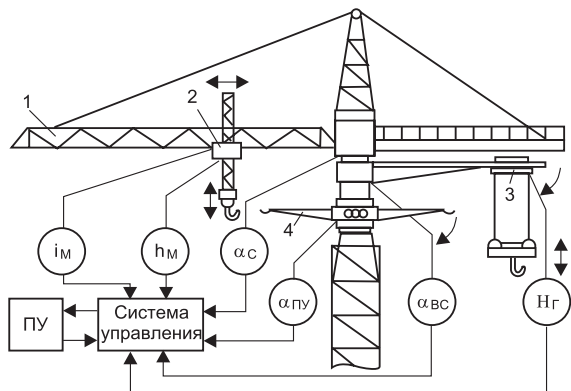


Рис. 7.5. Кран с накопительным устройством

Система состоит из двух ориентируемых друг относительно друга платформ (рис. 7.6). Каждая из них имеет три точки для подвески связывающих их стальных канатов. Длина каждого каната может регулироваться по отдельности при помощи индивидуальных электрических сервоприводов. Управление канатами системы осуществляется крановщиком с помощью джойстика, причем на мониторе компьютера отражается актуальное положение нижней

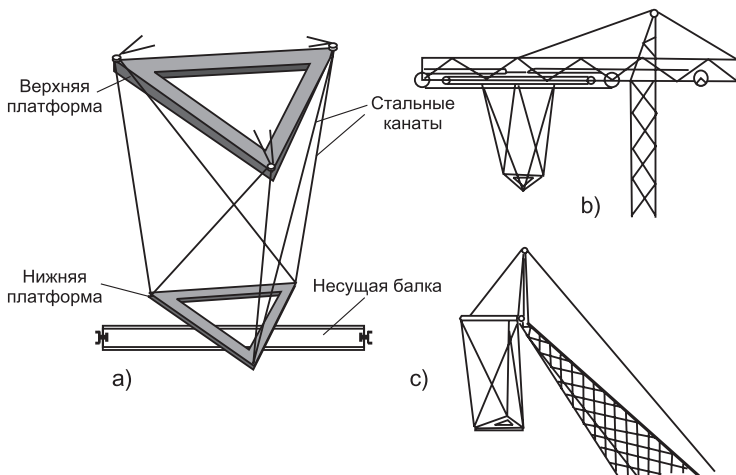


Рис. 7.6. Система Stewart-Platform

*a* — с несущей балкой; *b* — башенный кран с грузовой тележкой;  
*c* — башенный кран с игольчатой стрелой

платформы (рис. 7.7). Сигналы обрабатываются по заложенной в компьютер программе и, вследствие этого, корректируется положение платформ. Сервоприводы регулируются непосредственно с компьютера. В зависимости от конкретных условий и задач может производиться оптимизация программы работы. Изменения в нее вносятся при помощи клавиатуры.

В последние годы для решения проблемы перемещения без раскачивания подлежащих монтажу крупногабаритных элементов при помощи строительных кранов все шире стала использоваться теория синтеза систем автоматического регулирования методами нечеткой логики. Построенные таким способом регуляторы обеспечивают в автоматическом режиме ограничение амплитуды отклонения груза от вертикальной оси траверсы, что особенно важно с учетом требований по технике безопасности проведения строительно-монтажных работ.

Из опыта японских разработчиков известна комбинация из строительного крана и расположенного на монтажном горизонте манипулятора для монтажа колонн (рис. 7.8) [88]. Важным для

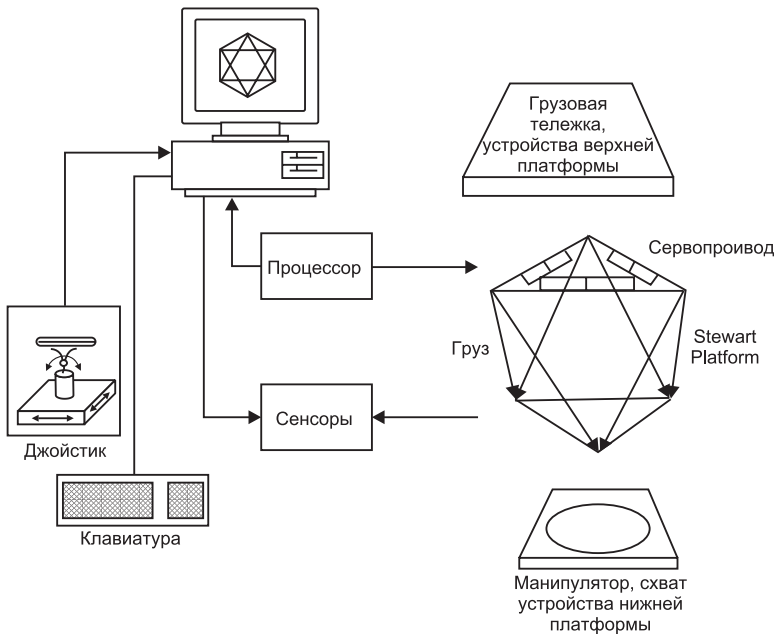


Рис. 7.7. Схема системы управления Stewart-Platform

функционирования этой системы является согласование работы крана и манипулятора. Управление роботом и краном выполняется с общего выносного пульта одним оператором. Передача команд управления может осуществляться по инфракрасному каналу или радиоканалу связи. Команды управления с выхода приемного устройства поступают через блок синхронизации на станцию управления механизмами крана и аппаратуру управления робота. Аналогичное взаимодействие крана и манипулятора возможно при осуществлении монтажа опор, плит перекрытий, лестничных маршей, монтаже и демонтаже строительных лесов, а также при выполнении работ по сносу и реконструкции зданий и сооружений.

Расширенная комбинация подобного решения представляет собой систему, состоящую из строительного крана и манипулятора для установки строительных конструкций с дополнительным манипулятором для нанесения раствора. Последний связан с растворным узлом. На рис. 7.9 приведена схема роботизированного комплекса для монтажа панелей наружных и внутренних стен и

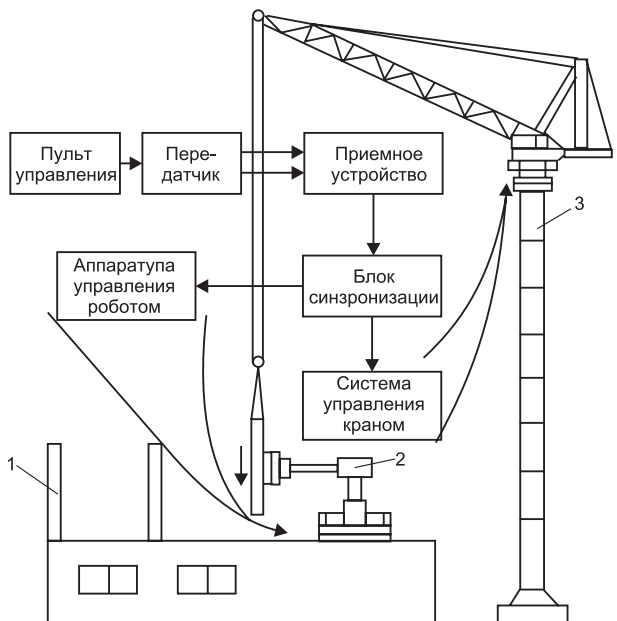


Рис. 7.8. Система кран-манипулятор для монтажа колонн  
1 — колонна; 2 — манипуляционный кран; 3 — кран

перекрытий жилищных сооружений. В состав комплекса входят: башенный кран, специализированный монтажный робот с двумя манипуляторами, растворная станция. Комплекс обеспечивает автоматизацию всех основных операций: подъем и подачу панелей к месту монтажа; нанесение раствора; выверку и установку панелей; герметизацию швов. Монтажный робот снабжен подвижной платформой и выдвижными опорными консолями. Обслуживание манипуляторов осуществляется при помощи пульта дистанционного управления с инфракрасным каналом связи.

Использование кранов-манипуляторов дает возможность неограниченной пространственной ориентации и установки строительных конструкций с заданной точностью. По сравнению с обычными кранами с традиционными грузозахватными устройствами ориентирующий орган крана-манипулятора закреплен на «жесткой кинематике», чтобы обеспечить жесткий захват подлежащих монтажу конструкций. Управление всеми механизмами, включая строительный кран, производится при помощи компьютера. Монтаж панелей происходит последовательно начиная с базовой, образуя замкнутые пространственные ячейки.

Все большее развитие при роботизации строительных работ получает использование на стройплощадке целого комплекса из автоматов и роботов. Для координации их работы требуется разработка соответствующих коммуникаций и строгое соблюдение не-

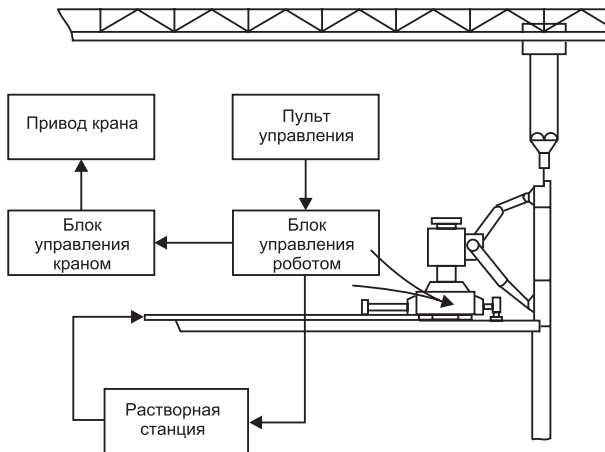


Рис. 7.9. Комплекс манипуляторов с краном для монтажа панелей

обходимой последовательности выполнения операций. Значительные успехи в данном направлении достигнуты в Японии, где разработаны почти полностью автоматизированные системы монтажа высотных зданий и сооружений. На рис. 7.10 представлена схема построения подобной системы. Интересно, что первоначальной причиной ее создания явилась просто нехватка в высококвалифицированной рабочей силе в строительной отрасли. Однако, постепенно такие критерии как качество и экономичность здесь приобрели решающее значение. Из-за столь обширной и глубокой роботизации монтажных работ, требования к персоналу изменились примерно на 90%. В будущем основным контингентом на стройплощадке должны стать высококлассные техники и программисты, обслуживающие и программирующие роботы. Представленная система объединяет практически все технологические операции, выполняемые при возведении зданий и сооружений. Ее пример показывает насколько значителен достигнутый прогресс в области автоматизации строительства и создания эффективных роботов, с учетом подлежащих обязательному решению сложнейших технических и технологических задач.

Наибольшие сложности на пути окончательного решения проблемы создания автоматизированной стройплощадки связаны,

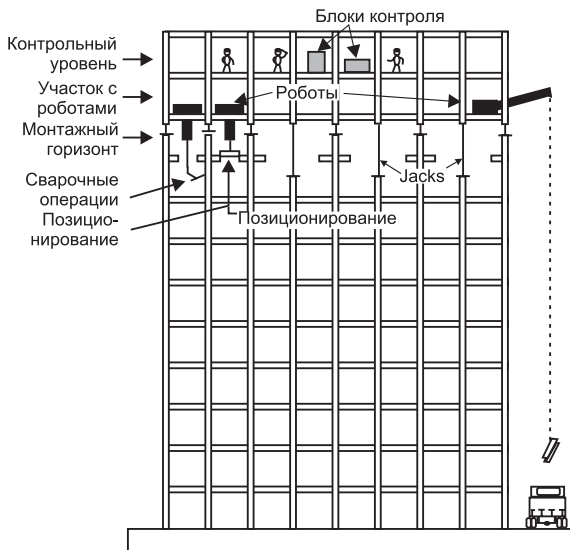


Рис. 7.10. Роботизированный строительный комплекс

прежде всего, с созданием программного обеспечения, позволяющего всем механизмам полностью интегрироваться в протекающий технологический процесс. Каждый автомат должен быть в состоянии работать с разной оснасткой, гибко реагируя на изменяющиеся виды подлежащих исполнению работ.

В ходе выполнения монтажных операций требуется задание разбивочных осей и постоянный контроль положения строительных элементов и конструкций. Широкое применение для данных целей нашли лазерные приборы и системы, способствующие автоматизации этих процессов. Монтаж ленточных фундаментов, стеновых панелей, перегородок, подвесных потолков, колонн, подкрановый путей — только некоторые из областей их использования. Для автоматического контроля положения монтируемого элемента относительно проектной оси, задаваемой лазерным лучом, используются фотоизмерительные устройства, позволяющие определять направление и значение его отклонения. Наиболее простым фотоприемным устройством является датчик из четырех фотодиодов (ФД1–ФД4), расположенных на двух взаимно перпендикулярных осях (рис. 7.11). Устройство закрепляется на монтируемом элементе. Оно включает в себя также оптическую матрицу,

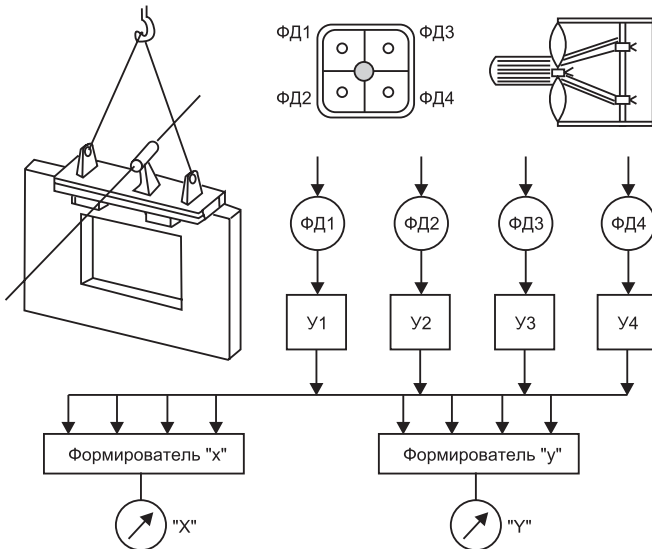


Рис. 7.11. Система автоматического контроля положения монтируемых конструкций

составленную из собирающих линз, направляющих световой поток на соответствующие фотодиоды. Последние преобразуют световой поток в электрические сигналы, которые усиливаются с помощью соответствующих усилителей (У1-У4) и попарно сравниваются относительно вертикальной и горизонтальных осей. На смену обычным фотодиодам в настоящее время приходят матричные фотодиодные панели, обладающие большой разрешающей способностью и точностью. Связанный с ними компьютер, обрабатывает поступающую информацию и выдает управляющие сигналы на исполнительные механизмы.

На рис. 7.12 показана схема монтажа стеновых панелей при использовании лазерной информационно-измерительной системы. На крайней угловой панели здания закрепляют штатив с лазерным прибором 1. При помощи цилиндрических уровней прибора лазерный луч ориентируется в горизонтальной плоскости и направляется на контрольную марку, установленную на другом конце разбивочной оси. Панель, предназначенная для монтажа, жестко захватывается траверсой 2, на которой установлены два фотодетектора 3. Сигнал с фотодетекторов поступает в блок индикации.

Применение лазерных систем контроля и дистанционного управления монтажными кранами позволяет упростить процесс монтажа, сократить время установки строительных элементов в проектное положение. При автоматизации процесса установки па-

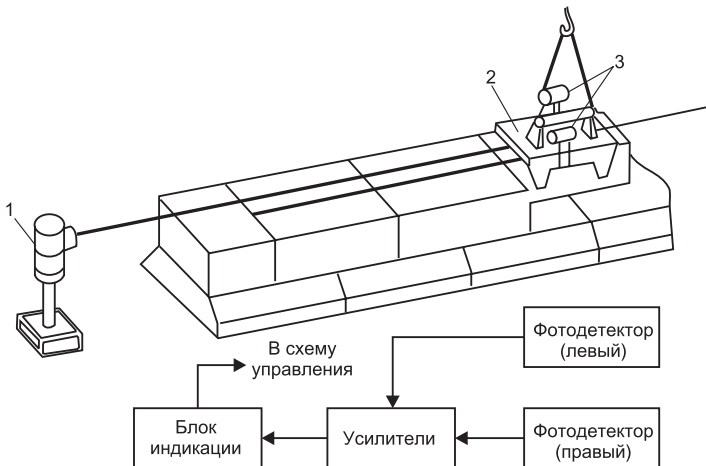


Рис. 7.12. Схема лазерной системы контроля монтажа панелей

нелей в проектное положение сигналы с фотодетекторов, пропорциональные значениям отклонений, передаются в систему управления монтажным оборудованием. Для передачи целесообразно использовать инфракрасный канал связи, при этом на траверсе размещается передающий полуконтакт, а на стреле крана — приемный.

## 7.2. Мини-краны

Вместо описанных кранов-манипуляторов на практике чаще всего встречаются более простые механизированные средства для перемещения подлежащих монтажу или укладке элементов. К ним относятся мини-краны или передвижные подъемные рабочие подмости, которые снабжаются схватом и обслуживаются одним человеком. Использование вспомогательных механизмов рекомендуется для перемещения подлежащих монтажу уложенных в штабели элементов, подаваемых краном на монтажный горизонт.

Каменные блоки захватываются за отверстия для схвата или углубления с лобовой стороны и надежно удерживаются за счет действия рычага. При этом возможны различные варианты захвата [89]:

- схват осуществляет захват каменного блока за счет углублений с лобовой стороны, ширина захвата составляет 1,2,3 или 4 блока;
- схват осуществляет захват каменного блока за счет отверстий также с лобовой стороны, ширина захвата составляет 1,2 или 3 блока;
- схват осуществляет захват каменного блока по его длине или ширине и берет лишь один блок;
- захватный механизм берет сразу много блоков вдоль их большей стороны на длину от 1 м до 3,6 м.

Принцип действия механизма для перемещения блоков и протекание рабочего процесса с его участием образцово описываются на примере изделий фирмы STEINWEG [90].

В качестве механизма для перемещения монтируемых элементов служит передвижной мини-кран с несущей способностью 300 кг (рис. 7.13). С его помощью может осуществляться кладка силикатного кирпича, пористых блоков и обжигового кирпича различных типоразмеров. Этот кран для захвата блоков снабжен различными подвешиваемыми цапгами и схватами. Они частично



могут переставляться по длине, чтобы настраиваться на различную длину каменных блоков.

Устройство для быстрой смены схватов соединено с блоком управления, который закреплен прямо на грузовом крюке подъемника. Подъемник работает с двумя скоростями, причем возможен точный подъем и укладка камня на раствор без столкновения с уже там находящимся. За счет этого возможно достижение ровной поверхности стены (рис. 7.14). При каждой рабочей операции схватом могут браться и удерживаться блоки общей длиной до 2 м. При высоте каменных блоков в 25 см за две операции укладывается поверхность стены площадью 1 м<sup>2</sup>. Обычно один такой механизм обслуживается двумя людьми. Первый каменщик наносит раствор, укладывает и выравнивает блоки, второй — заботится о постоянном наличии блоков, раствора и анкеров. Он отвечает за смену захватного устройства.



*Рис. 7.13. Мини-кран*



*Рис. 7.14. Укладка блоков с помощью захватных устройств мини-крана*

Для эффективного применения механизмов и устройств перемещения необходимо детальная подготовка работ, выполняемых на строительной площадке. В особенности это относится к следующим пунктам:

- инструктирование каменщика по применению устройств;
- проверка допустимой нагрузки на перекрытия и, при необходимости, дополнительное их крепление и поддержка приема нагрузки от штабеля блоков и механизмов их перемещения;
- подготовка двух или трех различных схватов для бесперебойной работы механизмов перемещения (например, установка нестандартных блоков, стесненные условия);
- подготовка таких вспомогательных средств, как шаблоны, ванночки для раствора, лестницы, передвижные двухступенчатые подмости или передвижные леса, деревянные клинья и т. д.;
- подготовка необходимых переходных нестандартных каменных блоков;
- размещение штабелей таким образом, чтобы был возможным захват блоков с предназначенной для этого стороны.

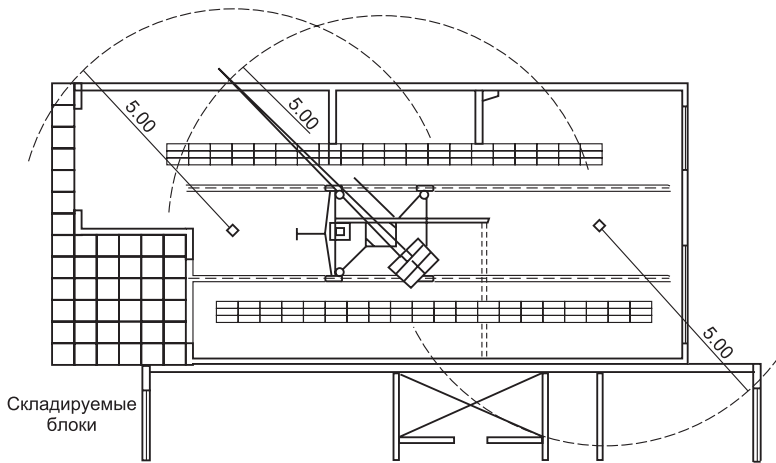


Рис. 7.15. Размещение штабелей с блоками при работе с механизмами перемещения

На рис. 7.15 показано совмещение рабочей зоны механизма перемещения каменных блоков с местом положения штабелей. Блоки с силикатным кирпичом размещены параллельно оси перемещения перекатываемого механизма и возводимым стенам, причем таким образом, что исключаются слишком большие перемещения несущей платформы и углы поворота стрелы.

Подвоз и подача штабелей с материалом в числе прочих может осуществляться при помощи самосвалов. Подача блоков на рабочий горизонт может производиться при помощи башенного крана (если он имеется на строительной площадке), автокрана или, иногда, самим механизмом для перемещения каменных блоков (здесь необходимо принимать во внимание его максимальную грузоподъемность) [91].

### 7.3. Кинематические решения строительных роботов для каменной кладки

Кинематическая схема манипулятора определяется в зависимости от вида и условий выполнения монтажных операции. Для перемещения монтируемого элемента, как правило, необходимо иметь 6 степеней свободы. При этом манипулятор состоит из 3 основных и 3 вспомогательных осей. Основные оси служат для

перемещения элемента в пространстве, а вспомогательные для корректировки его в месте установки и имеют незначительное влияние на размеры рабочего пространства. Манипулятор должен обладать способностью захватывать подлежащие монтажу элементы, складываемые в непосредственной близости от мобильной платформы, на которой он размещен. Размеры рабочей зоны манипулятора определяются местами складирования и монтажа или укладки элементов. Для манипулятора на неподвижной платформе наиболее благоприятным вариантом является возможность вращения относительно своей главной оси с углом разворота не менее  $330^\circ$  (рис. 7.16). При этом схват можно перемещать по наиболее благоприятной траектории, так как нет существенных ограничений на его движение. Количество вариантов кинематических схем трехзвенного манипулятора определяется комбинациями поступательного (Т) и вращательного (R) движений относительно основных осей. Как известно, простые звенья содержат две кинематические пары. Для каждой оси поступательного перемещения имеется возможность перемещения в направлениях X, Y или Z, а для каждой оси вращения, соответственно, вращения A, B- и C. Оси, в зависимости от выбранной кинематической схемы (рис. 7.17), упорядочены по отношению друг к другу следующим образом:

- все взаимно перпендикулярны (1-0);
- первые две взаимно параллельны, третья перпендикулярна к ним (II-);
- последние две взаимно параллельны, третья перпендикулярна к ним (-II);
- первая и последняя взаимно параллельны, третья перпендикулярна к ним (1-1);
- все взаимно параллельны (III).

На рис. 7.17 представлены 20 наиболее оптимальных из 37 кинематических схем робота, подходящих для каменной кладки [92]. Из их анализа видно, что для стесненного рабочего пространства особенно подходят манипуляторы с тремя осями вращения. Они, в силу своей конструкции, в наименьшей степени подвержены собственным колебаниям и в них не возникает тормозных моментов, обусловленных собственным весом. В промышленности они нашли самое широкое применение и многие технические решения, касающиеся механики и управления, могут быть использова-

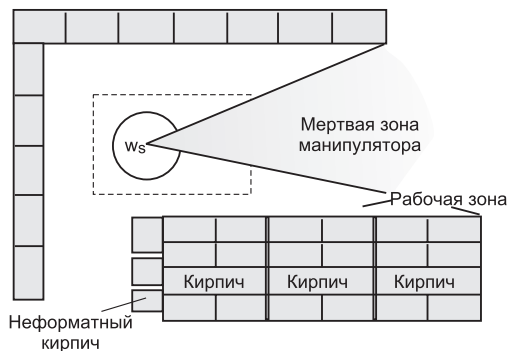


Рис. 7.16. Рабочая зона манипулятора для укладки кирпича

ны при их проектировании для выполнения строительно-монтажных работ. Габаритные размеры манипуляторов определяются условиями рабочего места, выбранной кинематической схемой и требуемым защитным исполнением робота. Минимальный рабочий объем, необходимый для размещения блока управления, гидропривода, усилителя мощности и других элементов оценивается в 1,2—1,4 м<sup>3</sup>. Оптимальные значения для длины лежат в пределах 1,2—1,4 м, при ширине 0,9 м. Высота его, в таком случае, должна составлять 1,0—1,2 м.

Рабочее пространство кубической формы может легко обслуживаться порталными роботами. Их предпочтительно использовать для переноски и установки больших масс и при необходимости выполнения больших объемов работ [93]. Особенности конструкции порталных роботов (рис. 7.18) делают затруднительным их применение непосредственно на строительной площадке. Особенно широко они применяются в цехах строительных предприятий при изготовлении стен, плит перекрытий и каменной кладке. Линейные направляющие порталного робота выполняются из алюминиевых профилей, по которым перемещается каретка при помощи ременной передачи. Профили защищены специальным корпусом. Приводные валы каретки должны иметь свободный доступ для обслуживания. Пыленепроницаемое исполнение профилей делает возможным применение такого робота в строительстве. Однако следует отметить характерные для него значительные моменты трения. Силовые моменты такого робота приведены на рис. 7.19.

Вид комбинации осей			Кинематическая схема	Вид комбинации осей			Кинематическая схема
TTT	ZYX	I—⊙		RTR	CZC	III	
TTR	ZYC	I—I			CZB	II—	
	ZYB	—II			CYB	—II	
TRT	ZCY	II—			CYA	I—⊙	
	ZBY	—II			CCZ	III	
RTT	CZY	II—			RRT	CBZ	I—I
	CYZ	I—I		CBY		—II	
TRR	ZCC	II—		CCB		II—	
	ZCB	III		CBC	I—I		
	ZBC	I—I		CBB	—II		

Рис. 7.17. Кинематические схемы манипуляторов для каменной кладки

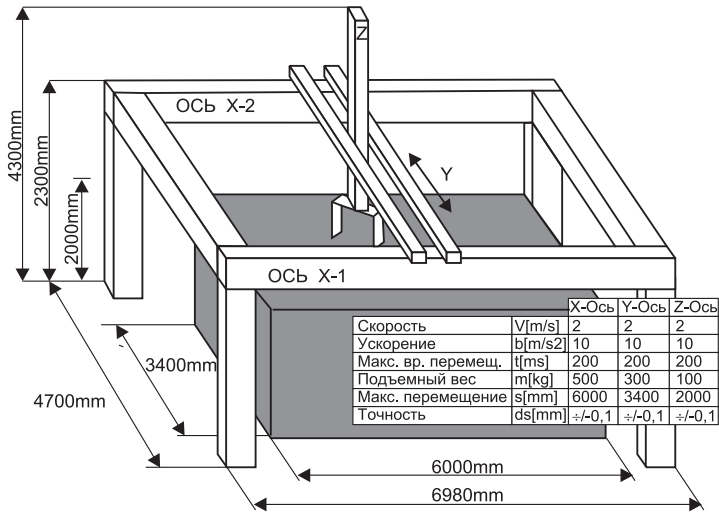


Рис. 7.18. Требования к техническим характеристикам портального робота

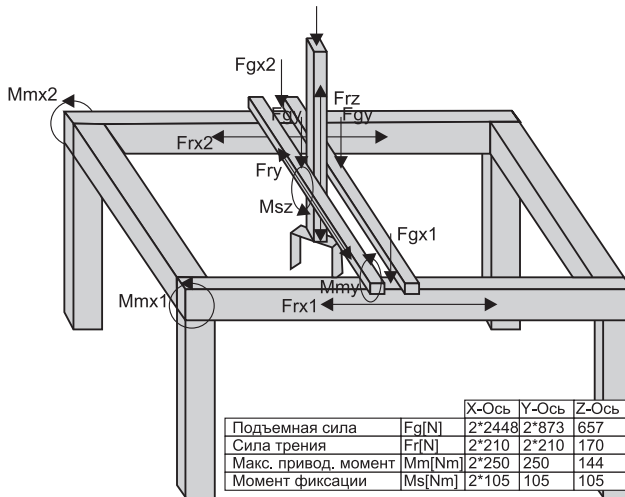


Рис. 7.19. Силовые моменты параметры монтажного робота портального типа

Начиная с середины 80-х годов на базе порталных роботов стали разрабатываться и успешно использоваться на предприятиях строительной индустрии роботизированные производственные системы. При изготовлении бетонных плит порталный робот в состоянии выполнять различные операции, например: монтаж опалубочной формы; укладка арматуры в формы; укладка бетонной смеси; выемка готовых изделий; демонтаж опалубочной формы.

### **7.4. Интеллектуальное управление в системах автоматизации строительных кранов**

Высокие требования к безопасности и надежности работы строительных кранов способствовали широкому внедрению в них микропроцессорных систем. Отличаясь компактностью и простотой установки, они довольно быстро стали вытеснять традиционные релейно-контакторные системы управления. Органы управления кранами являются особенно привлекательными с точки зрения использования микропроцессоров не только потому, что они могут быстро обрабатывать большой объем информации, но и потому, что система становится программируемой. Приспособление регулятора для новой области применения не требует новых принципиальных схем, дополнительных компонентов и различных электронных узлов. Выполнение новой функции может быть достигнуто с помощью нового программного обеспечения.

Разработанная фирмой «Wolf-Kran» (Германия) микропроцессорная система Crane-Control (CC90) позволяет сократить количество пауз в работе крана и представлять информацию об имеющихся помехах на пульте оператора [94], а также выводить показания о нагрузке на крюке и его высоте, угле поворота стрелы. Возможны оптимизация нагрузки и выбор наилучшей траектории переноса груза. При 95% возможной нагрузки на панели загорается желтая лампочка.

При использовании башенных кранов на крупных строительных объектах с большим количеством соседних построек, вблизи улиц с трамвайным движением или линий электропередач требуются дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности их работы. Фирма «Такэути комутен» (Япония) разработала эффективное устройство предупреждения столкновения кранов [95]. Устройство автоматически останавливает движение крана до того,



как произойдет взаимное касание установленных рядом кранов или касание с соседней постройкой.

На каждом кране устанавливается устройство контроля взаимного положения стрел кранов. Оно представляет собой единую систему операционных блоков управления (монитор и центральные процессоры), производит расчет положения каждого крана и осуществляет прием и выдачу сигнализирующей информации между кранами. Устройство предотвращения столкновения башенных кранов позволяет:

- вести взаимный контроль за положением одновременно шести кранов благодаря установке на каждом из них центрального процессора;
- применять устройство только для одного крана с обеспечением контроля за поворотом и вылетом стрелы;
- иметь три зоны контроля («нормального положения», «предупреждения» и «прекращения движения»), которые могут индцироваться лампами зеленого, желтого и красного цветов соответственно;
- задавать определенную зону «предупреждения»;
- наблюдать за грузом на телевизионном мониторе в зонах «предупреждения и прекращения движения» (одновременно подается звуковой сигнал).

Фирма «Касима Кэнсэцу» (Япония) разработала устройство наблюдения за комплексом башенных кранов. Оно может контролировать и наблюдать одновременно за 15 кранами, стоящими близко друг к другу, а также автоматически вести сбор данных о фактической их загрузке.

Преимущества данного устройства:

- применяется трехмерная система наблюдения и контроля безопасности для группы кранов. Она обладает более высокой эффективностью по сравнению с двухмерной системой;
- использование дисплея в кабине оператора позволяет ему иметь точное представление об обстановке на строительной площадке (отображает положение всех находящихся рядом кранов).

Фирма «Сумитомо дзюкикай» (Япония) освоила выпуск кранов с беспроводным дистанционным управлением посредством подачи унифицированных команд голосом. Правильность приема команды на пульте крана удостоверяется ее воспроизведением синтеза-

тором звука с передачей в наушники в течение 0,2 с после приема. Предусмотрена команда отмены предыдущей ошибочной команды. Периферийные устройства системы рассчитаны на прием до 20 различных команд с 15 индивидуальных голосов. Возможно управление с нескольких микрофонов и участием центральной ЭВМ [96].

Фирма «ЗВ6» (Италия) осуществляет серийный выпуск микропроцессорной системы управления, которая может быть смонтирована на самоходных кранах различной конструкции и контролирует работу и автоматическое повторение рабочих циклов [97]. Система включает в себя блоки постоянной и оперативной памяти, центральный процессор, датчики угла наклона и вылета телескопической стрелы, массы груза, поворота платформы и т. д., а также электронные регуляторы. Управление может осуществляться как из кабины крановщика, так и дистанционно с переносного электронного пульта.

Фирма «Liebherr» (Германия) разработала для самоходных кранов компьютерную систему LICCON (Liebherr Computed Controlling). Система автоматизации построена по принципу отклонения (рис. 7.20). Данные значения перемещения, угла и давления, хранящиеся в памяти компьютера, сравниваются с действительными значениями и на их основе система вырабатывает управляющие воздействия на исполнительные механизмы крана. Система исключает перегрузку крана и обеспечивает высокую безопасность работы. Она может работать в автоматическом режиме или по указаниям, вводимым через дисплей.

В управлении работой стреловых самоходных кранов значительную сложность представляет компенсация уровня груза при изменении вылета крюка. В процессе подъема стрелы необходимо непрерывно управлять грузовой лебедкой. Одновременное управление рычагами грузовой и стреловой лебедок является причиной повышенной утомляемости машиниста, а при некоторых видах строительно-монтажных работ, когда зона перемещений груза плохо видна из кабины крана, сложно даже для квалифицированного крановщика.

Фирма «Кобэ сэйкосэ» (Япония) разработала систему автоматической компенсации уровня груза для гусеничного стрелового крана с гидроприводом модели Р&Н 150, реализованную на базе управляющей ЭВМ. Система состоит из комплекта датчиков, управляющей ЭВМ, сервомеханизмов и блока управления. Преду-

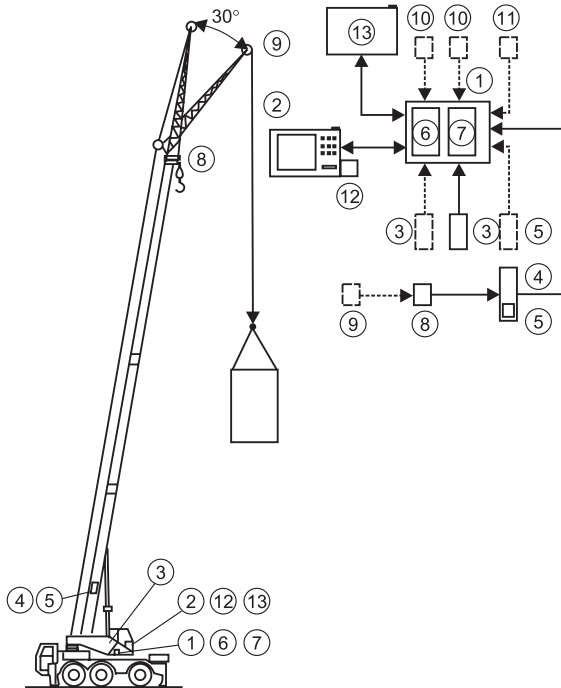


Рис. 7.20 — Блок-схема системы LICCON

1 — электронный блок; 2 — дисплей и панель обслуживания; 3 — датчики давления; 4 — датчики угла; 5 — датчик перемещения; 6 — бортовое электропитание; 7 — центральный микропроцессорный блок; 8 — выключатель подъема; 9 — резервный выключатель подъема; 10 — конечные выключатели; 11 — датчик ветровых нагрузок; 12 — выключатель; 13 — пульт управления краном

смотрены датчики наклона стрелы к горизонту, намотки канатов основной и вспомогательной грузовых лебедок, давления в гидросилителе механизма управления стрелой и частоты вращения вала двигателя. Блок управления обслуживает различные режимы работы крана, содержит дисплей, устройство ввода-вывода и оборудован визуальной и акустической сигнализацией. Система включает в себя математическую модель крана, учитывающую дополнительные факторы, влияющие на фактический уровень груза, такие, как прогиб стрелы, нелинейность характеристик управления механизмами крана и особенности работы его в различных режимах, что позволяет экстраполировать возникающие ситуации. В качестве

сервомеханизмов использованы магнитные вентили и пропорциональные редукционные клапаны, вмонтированные в контуры гидросилителей системы управления крана. В режиме автоматического управления вентили блокируют рычаги управления грузовыми лебедками, а пропорциональные клапаны обеспечивают управление гидрораспределителями в соответствии с подаваемыми ЭВМ командами. Одновременно с управлением грузовыми лебедками система регулирует стреловую лебедку, предотвращая возможность слишком быстрых некомпенсируемых перемещений груза стрелой. Управляющая ЭВМ типа 80А имеет объем оперативной памяти 64 кб, постоянной памяти — 3x128 кб, памяти таймера — 16 б и вырабатывает команды с периодичностью 50 мс.

При появлении непредвиденных препятствий имеется возможность перейти с автоматического управления на ручное. В случае превышения грузом предельно допустимого отклонения от заданного уровня срабатывают ограничители грузового момента, и механизмы крана отключаются.

Система ограничения грузового момента башенного крана фирмы «Liebherr» (Германия) состоит из центрального блока с микропроцессором, сервисного устройства с индикаторной панелью, измерителя осевого усилия, а также двух потенциометров для крановой тележки и подъемной лебедки [98]. Входными величинами для системы автоматизации служат сигналы с потенциометров, измерителя осевого усилия, а также задающие воздействия с сервисного устройства (рис. 7.21).

Выходными величинами системы являются сигналы о перегрузке, подаваемые в блок управления подъемным механизмом и крановой тележкой, а также аналоговые и цифровые сигналы для индикаторной панели. Функции по ограничению нагрузочного момента заключаются в постоянном сравнении имеющейся нагрузки с заложенными в микропроцессоре допустимыми значениями. Когда нагрузки приближаются к заданным в микропроцессоре, на сервисном пульте включаются предупредительные сигналы, а при достижении ими этих значений работа останавливается. В память процессора выносятся нагрузочная таблица, представляющая взаимозависимость нагрузок, высоты крюка и положения крановой тележки на стреле. Система может работать как в автоматическом, так и в режиме ручного управления, при этом крановщик пользуется сервисным устройством. На индикаторной панели представляются аналоговые и цифровые показания нагрузки

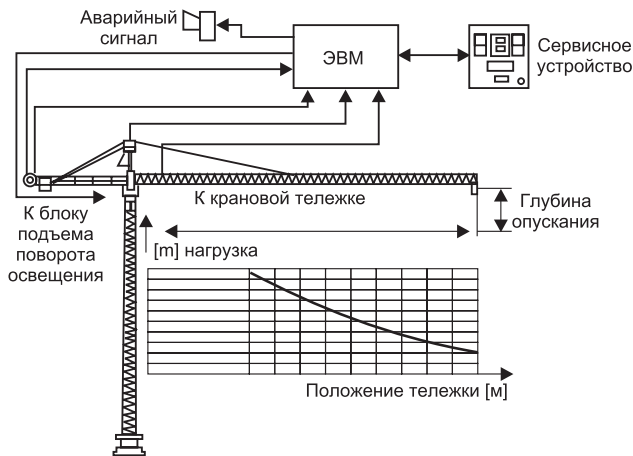


Рис. 7.21. Блок-схема электронной системы ограничения нагрузочного момента башенного крана «Liebherr»

и высоты крюка, а также еще 12 цифровых показаний о выбираемых по желанию оператора статических и геометрических параметрах (пороговых значениях нагрузки для различных отключающих реле, положении крановой тележки, погрешностях и т. д.). Все башенные краны фирмы «Liebherr», которые имеют подъемные механизмы с электромеханическим приводом, могут оснащаться этой системой ограничения нагрузок.

## 7.5. Роботизация процесса каменной кладки

Технология производства работ в современном строительстве во многих случаях подразумевает использование средств механизации. Степень внедрения роботов и манипуляторов остается, однако, довольно низкой. Обычные способы проектирования работ, применение традиционных строительных материалов и классических видов строительной техники частично или даже полностью исключают возможность применения роботов.

Исходя из этого, следует выбор:

- рациональной кинематической системы с соответствующей подвижностью манипулятора или робота;
- требуемых и допустимых размеров захватных средств;

- кинематических параметров для выбора подходящего вида привода для линейного сдвига, вращения, скорости и направления движения захваченных предметов;
- точности позиционирования в зависимости от типа устройства управления;
- мобильности робота или манипулятора.

На рис. 7.22 представлена примерная схема имеющихся взаимозависимостей при проектировании объекта строительства с учетом применения робота для каменной кладки стен [99, 100]. Значительное влияние на технические функции робота, беспроблемное протекание программы работ и связанное с этим их качество оказывают условия окружающей среды на месте выполнения работ.

При реализации мобильного робота на строительной площадке, основным является применение системы автоматического проектирования (САПР) для подготовки работ и обеспечения качества их выполнения. В процессе подготовки работ учитываются и обрабатываются данные для изготовления каменных блоков, требования по организации строительной площадки (оформление рабочих мест, размещение машин и материалов и т. д.) и программа работы робота. Исходя из результатов работы САПР строительного объекта стены программным путем разбиваются на отдельные секторы, укладка которых может осуществляться с одной позиции робота.

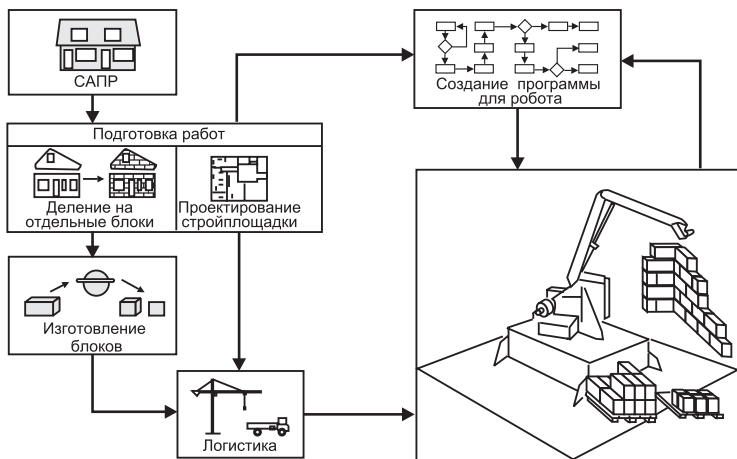


Рис. 7.22. Структура общей системы роботизации каменной кладки

Следующими этапами являются оптимизация рабочих позиций робота, оптимизация размещения штабелей с каменными блоками, а также положения блоков в этих штабелях. Выполнение автоматически разработанных программ происходит при помощи мобильной роботизированной системы, представляющей собой перемещаемое по стройплощадке транспортное средство (платформу) и робот с пятью осями подвижности, общей массой около 2 т. В качестве основных требований, предъявляемых к данной системе является грузоподъемность — около 300 кг при длительности рабочего такта 300 с или около 100 кг при его продолжительности около 30 с. К важнейшим параметрам роботов для строительного-монтажных работ относится число и вид степеней свободы кинематики. Большинство роботов (33,5%) обладает четырьмя степенями свободы. В качестве привода роботов преимущественно применяется гидравлический (43,4%) и пневматический (43,3%). Только 13,3% приходится на долю электропривода. Оценка экономичности применения роботов производится при помощи анализа затрат на основе калькуляции строительных работ. Использование роботов на строительном объекте возможно лишь при условии достижения экономического эффекта.

Проектирование строительного-монтажных работ с учетом применения роботов происходит следующим образом [101]:

1. Анализ проектной документации объекта, определение участков, где может идти речь об использовании роботов.
2. Сбор информации, необходимой для разработки роботизированных технологических комплексов, и группировка конструктивных элементов (деталей) строительного объекта согласно общим конструктивным и технологическим признакам.
3. Разработка предложений по унификации конструктивных элементов, определение условий для их изготовления с помощью роботов.
4. Расчет производственной программы.
5. Определение затрат труда при роботизированном варианте выполнения строительного-монтажных работ.
6. Определение последовательности операций.
7. Определение механизма функционирования технологической оснастки с учетом технических и технологических взаимосвязей, имеющих место в общем процессе выполнения строительного-монтажных работ.

8. Расчет производительности робота, точности и надежности выполнения операций.

9. Определение экономичности выбора оптимального варианта применения роботов.

10. Определение технических мероприятий по реализации роботизированных операций и формулирование технических требований к особым средствам технологической оснастки.

11. Проектирование и изготовление технологической оснастки с последующим ее монтажом.

12. Подготовка технологической документации для внедрения роботов.

Выполнение отдельных шагов, состав задач и последовательность их решения зависит от вида и особенности строительно-монтажных операций. В качестве примера на рис. 7.23 показана возможная человеко-машинная система для укладки каменных блоков [102]. Манипулятор может управляться как оператором с помощью дистанционного управления, так и автоматически.

Мобильный робот и штабель каменных блоков подаются строительным краном на то место строительной площадки, которое предписано планом производства работ. После выполнения ориентации на месте робот автоматически перемещается в рабочую позицию. Действительные значения его положения сравниваются с заданными значениями. Определенные отклонения являются значениями корректировки для последующего управления роботом и учитываются при обработке в соответствующей программе.



Рис. 7.23. Автоматическая кладка камня



При возможных относительно больших неточностях установки робота и штабеля в исходные позиции строительным краном их положение корректируется вручную, а затем предпринимаются меры по исключению неточностей в первоначальной установке. После захвата определенного каменного блока со штабеля осуществляется его переноска к месту укладки. Точное позиционирование осуществляется устанавливающим устройством, которое предназначено одновременно для компенсации возможных неточностей всей системы.

Применение роботов и манипуляторов для каменной кладки может быть успешным при выполнении следующих требований:

- способность интегрироваться в условиях строительной площадки: возможность работы на строительной площадке, как при возведении новых зданий, так и при ремонте старых;
- многофункциональность: возведение внешних и внутренних стен, способность манипулировать со всеми известными стройматериалами (строительный и силикатный кирпич, бетонные блоки), согласование со всеми необходимыми технологическими процессами (разного рода растворами и т. п.);
- гибкость: способность реализовать любую конфигурацию;
- простота: возможность беспроблемного включения в строительный процесс, малые затраты на обслуживание;
- экономичность: высокая производительность, малые затраты по эксплуатации;
- интеграция с управляющим компьютером, при наличии такового на строительной площадке;
- мобильность: рабочая зона робота в стационарном положении всегда ограничена размером его руки, чтобы обеспечить возможность обслуживания всего необходимого рабочего пространства, манипулятор необходимо снабжать мобильной платформой;
- малые габариты: имеющееся в распоряжении рабочее пространство ограничено специфическими условиями строительной площадки, как, например, потолками или пространством для открытия дверей, это влияет на выбор кинематической схемы и геометрические размеры робота;
- малая масса: несущая способность этажных перекрытий, являющихся рабочей поверхностью робота, всегда ограничена (обычно  $500 \text{ кг/т}^2$ ), собственная масса робота должна, в соответствии с этим быть минимальной;

- прочность: прочное исполнение робота, с учетом специфических условий строительства (пыль, грязь, вибрация, непогода), является необходимым;
- высокая грузоподъемность: с точки зрения экономичности строительства требуется применение возможно более крупных по формату блоков, грузоподъемность робота должна составлять минимум 50 кг;
- заменяемость инструмента: при работе с каменными блоками различных размеров и применении разных технологий их укладки требуется простая и быстрая заменяемость инструмента;
- безопасность: робот и обслуживающий его персонал должны быть в достаточной степени защищены посредством специальных защитных устройств;
- эффективное управление: для реализации необходимых траекторий движения требуется наличие чрезвычайно эффективных систем управления.

В Германии разработана дистанционная система управления мобильным манипулятором (рис. 7.24) с частично автоматизированными рабочими функциями [103]. Манипулятор в состоянии укладывать каменные блоки размером 100x65 мм. Оператор осуществляет управление перемещением платформы и подводом ее к штабелю с блоками. Робот берет блок и перемещается к месту его укладки. Там он поднимает его до необходимой высоты, разворачивается и выдвигает руку манипулятора. Ориентирование относительно стены и определение координат блока происходит при помощи датчиков. Точное позиционирование осуществляется оператором. Энергоснабжение обеспечивается гибким кабелем, постоянно перемещаемым вместе с рабочей платформой. Нанесение раствора выполняется вручную. Недостатком такого манипулятора, также как и рассмотренных нами уже мини-кранов, является необходимость для достижения экономической эффективности от его использования наличия большого объема многократно повторяющихся однотипных операций. Существует не так много сооружений, где экономически обосновано его применение. Оператор полностью занят управлением и не имеет возможности выполнять одновременно еще какие-либо функции. Основным же достоинством данного робота является высокая точность позиционирования при укладке каменных блоков, что позволяет, уже на такой хоро-

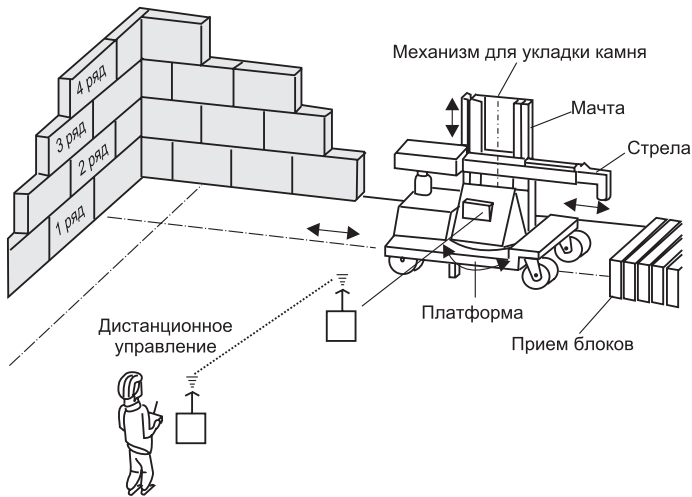


Рис. 7.24. Мобильный робот с дистанционным управлением

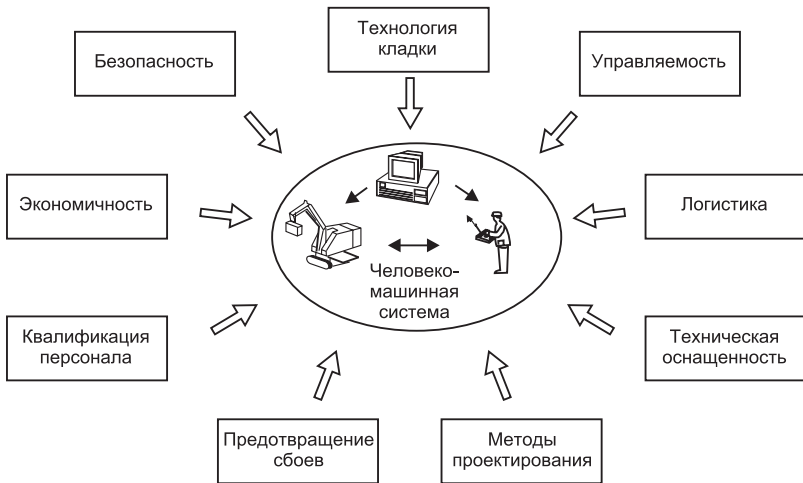


Рис. 7.25. Факторы, влияющие на процесс автоматизированной кладки кирпича

шей основе, продолжить разработки, направленные на дальнейшее облегчение труда каменщика.

Важнейшие факторы, влияющие на процесс автоматизированной кладки кирпича на строительной площадке представлены на

рис. 7.25. Одной из важнейших функций мобильного робота для кладки кирпича является полностью автоматическое нанесение раствора. Если рассмотреть этот процесс, то можно установить два различных принципа его реализации:

1. Нанесение раствора на верхнюю поверхность уже уложенного кирпича путем перемещения вдоль нее роботом специальной растворной ванночки.
2. Нанесение раствора на нижнюю поверхность кирпича перед его укладкой. Для этого он перемещается роботом, являясь слегка погруженным в раствор специальной ванночки.

На рис. 7.26 в верхнем ряду показаны два способа согласно первому принципу нанесения, а во втором ряду два варианта, соответствующие второму принципу нанесения раствора. При нанесении материала при помощи сопла основная проблема заключается в равномерности нанесения раствора. Эта проблема, обусловленная неравномерностью подачи материала, особенно проявляется вначале и в конце работы. При интеграции этих способов в роботизированную технологию каменной кладки возникают следующие проблемы:

- шланг для подвода материала должен прокладываться вдоль звена манипулятора. Наполненный раствором шланг представляет собой существенный дополнительный вес (в зависимости от протяженности шланга и вида раствора от 50 до 100 кг), что значительно нагружает приводные оси и снижает полезный груз робота;
- гибкости шланга недостаточно, чтобы соответствовать 6—7 степеням подвижности манипулятора. Особенно проблематично это в зоне исполнительного устройства;
- необходимость постоянной смены исполнительного устройства (захватное устройство/сопла) для нанесения раствора и укладки кирпича влечет за собой значительные потери рабочего времени и снижает экономичность всей системы.

При использовании растворной каретки еще одним недостатком является ее ограниченная емкость. Ее хватает для нанесения раствора лишь на один кирпич и необходимость частого ее заполнения также мешает протеканию технологического процесса. При заполнении каретки раствором при помощи шланга, проложенного вдоль звена манипулятора, возникают такие же проблемы, как и при использовании сопла. Этим недостаткам лишены способы,

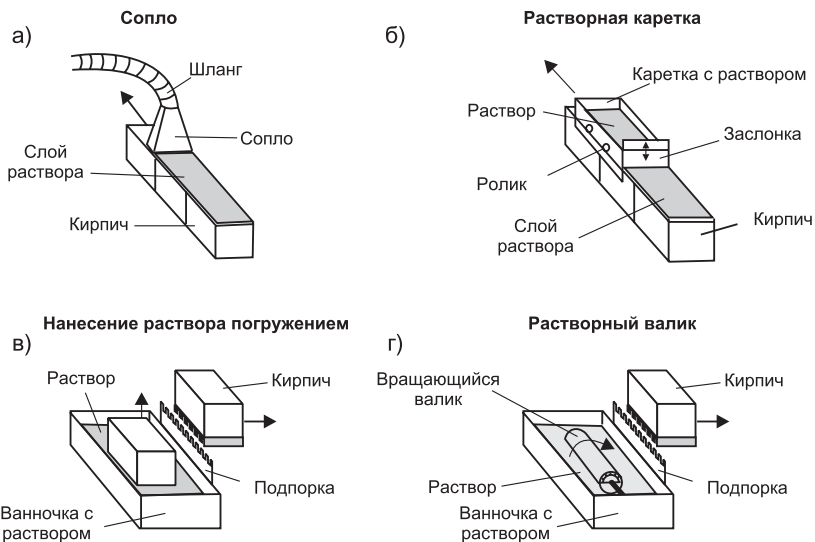


Рис. 7.26. Варианты нанесения раствора

представленные на рис. 7.26 позициями с) и d), которые однако позволяют наносить раствор только тонким слоем. В обоих случаях кирпич во время нанесения на него раствора или путем погружения или с помощью валика перемещается роботом. Конструкция подпорки обеспечивает точное дозирование раствора.

При выполнении каменной кладки с помощью робота кирпичи укладываются преимущественно вприжим. Для избежания повреждений робота исполнительное устройство должно обладать податливостью, чтобы сделать возможными выравнивающие движения робота. Возникающие предсказуемые столкновения об уже уложенный соседний кирпич и горизонтальный шов должны учитываться на уровне управления роботом, чтобы было возможно осуществлять торможение и остановку перемещения. Описанная ситуация поясняется примерами, представленными на рис. 7.27.

Для обеспечения надежной работы робота для кирпичной кладки выравнивающий элемент должен обладать:

- двумя степенями поступательных перемещений для реализации бокового прижатия кирпича к уже уложенному или укладки на горизонтальный шов;
- индивидуальным электронным управлением по каждой отдельной степени свободы;

а) Боковой прижим кирпича

б) Уклада кирпича

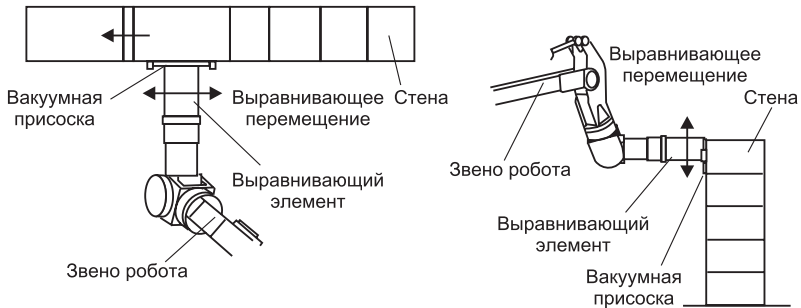


Рис. 7.27. Необходимые выравнивающие перемещения в процессе кладки  
 а — боковой прижим к соседнему кирпичу (вид спереди); б — укладка кирпича на горизонтальный шов (вид сбоку)

- возможностью задания определенной противодействующей силы по каждой степени свободы (например, с помощью пружин), чтобы препятствовать неконтролируемым выравнивающим движениям в разблокированном состоянии;
- по одному бинарному сенсору по каждой степени свободы, определяющему отклонение выравнивающего элемента и задающему торможение перемещения робота;
- по одному бинарному сенсору по каждой степени свободы, определяющему окончание отрезка выравнивания и обеспечивающему аварийную остановку робота;
- по одному аналоговому датчику по каждой степени свободы, определяющему значение действительного отрезка выравнивания и позволяющему проводить точный расчет позиционирования исполнительного органа при выполнении кирпичной кладки.

Неизбежные ошибки в установке штабелей с кирпичом могут вызвать столкновение с ними и повреждение робота при выполнении операции по их выборке. Обычно этого удастся избежать за счет оснащения захватных устройств сенсорами, информация с которых позволяет корректировать траекторию их перемещения. Однако при этом возникают потери времени, повышающие время цикла каменной кладки. Для ускорения протекания технологического процесса и дополнительного повышения его надежности рекомендуется повышение степени гибкости системы.

Простейшим элементом выравнивания является резиновое уплотнение вакуумного захватного устройства. Обыкновенные уплотнения толщиной 10—15 мм в силу своей высокой гибкости могут компенсировать ошибки по положению в пределах многих миллиметров и по углу в пределах нескольких градусов. В случае если этого недостаточно, между последней осью манипулятора и вакуумной тарелкой предусматривается дополнительный компенсирующий элемент, который должен обладать одной поступательной степенью свободы перпендикулярно по направлению к вакуумной тарелке и двумя вращательными для компенсации ошибок наклона. Реализуемые зоны компенсации зависят от максимальной нагрузки, конструктивных особенностей и лежат в пределах 50 мм и  $10^\circ$ . На рис. 7.28 представлены эскизы компенсирующего механизма с рабочими кромками уплотнения и элемента выравнивания.

Компенсирующий элемент для процесса захвата должен также располагать устройствами для блокировки и разблокировки отдельных степеней свободы, а также бинарными сенсорами для контроля отрезков компенсации.

Робот-каменщик оснащен мобильной платформой (рис. 7.29), которая позволяет вручную или автоматически управлять сменой ра-

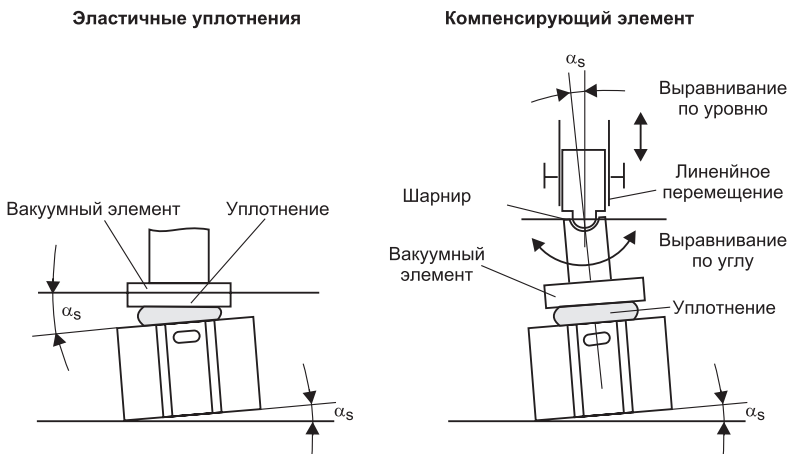


Рис. 7.28. Принципы компенсации ошибок по углам при применении вакуумного схвата  
 а — эластичные уплотнения; б — компенсирующий элемент с 3 степенями свободы

бочей позиции на каждом этаже строящегося здания. К ходовой части мобильной платформы предъявляются следующие требования:

- простота конструкции, соответствующая условиям строительной площадки;
- способность преодолевать небольшие неровности и препятствия;
- высокая маневренность в ограниченном рабочем пространстве;
- возможность поворота на месте;
- простота кинематической структуры;
- простота управления;
- управляемость по положению и по скорости приводов перемещения и маневрирования.

В отношении динамики ходовой части и точности перемещения не предъявляется особых требований, так как участки перемещения лежат в пределах нескольких метров, а положение и ориентирование робота должны точно измеряться после каждой перестановки.

Без смены рабочей позиции робот в состоянии выкладывать прямолинейный сегмент стены шириной в 4 и высотой в 10 кирпичей (рис. 7.30), причем речь идет об укладываемых элементах формата  $500 \times 300 \times 250$  мм. Расстояние от средней оси робота до стены составляет 2,30 м. В случае, если речь идет об углах, то расстояние робота до стены сокращается до 1,90 м, для достижения полной достижимости всеми элементами, предназначенных им позиций.

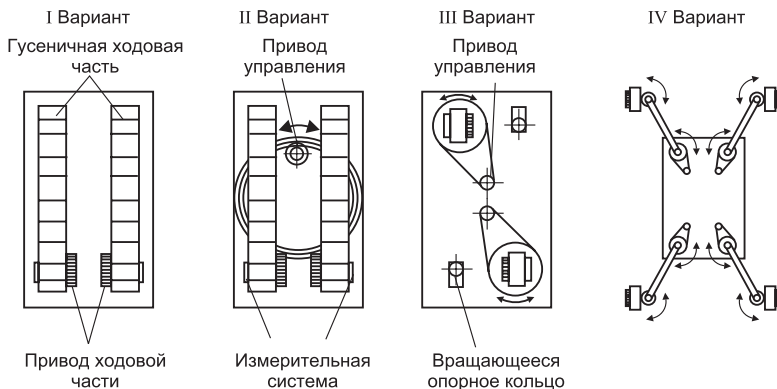


Рис. 7.29. Возможные кинематические структуры ходовых частей робота-каменщика



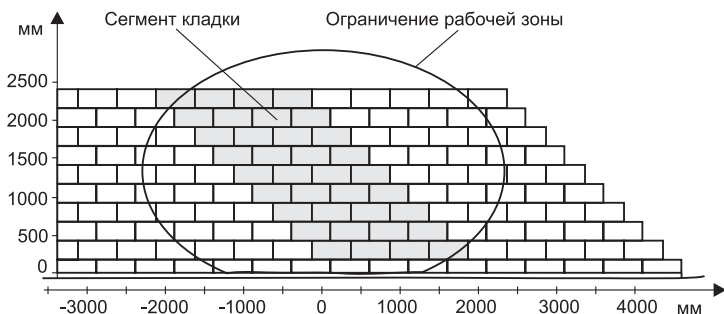
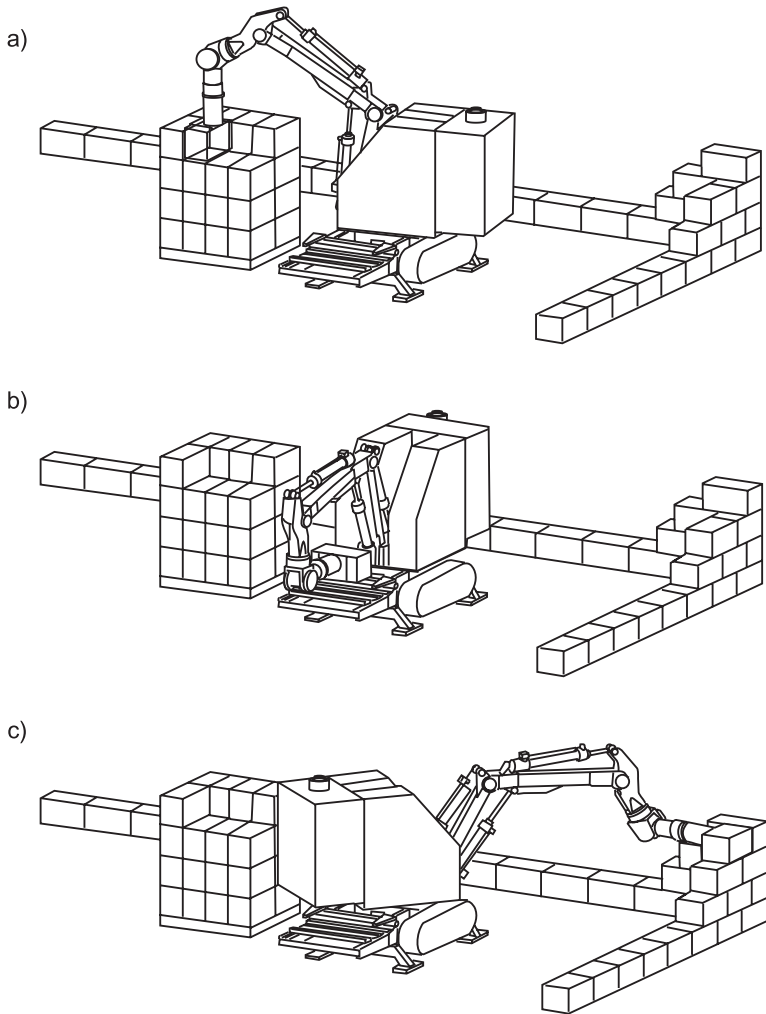


Рис. 7.30. Рабочая зона робота-каменщика

На рис. 7.31 представлены типичные рабочие схемы установки роботов на этажном перекрытии и протекание автоматизированного процесса кладки. Определение рабочей позиции робота и его ориентирование производятся относительно неизменяемой базовой линии или плоскости. На рис. 7.32 показана одна из возможных схем решения этой задачи. Система состоит из установленного на этажном перекрытии лазерного нивелира, создающего плоскость вращения лазерного излучения, и двух фотоприемных устройств (ФПУ), размещенных между вакуумной присоской исполнительного органа и звеном балансировки робота. Лазерный излучатель имеет возможность отклоняться в пределах  $90^\circ$  от проектной оси, что позволяет создавать не только горизонтальную, но и вертикальную плоскости. Возможная ошибка угла наклона при установке нивелира, обуславливаемая неровностями поверхности перекрытия, может быть компенсирована в определенных пределах за счет самонивелирования прибора. Таким образом, обеспечивается необходимая точность задания вертикальности опорной лазерной плоскости.

На рис. 7.34 представлена структура аппаратных средств управления роботом, которые интегрируются для реализации автоматического режима работы. Системы управления мобильной платформой робота и манипулятором реализованы на двух микропроцессорах и объединены шиной для обмена данными [104]. Для регулирования робота по положению используются 11 электрогидравлических сервоприводов, взаимодействующих между собой и с управляющим компьютером через параллельные устройства сопряжения. Отличительной особенностью для системы управления является то, что базовая ось вращения робота выбирается в зави-



*Рис. 7.31. Типовое протекание технологического процесса каменной кладки с помощью робота  
 а — взятие камня из штабеля; б — нанесение раствора методом макания; с — укладка кирпича*

симости от режима работы («перемещение» или «кладка») и приходится управлять или мобильной платформой или манипулятором. За счет того, что в наличии имеется комбинация из 9 осей подвижности, может избирательно реализовываться подвижная

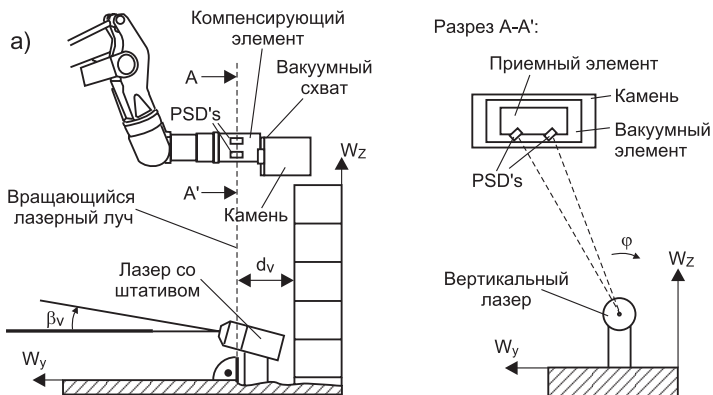


Рис. 7.32. Измерение положение робота посредством вращающегося вертикального лазерного луча

часть с тремя степенями свободы или манипуляционная система с 7 степенями свободы.

Компьютеризацию строительной техники следует выполнять планомерно и последовательно по мере накопления опыта в этой области. Развитие должно осуществляться поэтапно, от реализации функций по контролю и диагностированию к автоматическому позиционированию и программному управлению. При принятии решения об автоматизации и определении ее уровня необходимо проводить тщательное технико-экономическое обоснование. Графики зависимости прибыли и затрат от степени автоматизации (рис. 7.33) показывают, что для строительных машин, работающих в условиях неопределенной среды, наибольшего эффекта можно добиться при их частичной автоматизации [105]. Это способствует экономии горючего, повышению производительности, улучшению условий труда, экономии рабочего времени, избавляет оператора от монотонной работы и позволяет устранить допускаемые им ошибки. При стремлении к полной автоматизации рост за-

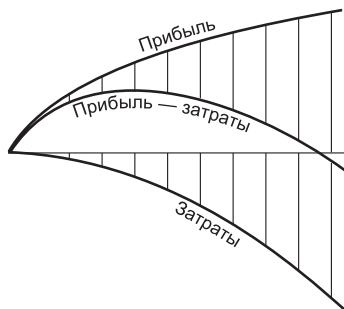


Рис. 7.33. Графики соотношений прибыли и затрат от степени автоматизации строительных машин

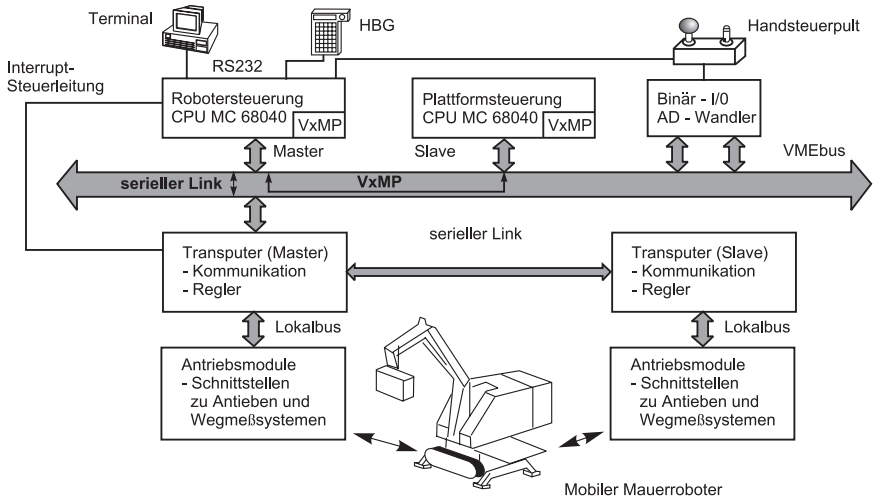


Рис. 7.34. Структура программного обеспечения системы управления роботом [16]

трат на датчики и устройства обработки информации начинает превышать достигаемый от этого эффект. Очевидно, что эта закономерность сохранится и в ближайшем будущем.

# Глава 8. Автоматизации и роботизация бетонных работ

## 8.1. Системы автоматизации приготовления бетонной смеси

Основной тенденцией развития оборудования для приготовления бетонных смесей в последние годы является автоматизация на базе микропроцессорной техники в условиях специализированных предприятий [106]. Это обусловлено экономическими, экологическими и другими факторами. Приготовление бетонных смесей на строительной площадке практикуется при небольших объемах работ и отсутствии трудностей в доставке и переработке исходных материалов.

При больших объемах работ, высоких требованиях к качеству продукции и разнообразной рецептуре применяемых смесей требуется четкость в работе оборудования и ритмичность в поставке материалов. Firmой «Liebherr» (Германия) разработано программное обеспечение и реализована транспортная и производственная сеть, включающая в себя предприятия по производству компонентов бетонной смеси, транспортные средства, строительные площадки, бетоносмесительные узлы, объединяемые центральной ЭВМ. Это позволяет существенно экономить сырье, использовать компоненты только с требуемыми по рецепту качествами, быстро приготавливать и поставлять бетон, снизить производственные затраты и экономить рабочую силу. Центральное управление облегчает контроль качества и создает основу для планирования производства, позволяет принимать во внимание колебания в свойствах материалов и другие воздействия на продукцию. Размеры инвестиций по сравнению с достигаемой экономией средств невелики.

На автоматизированном бетоносмесительном узле типа «Betomat III-450» при помощи микропроцессорной системы производится управление дозированием, хранение рецептов, определение влажности компонентов, сравнение заданных и действительных значений заполнителей, цемента, воды, а также сбор статистических данных. Система выполнена автономно и может работать без подключения к центральной ЭВМ. Она сама или через центральную ЭВМ регистрирует заказы, формирует задание и следит за хо-

дом их выполнения, хранит адрес потребителя, выдает маршрутный лист, составляет протокол на готовую продукцию и обрабатывает статистические данные. Типовая микропроцессорная система для подобного бетоносмесительного узла позволяет накапливать в памяти 200 рецептов, дозировать 12 фракции и сортов заполнителей, 6 марок цемента и добавок к нему, 3 вида воды (теплой, чистой, повторного использования). Система управления (рис. 8.1) осуществляет прием до 1000 заказов, управление 200 транспортными средствами, связь с 1000 потребителями и 30000 строительными площадками [98].

Важное место в бетоносмесительных узлах занимают весовые устройства с магнитоупругими пластинами в качестве чувствительных элементов. Класс точности измерений составляет 0,1%. Весы оборудованы собственной электроникой и связаны с систе-

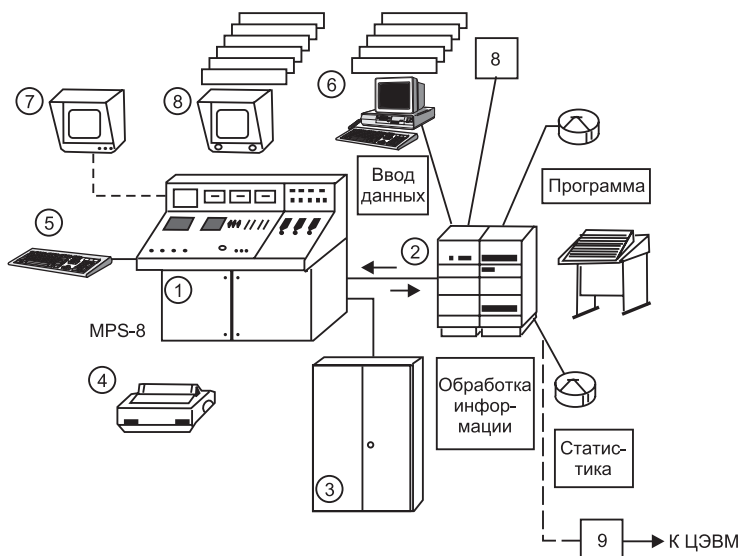


Рис. 8.1. Схема автоматизированной системы управления бетоносмесительным узлом «Betomat III-450»

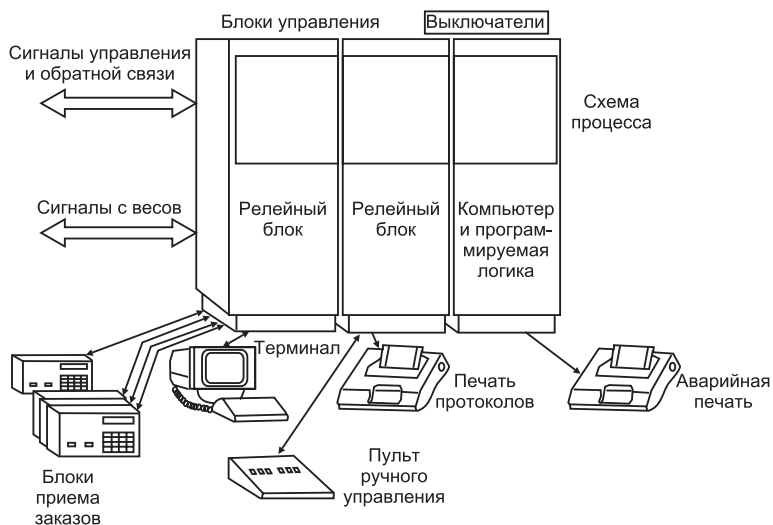
- 1 — пульт управления с микропроцессорным устройством MPS-83; 2 — пульт управления устройству передачи данных; 3 — силовой блок; 4 — устройство печатания карточек поставки; 5 — клавишный пульт составления рецептов; 6 — буквенная клавиатура ввода данных; 7 — монитор визуального контроля дозирования; 8 — монитор управления; 9 — линии связи с центральной ЭВМ

мой управления. Каждый чувствительный элемент снабжен отдельным источником питания. Сигнал с него усиливается и через аналого-цифровой преобразователь подается к цифровой система дозирования. Измерители изготавливаются в защищенном исполнении, обеспечивают компенсацию колебаний температуры окружающей среды и безопасность работы. Весы работают независимо от других устройств и их показаниями можно пользоваться при ручном управлении процессом дозирования.

В Германии для управления бетоносмесительными узлами применяется микропроцессорная система типа RIC 85S (рис. 3.2). В ее состав входят терминал для оператора, устройство для печатания протоколов готовой продукции, пульт управления, печатающее устройство для аварийных режимов, устройства для приема заказов. Система построена на базе процессора INTEL 8085 и может иметь в зависимости от производственных потребностей различные исполнения. В минимальном исполнении она состоит из системы программной памяти EPROM объемом 32 кбт или памяти EEPROM объемом 40 кбт и буферной памяти для записи и считывания RAM объемом 24 кбт. При необходимости система может быть расширена на 32 цифровых входа и выхода, 16 управляемых параметров, 8 аналоговых входов и 4 аналоговых выхода, устройство счета импульсов, дополнительную память EPROM или EEPROM объемом 64 кбт и управление видеографикой. Сообщение между отдельными блоками производится автоматически через шины данных, которые соответствуют возможностям системы, Программирование логики может выполняться при помощи клавиатуры терминала.

При изготовлении бетонных смесей важно учитывать влажность щебня, с которым в бетон попадает дополнительная вода. Влажность материала измеряется специальными датчиками, формирующими выходные сигналы в диапазоне 4—20 мА. С учетом этих сигналов оператором вносятся соответствующие изменения в программу, чтобы выдерживались условия рецепта.

Прием заказов на изготовление бетона может происходить также в цехе готовой продукции непосредственно от отдельных потребителей. Информация о номере рецепта, количестве и размерах дозирования вводится заказчиком через специальный блок, оснащенный клавиатурой с цифровыми и буквенными символами. Система управления обрабатывает заказы и упорядочивает их для поставки в указанной последовательности. Заказ может вызываться



*Рис. 8.2. Блок-схема системы управления бетоносмесительной установкой*

на экран терминала центрального пульта управления, где оператор контролирует ход его выполнения.

После приема заказа и выбора рецепта система управления выбирает свободный смеситель с весами и устройством дозирования. Все компоненты подаются на весы в строго определенной последовательности, указанной в рецепте. Для каждого компонента заданы границы значений. Превышение их вызывает прерывание процесса, который может быть завершен по усмотрению оператора вручную или автоматически. Приготовленная масса транспортируется по адресу, заданному в программе.

Контроль плотности бетонной смеси осуществляется косвенно измерением мощности, потребляемой электродвигателем смесителя. Ее значение постоянно сравнивается с заданными параметрами в рецепте. При крутой смеси используется специальный щуп, определяющий электрическую проводимость массы, по значению которой также судят о плотности.

Если, например, значение влажности щебня, введенное в систему управления завышено и масса слишком крутая, то в результате измерения плотности системой управления вырабатываются сигналы для дополнительной подачи воды.



## 8.2. Роботы для подачи и укладки бетона

Применение роботов в строительстве способствует повышению производительности труда, улучшению качества выполнения работ и уменьшению опасности для рабочих. В зависимости от технического уровня и класса задач функции строительных роботов значительно отличаются. Если рассматривать технический уровень автоматических механизмов, которые используются для выполнения работ на строительных участках и не являются роботами, т. е. устройствами, способными самостоятельно совершать различные действия в трехмерном пространстве, аналогичные действиям человеческих рук, то требуемые для них функции подразделяются в основном на функции восприятия, манипулирования и перемещения. Функция восприятия оценивает физическую информацию в одном измерении, например, в таком, как расстояние, мощность, направление, и становится по мере развития робототехники основной. В дальнейшем эта функция должна быть дополнена возможностью распознавания образов для большей интеллектуализации строительных роботов. Кроме того, разрабатываются многочисленные проекты усовершенствования манипуляторов за счет добавления датчиков, адаптирующихся к месту и цели того или иного процесса манипулирования. Областью внедрения строительных роботов являются многочисленные необорудованные участки, которые невозможно представить в виде заранее определенной модели. При широком и разнообразном по составу поле деятельности на таких участках функция перемещения становится чрезвычайно важным фактором [107—109].

Благодаря высокой степени миниатюризации и быстродействия микропроцессорных средств упрощается встраиваемость компьютера в корпус робота и, следовательно, расширяются возможности передачи, запоминания и ввода-вывода информации.

Строительные роботы работают в неоднородной и нерегулярной среде. Вследствие специальных условий на строительных площадках автоматика имеет архитектуру, способную реализовать координирование взаимодействия механизмов, стратегическое планирование и оптимизацию параметров, а также локальное (тактическое) планирование работы (рис. 8.3). Ее основными элементами являются центральный компьютер для программирования работы и оптимизации параметров, механическая часть робота, выполняющая задания, и система сопряжения с оператором.

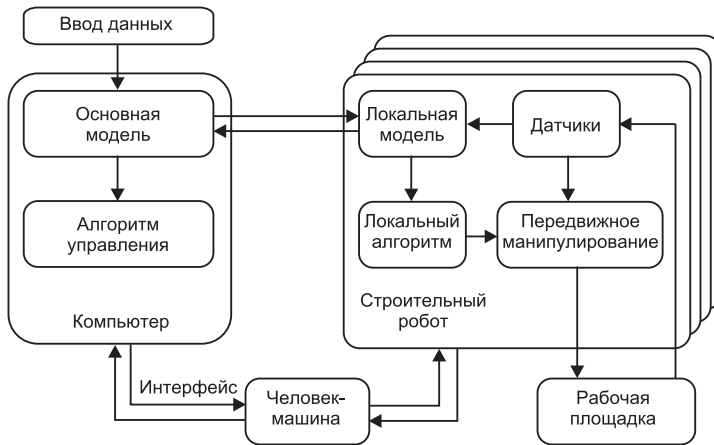


Рис. 8.3. Архитектура системы управления роботом

Моделирование работы производится на основании информации, характеризующей строительную площадку и конструкцию робота. Модель служит для интерпретации информации, а компьютер осуществляет выборку из нее физических, геометрических, символических и логических представлений для оценки строительных операций, планирования оптимальных траекторий движения, управления и контроля за выполнением работы. Компьютер определяет продолжительность, последовательность и требуемые ресурсы каждой операции. Он управляет также локальными моделями, определяет состояние робота и оценивает возмущающие воздействия.

Главной проблемой современных систем управления строительными роботами пока остается быстрая обработка и интерпретация сенсорных сигналов [3]. Условия выполнения строительно-монтажных работ характеризуются настолько большим количеством необходимых для учета в системе управления параметров, что расчеты связаны с большими затратами времени и отсутствием возможности работать в реальном масштабе времени.

Значительный эффект приносит применение микропроцессорных средств в манипуляционных системах для укладки бетонной смеси и в монтажных вышках с телескопическими или шарнирно-сочлененными стрелами на специальных пневмоколесных шасси. Одно из таких устройств разработано фирмой «Putzmeister» (Германия) в 1986 г. [110]. Автобетононасос с 32-метровой мани-

пуляционной системой снабжен микропроцессорной системой Automatic Mast Control-Steuerung (АМС). При заданной высоте положения конечного звена бетоновода над бетонируемой поверхностью оператор осуществляет дистанционное управление в системе координат X, Y. Компьютер обеспечивает надежное выполнение программы управления всеми гидравлическими звеньями и соблюдение заданной высоты и скорости перемещения конца мачты. Управляющие сигнала поступают на электрозолотники гидроцилиндров, а высокая точность позиционирования достигается специальными датчиками перемещения. При трех звеньях и более в программу управления вносится кинематическая схема установки и задаются различные варианты достижения конечным звеном требуемой точки в пространстве.

Основываясь на опыте эксплуатации этой установки, фирма «Putzmeister» разработала пятизвенную манипуляционную систему FH 26 высотой 26 м, способную перемещать с высокой точностью большие массы в неструктурированном пространстве. Каждое звено снабжено собственным вычислителем. Элементы имеют высокую жесткость во всех трех направлениях нагрузки.

#### Техническая характеристика

Длина по горизонтали, м	22
Размер по высоте, м	26
Длина, м	
1 звена	6,5
2 звена	4,0
3 звена	4,0
4 звена	4,0
5 звена	3,5
Грузоподъемность, кг	1500
Размеры опоры, м	7,2×7,8

Конечное звено манипуляционной системы с нагрузкой должно быстро и точно перемещаться в рабочем пространстве (рис. 8.4). Работы по созданию конструкции, точному согласованию и оптимизации размеров звеньев проведены совместно с институтом производственной техники и автоматизации (ІРА) г. Штутгарта (Германия). В рамках кооперации с ІРА разработано программное обеспечение и кинематическая схема рабочей зоны системы. Фирма АЕГ (Германия), специализирующаяся в области управления индустриальными роботами и мобильными

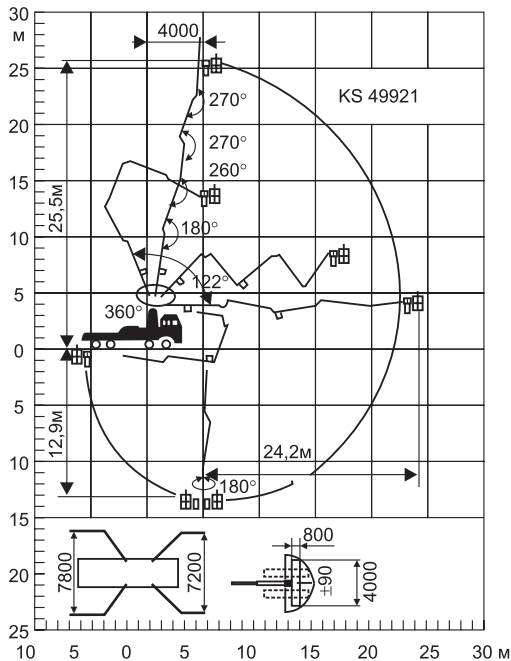


Рис. 8.4. Схема рабочей зоны манипуляционной системы FH 26

строительными манипуляторами больших размеров, разработала и изготовила компьютерную систему управления [111].

Гидросистема с сервоventилями совместно с измерительной системой обеспечивают точное управление движением звеньев. Опыт эксплуатации показывает высокую надежность и эффективность системы. Устойчивое положение всей конструкции обеспечивается четырьмя гидравлическими опорными штангами. Они снабжены датчиками давления в опорах, связанными с системой управления и контролирующими горизонтальность установки манипулятора. Информация с датчиков выводится на табло оператора.

Оператор управляет всей системой при помощи микропроцессорного устройства Joy-Stick. С его помощью он задает бортовому компьютеру управляющие воздействия, например, направление и скорость перемещения конца мачты, расстояние его от обслуживаемого объекта и др. Главной задачей оператора является предупреждение столкновения манипулятора с препятствиями на пути его перемещения. Компьютер вносит в программу координаты

препятствий и движение манипулятора осуществляется так, что все его звенья не должны приближаться к препятствию на расстояние меньше заданного значения. Задание траектории движения производится автоматически на базе кинематической схемы системы без затруднений (рис. 8.5). Оператор предупреждает возможные столкновения со случайно возникающими препятствиями, поэтому необходимо его постоянное присутствие.

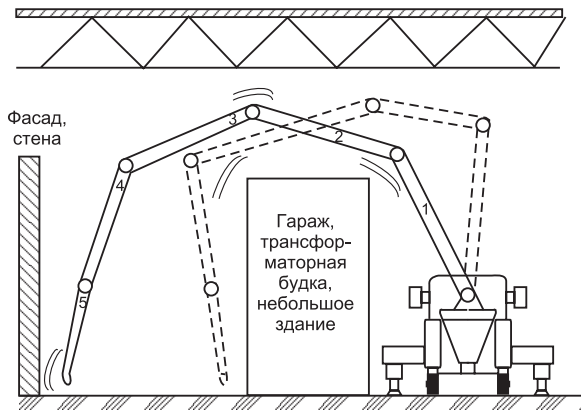


Рис. 8.5. Схема преодоления препятствия манипулятором

Наличие высокоточной измерительной системы и возможность вращения всех звеньев позволяют укладывать на строительной площадке бетон без присутствия человека. При сплошном бетонировании поверхности точное соблюдение размеров по  $X$  и  $Y$  не имеет большого значения, а при укладке бетона в опалубочные формы или при сооружении ленточного фундамента имеет (рис. 8.6). Перед началом бетонирования оператор вносит в систему управления координаты минимум двух точек ( $P_0$ ,  $P_1$ ), для того чтобы связать систему координат манипулятора ( $X$ ,  $Y$ ) с системой координат строительного объекта ( $X'$ ,  $Y'$ ). Возможность преобразования координат системы в координаты строительного объекта позволяет просто и надежно управлять процессом укладки бетонной смеси при помощи бортового компьютера установки.

При использовании установки внутри сооружений, например, при бетонировании полов в производственных цехах, манипуляционная система имеет ломаную конфигурацию (рис. 8.7). Если выполняются обычные работы без ограничения по высоте, то задает-

ся полукруглая или арочная форма манипулятора. Оператор делает это вручную на пульте управления или передает сигнал по радиосвязи. Центральный компьютерный блок рассчитывает траектории движения звеньев при создании той или иной формы манипуляционной системы, хранит их в памяти (при необходимости повторения) и управляет подачей бетона на объект. Радиуправление процессом допускается только в том случае, когда на строительной площадке отсутствуют сигналы или помехи, способные вызвать нарушения в радиосвязи. На обобщенной блок-схеме системы микропроцессорного управления бетононасосом показаны главные ее элементы и выполняемые ими функции (рис. 8.8). Центральный блок в защищенном исполнении размещен в кабине водителя. Здесь же расположены приборы измерительной системы. Снабжение питанием центрального блока и других элементов системы осуществляется прямо от электросети автомобиля, а значения напряжения находятся в пределах 18—28 В постоянного тока. Компьютер постоянно выводит на панель управления информацию о помехах и отклонениях параметров от заданных значений,

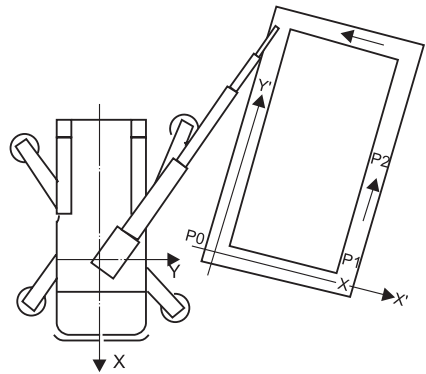


Рис. 8.6. Схема укладки бетона в опалубочную форму

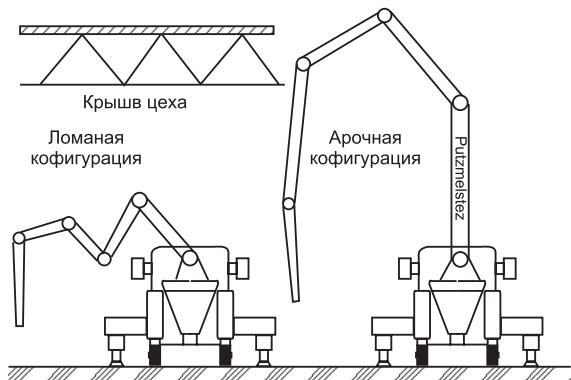


Рис. 8.7. Схемы различных конфигураций манипуляционной система

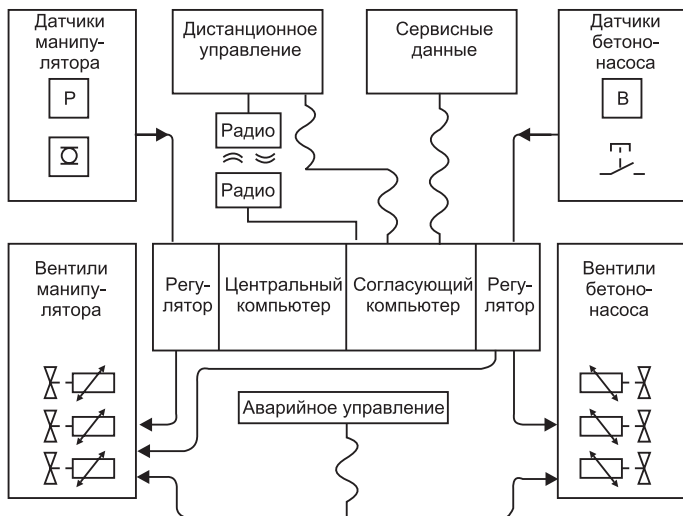


Рис. 8.8. Блок-схема системы автоматизации бетононасоса с манипуляционной системой

количестве бетонной смеси и давлении в бетоноводе. Надежность выполняемых операций очень высока. В ближайшем будущем должны появиться бетононасосы с высотой манипуляционной системы свыше 40 м, где роль бортовых компьютерных систем еще больше возрастает.

Роботизация строительного производства в силу его специфики пока значительно отстает от роботизации других отраслей. Однако наблюдается активизация процесса автоматизации и роботизации в различных областях строительства. Это связано с повышением уровня обработки информации как за счет использования новейшей вычислительной техники и сетей связи, так и за счет возможности концентрации всей информации по строительству сооружений в одной информационной системе. В подобных системах неоднородность и избыточность информации сводятся до минимума.

Новое слово в сфере монолитного домостроения представляет автоматическая система укладки бетона с подъемным краном башенного типа, предложенная компанией «KONOIKE CONSTRUCTION CO., LTD» [85]. Использование данной системы позволяет повысить эффективность и безопасность работы, помогает оператору при выполнении работ по поднятию и укладке раствора

с помощью крана башенного типа, управляемого дистанционно. Система была разработана для повышения эффективности укладки и распределения бетона. В ее состав входит автоматическая система контроля и управления подъемным краном, система технического зрения и система механизмов, которая включает в себя высокоскоростной подъемный кран, систему подачи раствора и перемещаемый бетонный ковш. Все эти системы объединены между собой межмашинными и силовыми связями и представляют из себя одно целое.

Используя автоматическую систему управления подъемным краном, оператор получает возможность без особого труда управлять этим сложным комплексом, находясь в операторской комнате вдали от непосредственной зоны действия крана, и может с легкостью перемещать рабочий орган крана в зону назначения. Также, эта система ускоряет и замедляет перемещение крана в зависимости от колебаний самой конструкции и длины троса, на котором подвешен рабочий орган крана, что позволяет сохранять большее быстродействие комплекса в целом, нежели при использовании обычного подъемного крана, управляемого вручную. Система управления краном оснащена системой технического зрения, с помощью которой становится возможным в случае опасности остановить подъемный кран и не дать возможности столкнуться с препятствием в виде здания или другого подъемного крана. Автоматическая система контроля и управления позволяет управлять краном с помощью легкого движения руки, исключая применение сложной системы рычагов. Система подачи раствора управляет оператором дистанционно по радиоканалу. Благодаря радиоканалу управления исключена опасность обрыва кабеля в случае применения кабельной системы управления подачей и распределением раствора.

Особый интерес представляет использование достижений роботехники для механизации и автоматизации бетонных работ при возведении монолитных объектов. Компанией «Fujita corporation» разработан FCF метод строительства с поднимающимися домкратами, предназначенный для строительства высотных бетонных сооружений башенного типа. Этот метод строительства использует большее число домкратов для подъема рабочей площадки, на которой размещается различное оборудование и строительные материалы. На рис. 8.9 показано устройство мехатронного комплекса реализующего FCF метода строительства. По периметру объекта,



устанавливается опалубка, подвешиваемая к рабочей платформе, опираемой на домкраты, установленные на домкратных стержнях. Мехатронная система составлена из поднимающихся домкратов, датчиков уровня и системы управления с центральным пультом управления. Подъем платформы осуществляется гидродомкратами с захватными устройствами, управления которыми выполняется от персонального компьютера через гидравлические устройства управления давлением.

Технологическим научно-исследовательским институтом в Токио совместно с компанией «Tobishima Corporation» разработан метод строительства монолитных объектов всех видов форм, получивший название TAPS-метод. Метод основан на использовании непрерывно поднимающейся опалубки. Фирма «Tobishima Corporation» взяла на себя инициативу внедрения в 1970 метода скользящей опалубки в Японии. С тех пор «Tobishima Co.» предложила широкое разнообразие проектов, используя метод скользящей опалубки, одновременно продолжая научно-исследовательские работы на обнаружение новой применимости. Это позволило методу скользящей опалубки приобрести широкую известность при строительстве дымовых труб, дымоходов, башен, бункеров, пирсов моста смотровых и телевизионных. Используя практический опыт и результаты научных поисков фирмой «Tobishima Co» был создан метод возведения монолитных объектов «TAPS-метод», представ-

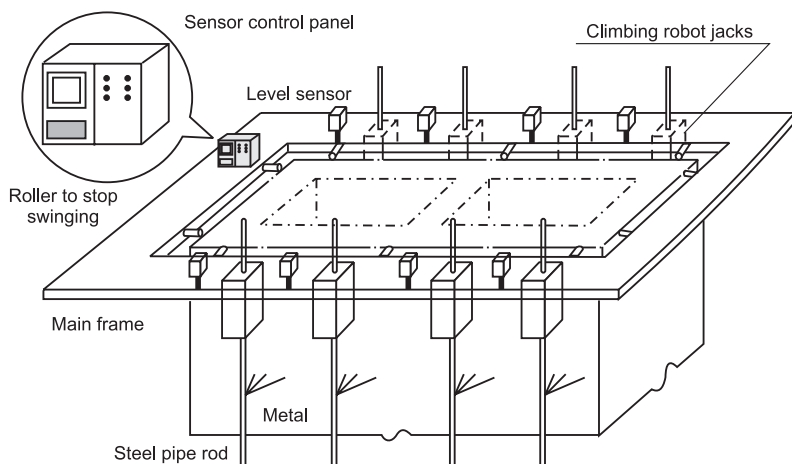


Рис. 8.9. Метод FSF строительства монолитных объектов

ляющий собой современную версию метода скользящей опалубки, объединивший положительные особенности прошлого с большей адаптируемостью и более высокой эффективностью. Метод представляет собой органичное использование прогрессивной технологии, достижений робототехники, мехатроники и компьютерных технологий управления. Это позволило автоматизировать процесс строительства и расширить использования метода скользящей опалубки для возведения объектов с изменяющимся диаметром, секционной конфигурацией, переменной толщиной стен. Метод «Tobishima slipform» включает усовершенствования, которые позволяют сократить периоды строительства и обеспечить снижение общих затрат. Мехатронный скользящий комплекс (МСК), реализующий метод «Tobishima slipform» включает автоматически управляемую платформу с гидравлическими подъемными домкратами и роботы, предназначенные для укладки бетона. Управление комплексом обеспечивает поддержание вертикальной ориентацией платформы.

### **8.3. Принципы управления мехатронным скользящим комплексом**

Принципы управления МСК определяются его технологическими, конструктивными, и динамическими особенностями, а также характером и свойствами возмущающих воздействий. Принципиальной особенностью МСК являются наличие двух групп исполнительных устройств: подъемных домкратов и МРП, требующих согласованной работы. Условие работы подъемных домкратов требует стабилизации их движения и синхронизации скоростей подъема. Работа приводов МРП должна быть строго синхронизирована с подъемом платформы и согласована с кривизной стен возводимого объекта. Особенностью управления МСК является циклический характер процесса подъема, при котором за один шаг высота подъема составляет 200—300 мм, а повторение циклов подъема определяется скоростью

Особенностью МСК является наличие ограничений на управление исполнительными механизмами, связанных с конструктивными особенностями и технологическими циклами управления. Управление домкратами должно планироваться таким образом, чтобы изменение наклона платформы за один шаг подъема не

превышало конусности щитов опалубки, составляющей 1/200 — 1/500. Планирование подъема комплекса должно обеспечить плавный вывод платформы в проектное положение и минимальную кривизну траектории подъема при соблюдении ограничений на управление. При этом отклонение МСК от проектной оси не должно превышать:

$$\delta_{\text{доп}} \cdot \sqrt{(x_{\text{к}}^2 + y_{\text{к}}^2)} \leq \delta_{\text{доп}}.$$

Структурные связи системы управления МСК во многом определяются видом и свойствами возмущающих воздействий. Широкий диапазон изменения возмущающих сил существенно влияет на работу исполнительных механизмов МСК и может нарушить синхронизацию их работы. Это может вызвать смещение платформы с опалубкой и ее поворот (кручение) относительно проектной оси. Действие внешних сил на платформу вызывает также деформации конструкции, что ведет к увеличению нагрузки на отдельные исполнительные механизмы. Поэтому в системе управления МСК необходимо иметь стабилизирующие обратные связи и корректирующие устройства, повышающие инвариантность. Прогнозирование движений платформы должно учитывать ветровые и температурные деформации объекта.

Учитывая сложность и многомерность МСК как объекта управления, необходим контроль параметров состояния комплекса и возводимого сооружения, выполняемый информационно-измерительным устройством. К основным параметрам контроля следует отнести: смещение платформы и опалубки от проектной оси, наклон и кручение платформы, положение ПД и МРП, возмущающие воздействия, действующие на объект и комплекс.

Таким образом, при построении системы управления мехатронный комплекс следует рассматривать как полностью наблюдаемый многомерный объект, имеющие ограничения на управляемость. Управление МСК должно предусматривать корректировку его положения в процессе подъема. Для корректировки положения предлагается использовать наклон платформы в сторону противоположную отклонению с постепенным выводом комплекса на проектную ось в процессе подъема. Корректировка выполняется с учетом ограничений на наклон опалубки. В случае небольших отклонений МСК корректировка выполняется за счет смещения опалубки относительно платформы (рис. 8.10). В случае возникновения кручения

платформы предлагается создавать волновое отклонение платформы в процессе ее подъема. При этом амплитуда волны и ее направление зависят от величины и направления кручения.

Исходя из особенностей и свойств, для управления комплексом выбрана двухуровневая структура. Задачами верхнего (тактического) уровня является планирование движений комплекса с учетом ограничений на управление и возмущающих воздействий, действующих на сооружение. Кроме того, в функции вычислительного устройства верхнего уровня входит сбор измерительной информации, ее обработка и хранение, а также представление в графическом и цифровом виде состояния комплекса и объекта. Важной задачей верхнего уровня управления является формирование управляющих воздействий. Задачами нижнего (исполнительного) уровня является отработка управляющих сигналов и синхронизация перемещений между группами механизмов. Такая структурная организация системы управления МСК позволяет достичь заданного качества управления и требуемой точности.

Учитывая сложность управления комплексом и жесткие ограничения на управление, предложено планирование движений выполнять на основе моделирования подъема МСК, с учетом текущего состояния, действующих возмущений и влияния случайных факторов. На основе моделирования определяется желаемая траектория движения и формируются временные законы пошагового управления МСК. Обеспечения требуемой точности и качества управления достигается синтезом программных движений с учетом граничных условий, накладываемых на положение объекта в опорных точках траектории. Такое управление позволяет учитывать действующие на домкраты усилия, кручение опалубки, температурные и ветровые деформации объекта.

Формирование управляющих воздействий производится с учетом ограничений на управление, задаваемых в виде неравенств  $|U_{nd}(t)| \leq C_{nd}$  и  $|U_{mp}(t)| \leq C_{mp}$  при всех  $t \in [t_0, t_T]$ . Использование позиционных обратных связей позволяет полностью или частично



Рис. 8.10. Корректировка положения МСК смещением

компенсировать влияние внешних воздействий на комплекс. Действия ветровой нагрузки и солнечного нагрева учитываются при планировании движений комплекса.

Учитывая сложность и продолжительность корректировки положения комплекса, предлагается при малых смещениях использовать алгоритмы коррекции, построенные на пошаговом смещении опалубки относительно платформы. Основу этих алгоритмов составляют соотношения, связывающие приращение радиусов  $\Delta r_{mp}^{(j)}$  опалубки со смещениями  $(x_n, y_n)$  платформы. В соответствии с рис. 8.1 для смещения центра опалубки на величину  $(x_n, y_n)$  необходимо радиусы МРП изменить на величину:

$$\Delta r_{mp}^{(j)} = x_n \cos \varphi_{mp}^{(j)} + y_n \sin \varphi_{mp}^{(j)}, \quad (8.1)$$

где  $\varphi_{mp}^{(j)} = \frac{2\pi}{m}(j-1)$  — углы расположения МРП,  $m$  — число МРП.

Управление подъемом платформы неразрывно связано с регулированием радиального перемещения щитов. При возведении конических объектов управление МРП производится пропорционально высоте подъема:  $\bar{U}_{mp} = K_{син} \cdot \bar{U}_{нд}$ , где  $K_{син} = 1/\operatorname{tg}\varphi_0$  — коэффициент синхронизации, определяемый углом наклона образующей конической поверхности.

Изложенные принципы управления МСК, положены в основу структурной организации системы управления, функциональная схема которой представлена на рис. 8.11. Контроль параметров состояния комплекса и возмущающих воздействий обеспечивает информационно-измерительная подсистема, которая включает лазерное устройство контроля положения платформы, гидростатическое нивелировочное устройство, обеспечивающее контроль уровней домкратов и опалубочных рам, а также датчики положения МРП. На основе измерительной информации определяются основные параметры состояния комплекса:

$$\bar{X}(t) = [x_n, y_n, z_n, R_{cp}, \psi_n, \alpha_n, \beta_n]^T,$$

где  $x_n, y_n, z_n$  — координаты положения платформы;  $\psi_n, \alpha_n, \beta_n$  — углы ориентации платформы;  $R_{cp}$  — средний радиус расположения щитов опалубки.

В состав информационно-измерительного устройства также включаются датчики температуры, скорости и направления ветра,

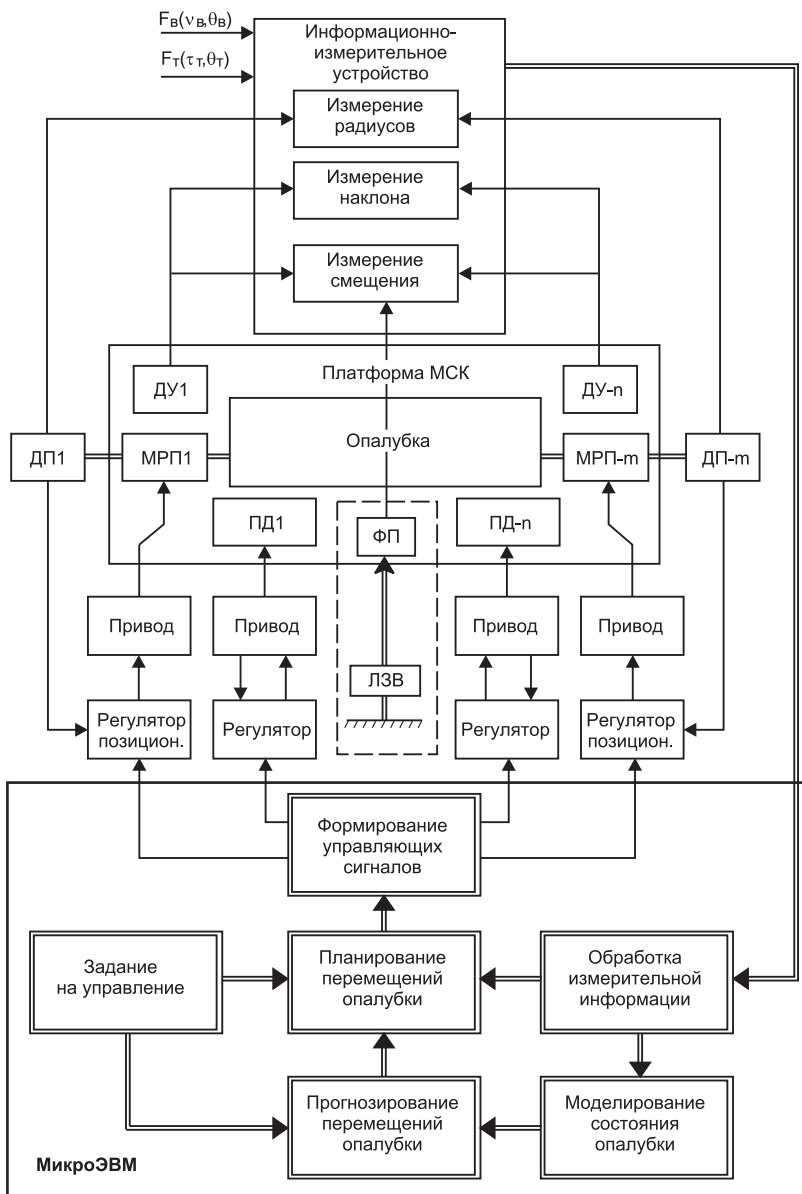


Рис. 8.11. Функциональная схема системы управления МСК

а также набор алгоритмов, позволяющих определить результирующие отклонения:

$$\begin{aligned}x_p &= x_m + x_e = \delta_m \cos \theta_m + \delta_e \cos \theta_e, \\y_p &= y_m + y_e = \delta_m \sin \theta_m + \delta_e \sin \theta_e,\end{aligned}\tag{8.2}$$

где  $\delta_m$  и  $\delta_e$  — деформации объекта за счет теплового и ветрового воздействия;  $\theta_m$  и  $\theta_e$  — направление тепловой и ветровой деформаций. При возведении высотных объектов большого диаметра в состав информационно-измерительного устройства целесообразно включать датчики контроля нагрузок на домкраты и алгоритмы, определяющие среднюю и максимальную нагрузку и номер максимально нагруженного домкрата.

Верхний уровень управления реализуется на отдельной микро-ЭВМ. На этом уровне на основе информации, поступающей с информационно-измерительного устройства, рассчитываются положение платформы, смещение и кручение опалубки, ее средний радиус, деформации сооружения. Алгоритмическое обеспечение верхнего уровня включает планирующие и управляющие алгоритмы, которые формируют управляющие воздействия для регуляторов ПД и МРП. Нижний уровень управления образуют локальные регуляторы исполнительных механизмов, обеспечивающие монотонность переходного процесса и заданную точность позиционирования. Кроме того, в функции регуляторов ПД входит поддержание заданных скоростных характеристик, а регуляторов МРП — синхронизация перемещения с подъемом домкратов. Структура локальных систем управления МСК определяется конструктивными и динамическими особенностями подъемных и регулировочных механизмов. Учитывая широкий диапазон изменения нагрузки домкратов и случайный характер этих изменений, для управления ПД необходимы следящие привода с плавным регулированием скорости и непрерывной обратной связью по положению. Управление МРП реализуется с помощью локальных двухпозиционных регуляторов с обратными связями по положению.

#### 8.4. Планирование движений мехатронного комплекса

Планирование движения МСК относится к одной из основных задач управления, которая включает построение траектории дви-

жения и формирование на ее основе законов управления подъемными и регулируемыми механизмами. Планирование движений МСК выполняется на основе технологических требований, текущего состояния комплекса и ограничений на управление, при этом следует учитывать, что процесс подъема носит периодический характер, включающий технологические остановки для укладки бетона. Результатом планирования является формирование параметров граничных и узловых точек траектории движения МСК.

При нахождении МСК в проектном положении, когда платформа занимает горизонтальное положение, а ее центр располагается на оси объекта, подъем платформы комплекса выполняется строго по вертикальной оси, без коррекции положения. В этом случае перемещение комплекса описывается алгебраическим уравнением вида:

$$z_{nl}^{(\sigma/\kappa)}(t) = \sum_{i=1}^{k-1} h_{nl}^{(i)} + \int_0^t v_{nl}^{(k)} dt, \quad (8.3)$$

где  $h_{nl}^{(i)}$ , — величина подъема платформы за  $i$ -й шаг;  $v_{nl}^{(k)}$  — скорость подъема на  $k$ -ом шаге;  $k$  — число шагов подъема на рассматриваемом участке. При этом перемещение всех домкратов на участке без коррекции соответствует закону (8.3):  $z_{nd}^{(i)}(t) = z_{nl}^{(\sigma/\kappa)}(t)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Перемещение МРП выполняется пропорционально подъему платформы, а изменение радиуса размещения щитов опалубки описывается уравнением:

$$r_{mp}^{(\sigma/\kappa)}(t) = \sum_{i=1}^{k-1} r_{mp}^{(i)} + K_{\phi} \int_0^t v_{nl}^{(k)} dt, \quad r_{mp}^{(j)}(t) = r_{mp}^{(\sigma/\kappa)}(t), \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (8.4)$$

где  $r_{mp}^{(i)}$  — изменение радиуса расположения щитов за  $i$ -й шаг подъема;  $r_{mp}^{(j)}$  — радиальное перемещение щитов опалубки  $j$ -м МРП;  $K_{\phi} = (tg\phi_o)^{-1}$  — коэффициент, определяемый конусностью объекта. Для контроля синхронной работы механизмов МСК используем коэффициент синхронизации, определяемый углом наклона касательной к образующей объекта в рассматриваемой точке:  $K_{син} = \Delta r / \Delta z$ . Для сооружений конической формы коэффициент синхронизации имеет постоянное значение:  $K_{син} = K_{\phi} = (tg\phi_o)^{-1}$ .

В процессе подъема опалубки возможны отклонения комплекса от проектного положения. В этом случае траектория перемещения МСК планируется таким образом, чтобы через конечное число



шагов устранить возникшие отклонения и вывести платформу на проектную ось и обеспечить при этом ее горизонтальность. Анализ планирующих траекторий показал, что для устранения возникающих ошибок в положении МСК траекторию движения удобно искать в виде многопараметрического класса функций вида:

$$h_n(t) = C_0 \sum C_k \varphi_k(t) \rightarrow t \in [t_o, t_m], \quad (8.5)$$

где  $C = [C_k]$  — вектор искоемых параметров;  $\varphi_k(t)$  — заданные вектор-функции.

Учитывая монотонный характер желаемой траектории движения, требования гладкости переходной траектории, а также ограничения на кривизну, определяемые конусностью щитов опалубки, предложено разбить корректирующую траекторию на два участка. Первый участок ( $AD$ ) связан с постепенным изменением угла наклона опалубки (рис. 8.12). В начале участка ( $AB$ ) наблюдается увеличение отклонения платформы до  $\delta_n^{(\max)}$ , связанное с ограничением наклона на шаге подъема. Затем платформа постепенно изменяет угол наклона ( $BC$ ) в сторону противоположную отклонению и далее подъем выполняется с постоянным наклоном ( $CD$ ). Постепенное приближение к проектной оси выполняется с переходом на второй участок траектории ( $DE$ ), в течение которого происходит постепенное выравнивание платформы. После окончания корректировки платформа должна занять проектное положение и принять горизонтальное состояние. Наиболее удобно желаемую траекторию движения аппроксимировать зависимостью

$$\delta_1(l) = C_{11}e^{\lambda_1 l} + C_{12}e^{\lambda_2 l}, \quad (8.6)$$

где  $\delta_1$  — модуль вектора отклонения платформы от оси,  $l$  — путь пройденный платформой с начала корректировки (точка  $A$ ). Число функций выбрано из условия плавности траектории в начале коррекции, где необходимо совпадение первой производной траектории с направлением движения платформы. Параметры  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определяются динамическими свойствами комплекса. Начальные значения переходной функции  $\delta_1(l)$  определяются отклонением  $\delta_n$  и углом наклона платформы  $\alpha_n$ :  $\delta_1(0) = \delta_n$ ;  $\dot{\delta}_1(0) = \alpha_n^*$ , где  $\alpha_n^*$  — угол наклона платформы, выраженный в радианах в виду его малости. В случае возникновения больших наклонов платформы (более  $1^\circ$ ) следует  $\alpha_n^* = 1/(tg\alpha_n)$ . В соответствии с начальными услови-

ями составим систему уравнения для определения коэффициентов  $C_{11}$  и  $C_{12}$ :

$$\begin{cases} C_{11}e^{\lambda_{11}l(0)} + C_{12}e^{\lambda_{12}l(0)} = \delta_1(0), \\ [\lambda_1 C_{11}e^{\lambda_{11}l(0)} + \lambda_2 C_{12}e^{\lambda_{12}l(0)} = \dot{\delta}_1(0). \end{cases} \quad (8.7)$$

Заменяв  $\delta_1(0)$  и  $\dot{\delta}_1(0)$  начальными условиями, найдем коэффициенты:

$$C_{11} = \frac{\lambda_{12}\delta_n - \alpha_n}{\lambda_{12} - \lambda_{11}}; C_{12} = -\frac{\lambda_{12}\delta_n - \alpha_n}{\lambda_{12} - \lambda_{11}}. \quad (8.8)$$

Как показал анализ, функцию (8.6) можно использовать для аппроксимации на первом участке траектории, если  $\ddot{\delta}(0) = C_{11}\lambda_{11}^2 + C_{12}\lambda_{12}^2 \leq \gamma$ , где  $\gamma$  — максимально-допустимая величина изменения наклона щитов. Выполнение этого условия обеспечивает максимальное значение второй производной в начальной точке. Если условие не выполняется, то начальный участок траектории лучше аппроксимировать параболической функцией

$$\delta_1(l) = a_2 l^2 + a_1 l + a_0, \quad (8.9)$$

коэффициенты которой определяются из нулевых начальных условий:

$$\delta_1(0) = a_0 = \delta_n; \dot{\delta}_1(0) = a_1 = \alpha_n^*; \ddot{\delta}_1(0) = a_2 = -\gamma/2.$$

Для выполнения условия приближение к проектной оси и обеспечения горизонтальности платформы, на втором участке траектории ( $DE$ ) лучше использовать экспоненциальную зависимость вида:

$$\delta_2(l) = C_{21}e^{\lambda_{21}(l-l_s)} + C_{22}e^{\lambda_{22}(l-l_s)}, \quad (8.10)$$

где  $l_s$  — путь сопряжения двух участков траектории (точка  $D$ ).

Точку сопряжения участков траектории найдем на основе совместного решения уравнений (8.9) и (8.10), при этом неизвестными будем считать  $l_s$  и постоянные  $C_{21}$  и  $C_{22}$ . Искомые величины найдем, приравняв функции и их производные в точке  $l = l_s$ :

$$\begin{cases} a_2 l_s^2 + a_1 l_s + a_0 = C_{21} + C_{22} \\ 2a_2 l_s + a_1 = C_{21}\lambda_{21} + C_{22}\lambda_{22} \\ 2a_2 = C_{21}\lambda_{21}^2 + C_{22}\lambda_{22}^2 \end{cases} \quad (8.11)$$

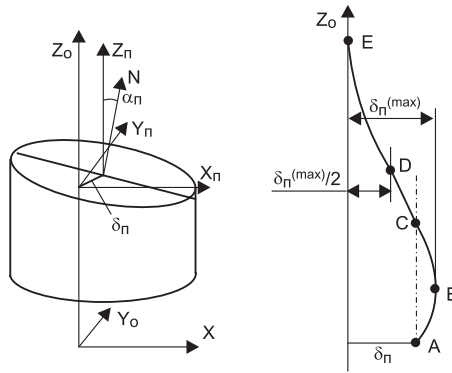


Рис. 8.12. Планирование траектории подъема платформы МСК при корректировке положения

Решая систему уравнение (8.11) и учитывая положительные значения аргументов функции, запишем выражение для нахождения точки сопряжения участков траектории:

$$l_s = (b_1 + \sqrt{b_1^2 + 2\gamma \cdot b_0})/\gamma, \quad (8.12)$$

и найдем постоянные коэффициенты экспоненциальной зависимости, воспользовавшись начальными условиями в точке  $l_s$ :

$$C_{21} = \frac{\delta_2(l_s) - \lambda_{22}\dot{\delta}_2(l_s)}{\lambda_{21} - \lambda_{22}}; C_{22} = \frac{\delta_2(l_s) - \lambda_{21}\dot{\delta}_2(l_s)}{\lambda_{22} - \lambda_{21}}. \quad (8.13)$$

На основании полученных аппроксимирующих зависимостей, запишем траекторию движения МСК при корректировке положения платформы:

$$\delta(l) = \begin{cases} a_{12}l^2 + a_{11}l + a_0 \rightarrow l < l_s \\ C_{21}e^{\lambda_{21}(l-l_s)} + C_{22}e^{\lambda_{22}(l-l_s)} \rightarrow l \geq l_s \end{cases}. \quad (8.14)$$

Для управления комплексом на основе (8.14) определяются координаты точек  $x_n^{(k)}$  и  $y_n^{(k)}$ , углы наклона  $\alpha_n^{(k)}$  платформы в конце каждого шага подъема. Координаты точек траектории в конце  $k$ -го шага подъема равны

$$x_n^{(k)} = \delta(l_k) \cos \beta_n; y_n^{(k)} = \delta(l_k) \sin \beta_n, z_n^{(k)} = z_n^{(A)} + l_k, \quad (8.15)$$

где  $l_k = k \cdot h_u$  — высота подъема с начала корректировки;  $z_n^{(A)}$  — высотное положения МСК в начале корректировки (точка А);

$h_{ш}$  — шаг подъема. В процессе корректировки угол наклона платформы изменяется по закону:

$$\alpha_n(l) = \arctg[\dot{\delta}(l)], \begin{cases} 2a_{21}l + a_{11} & \rightarrow l < l_s \\ \lambda_{21}C_{21}e^{\lambda_{21}(l-l_s)} + \lambda_{22}C_{22}e^{\lambda_{22}(l-l_s)} & \rightarrow l \geq l_s \end{cases} (8.16)$$

В соответствии с приведенными соотношениями проведено моделирование подъема платформы и получены кривые переходных участков, на которых проводилась корректировка смещений и угловых отклонений (рис. 8.13).

Учет влияние тепловых и ветровых нагрузок, действующих на возводимое сооружение, в процессе планирования движения выполняется на основе использования специальных соотношений. В этом случае координаты точек планируемой траектории движения в конце шага подъема корректируются с учетом температурной и ветровой деформации объекта:

$$\begin{cases} x_{mp}^{(k)} = x_n^{(k)} - x_{en}^{(k)} = \delta(l_k) \cos \beta_n - \delta_m(l_k) \cos \theta_m - \delta_e(l_k) \cos \theta_e \\ y_{mp}^{(k)} = y_n^{(k)} - y_{en}^{(k)} = \delta(l_k) \sin \beta_n - \delta_m(l_k) \sin \theta_m - \delta_e(l_k) \sin \theta_e \end{cases} (8.17)$$

В этом случае также корректируется значение угла наклона платформы, так как в процессе температурной и ветровой деформации происходит ее наклон на угол  $\alpha_{en}$ , направление которого определяется ориентацией внешних воздействий по отношению к объекту. Результирующий модуль отклонения от проектной оси

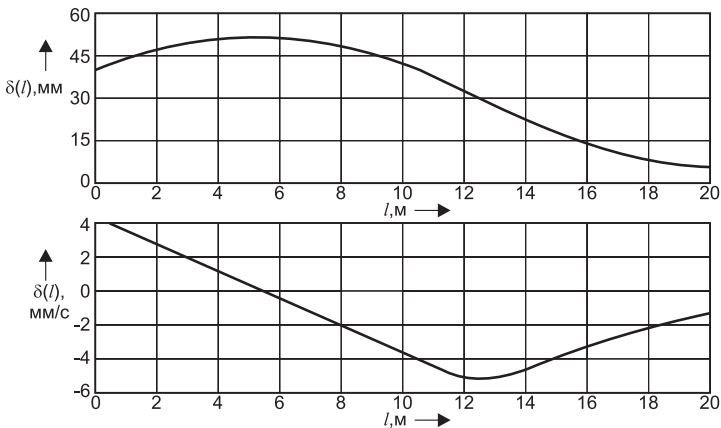


Рис. 8.13. Графики корректировки положения платформы МСК

составляет  $\delta_{mp} = (x_{mp}^2 + y_{mp}^2)^{1/2}$ , а направление результирующего наклона равно  $\varphi = \text{arctg}(y_{mp}/x_{mp})$ .

Заключительной стадией планирования движений МСК является формирование закона изменений обобщенных координат, обеспечивающих отработку планируемой траектории перемещения платформы с учетом корректирующих смещений и внешних воздействий на объект.

# **Глава 9. Роботы и роботизированные комплексы для отделочных работ**

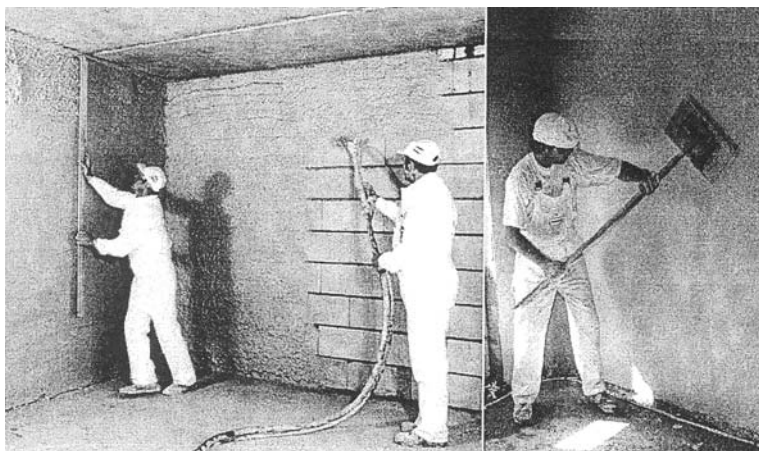
## **9.1. Характеристика штукатурных работ и их технологические особенности**

Штукатурные работы, связанные с нанесением раствора на стены и перекрытия зданий и сооружений из бетона, строительного камня, древесных плит и других стройматериалов являются наиболее широко применяемой технологией в наземном строительстве для защиты и украшения поверхностей. Нанесение штукатурки на наружные поверхности стен служит, прежде всего, для защиты от влаги, загрязненного воздуха и таких влияний атмосферных воздействий, как дождь, град, жара, холод, буря. Штукатурка обеспечивает герметичность поверхности стен, а также используется с целью их декоративного оформления. Кроме того, она служит для целей тепло- и звукоизоляции зданий. При нанесении штукатурки на внутреннюю поверхность стен и перекрытий преследуется цель выровнять имеющиеся неровности и обеспечить чистую и гладкую поверхность. К числу важных задач внутренней штукатурной отделки зданий относятся улучшение микроклимата в помещении за счет регулирования влажности воздуха, влияние на акустику в помещении и повышение защиты от шума. Часто штукатурки используются как эстетическое средство оформления внутренних поверхностей. Специальные материалы штукатурок применяются для повышения пожаростойкости помещений.

Разнообразие видов штукатурки и ее назначений требует соблюдения различных технологических особенностей при ее выполнении. В общем случае штукатурные работы включают операции обрызга, нанесения грунта и накрывки, операцию затирки поверхности. Раствор слоя обрызга наносится на поверхность растворомасосами и его толщина составляет 3—5 мм. Качество нанесения слоя обрызга определяет прочность сцепления и удержания последующих слоев — грунта и накрывки. Для обрызга используют жидкий раствор. Грунт является основным слоем штукатурного намета. Он образует необходимую толщину штукатурки и выравнивает поверхность. Характерной особенностью этой операции

является различная толщина слоев. Если толщина штукатурки большая, то грунт наносят в несколько слоев. Толщина каждого слоя не должна превышать 5—7 мм. Раствор для грунта несколько гуще, чем для обрызга. Толщина накрывки составляет 2 мм. Раствор накрывки наносят на поверхность вручную или машинами по окрепшему грунту. Накрывка образует тонкую мягкую пленку, которая легко затирается или заглаживается. Необходимо также отметить, что производство штукатурных работ включает ряд подготовительных операций: насечка гладких поверхностей; обивка поверхностей сеткой из разных материалов; обезжиривание или обеспыливание; провешивание поверхности; установка маяков; смачивание поверхности.

Прием штукатурного раствора, доведение его до рабочей консистенции, просеивание, перекачивание и нанесение являются механизированными технологическими операциями, в которых человек управляет работой механизмов и следит за их работой. Насечка гладких поверхностей, обивка сеткой, обезжиривание и обеспыливание, провешивание поверхности, устройство маяков и их снятие, смачивание поверхности, нанесение слоев обрызга, грунта и накрывки, разравнивание намета, затирка слоя, отделка откосов и рустов в основном механизированы с помощью ручного инструмента. Однако механизированный инструмент имеет значительную массу (до 3 кг), вибрирует и передает вибрацию на организм человека. Кроме того, в процессе работы необходимо прикладывать усилия для перемещения инструмента параллельно и перпендикулярно обрабатываемой плоскости. Это приводит к быстрой утомляемости рабочего и снижению производительности его работы. Из всего перечня технологических операций наиболее трудоемкими являются нанесение слоев обрызга, грунта и накрывки, а также разравнивание штукатурного намета и его затирка. Это подтверждается данными по трудозатратам [112]. В настоящее время эти операции требуют обязательного участия человека. Если операции нанесения слоев обрызга, грунта и накрывки выполняются с помощью средств малой механизации, то разравнивание штукатурного намета и его затирка производятся вручную, средства механизации для их выполнения практически не применяются (рис. 9.1). В результате на штукатурных работах занято значительное число рабочих, которые выполняют трудоемкую физическую работу, связанную с повышенной влажностью, распылением раствора, вибрацией.



*Рис. 9.1. Рабочие операции при выполнении штукатурных работ*

Анализ выполнения штукатурных работ показывает, что они относятся к числу наиболее трудоемких строительных процессов и отличаются сложной технологией и использованием в большом объеме ручных методов работы. Несмотря на развитие средств механизации, объем ручных операций на штукатурных работах остается значительным и достигает в отдельных случаях 60%. Кроме того, выполнения штукатурных работ связано с повышенной влажностью, распылением раствора, вибрацией, что делает этот вид работ мало привлекательным и вредным для здоровья. В связи с этим во многих странах проводятся работы по механизации и автоматизации штукатурных операций, связанных с подготовкой растворов, нанесением штукатурных растворов на поверхность, их разравниванием и затиркой. В настоящее время созданы установки для приема, приготовления, транспортировки и перекачки растворов, установки для нанесения штукатурных растворов на поверхность, а также штукатурно-затирочный инструмент. Продолжается создание и разработка новых машин, механизмов и инструмента для механизации штукатурных работ, позволяющих устранить ручной труд, значительно повысить производительность и улучшить качество выполнения работ.

В настоящее время строительство располагает новыми технологиями для приготовления, подачи и нанесения штукатурного раствора на рабочую поверхность. В последние годы проводятся интенсивные разработки в области совершенствования технологии



штукатурных работ, из которых для роботизации работ интерес представляют готовые сухие смеси и средства их механизированной обработки. Если раньше способ приготовления раствора путем замешивания из отдельных компонентов на строительной площадке являлся единственной технологией, то в настоящее время используются готовые растворы, поставляемые на стройплощадку. Однако предпосылкой для его использования явилось создание специальных установок, способных его обрабатывать и подавать на рабочий горизонт. Следующий шаг развития штукатурной технологии представляет собой заводское изготовление сухой смеси, которая была предназначена для последующей обработки на стройплощадке. В фабричный раствор должна была только добавляться вода, чтобы он на месте мог достигнуть готового к применению состояния. Основываясь на этом способе, был разработан пригодный к машинной обработке готовый сухой раствор, который произвел революцию в штукатурном деле. С появлением такого материала начало свое победное шествие новое поколение машин для замешивания и подачи штукатурного раствора. За счет разработки готовых сухих смесей стало возможным осуществить переход от дозированного замеса штукатурного раствора к непрерывному процессу перемешивания. В этом случае можно добиться равномерной консистенции раствора, а также оптимального содержания в нем воздушных пор. К тому же запас готового раствора при этом существенно меньше, что является благоприятным фактором при возникновении пауз в работе и в конце рабочего дня, способствующим снижению отходов материала. Эти достижения являются определяющими факторами механизации и автоматизации штукатурных работ. Хорошей предпосылкой решения этих задач является разработка автоматизированных штукатурных станций (рис. 9.2). Разработаны и выпускаются специализированные штукатурные станции, обеспечивающие смешивание компонентов, подачу штукатурного раствора к месту выполнения работ, его перемешивание на месте и подачу и набрызга готового раствора.

Одним из перспективных направлений решения задач комплексной механизации и автоматизации штукатурных работ служит использование средств робототехники. Большой объем штукатурных работ и их высокая трудоемкость являются хорошими стимулами их роботизации. Применение штукатурных манипуляторов и роботов при любых способах выполнения штукатурных работ имеет целью исключить монотонную операцию ручного соплования,

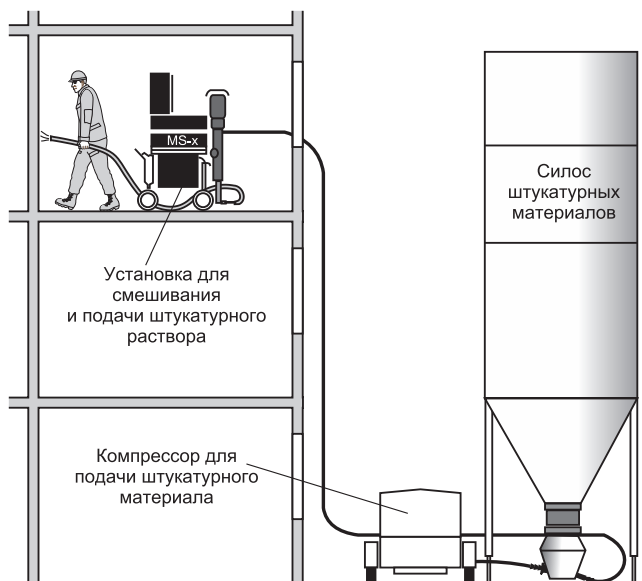


Рис. 9.2. Установка для смешивания, подачи и нанесения штукатурных растворов

повысить производительность труда и качество работ, объединить действия рабочего и функции оператора. Роботизация разравнивания штукатурных составов позволяет механизировать тяжелый ручной труд. Автоматизация штукатурных работ на основе робототехники должна решаться совместно с разработкой новых технологий и комплексного подхода к автоматизации всех рабочих этапов. Особенностью штукатурных работ является разнородность используемых технологий для выполнения отдельных операций. Если для нанесения растворов применяется технология набрызга, то для разравнивания материала и окончательной обработки нанесенной штукатурки используются методы силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Особенностью штукатурных работ также является необходимость провешивания поверхности и выдерживания ее в процессе выполнения работ.

## **9.2. Основные направления роботизации штукатурных работ и требования к штукатурным роботам**

В последние годы интенсивно проводятся исследования и разработки по роботизации штукатурных работ, отличающихся сложной технологией и использованием ручных методов работы. В современном технологическом процессе выполнения штукатурных работ следует выделить три существенных рабочих этапа: нанесение штукатурного материала на стену; грубое разравнивание материала в состояние набора прочности; вторичное разравнивание штукатурки с выдержкой требуемых допусков на неровности поверхности; окончательная обработка нанесенной штукатурки для достижения желаемой структуры поверхности. Первоочередными операциями роботизации штукатурных работ следует рассматривать нанесение раствора на поверхность, операции по грубому и вторичному разравниванию и распределению материала по поверхности. Первоочередность их роботизации связана с большой физической нагрузкой для штукатура и значительными затратами рабочего времени.

В общем случае основные задачи штукатурного робота заключаются в том, чтобы автоматически наносить штукатурный раствор по всему протяжению стены, разравнивать и затирать образовавшийся слой. На первом этапе роботизации окончательное затираание нанесенного штукатурного покрытия не является операцией, подлежащей выполнению в автоматическом режиме, так как она связана с необходимостью очень точной оценки конкретной ситуации, зависящей от многих факторов. От штукатура это требует большого профессионального мастерства и опыта. Выполнение этой операции при помощи робота в принципе технически возможно при использовании адаптивного или интеллектуального управления, но связано с чрезмерно высокими затратами на программное и аппаратное обеспечение. Это требует разработки и использования адаптивных алгоритмов ведения затирающего инструмента вдоль стены и выполнения им различных по частоте и интенсивности манипуляций. Привлечение человека к участию в автоматизированном процессе оштукатуривания поверхностей является обязательным из-за сложного и комплексного характера работ на строительной площадке и необходимости осуществления

визуального контроля за их выполнением. Таким образом, при автоматизации штукатурных работ в первую очередь необходимо решать следующие задачи:

- роботизация операций нанесения штукатурного покрытия и разравнивания штукатурного раствора путем непрерывного движения инструмента;
- разработка новых штукатурных технологий и материалов с целью создания автоматизированного способа выполнения работ;
- создание привлекательной и инновативной профессии оператора-штукатур посредством внедрения современных автоматизированных технологий;
- повышение производительности и качества штукатурных работ при одновременном снижении удельных затрат на один кв. метр площади;
- улучшение условий труда штукатуров и снижение уровня профессиональных заболеваний посредством внедрения роботов.

Роботизация и автоматизации штукатурных работ, согласно поставленным целям и задачам по созданию роботов для их выполнения, предъявляет высокие требования к машинам, сенсорам и способам управления, а также к используемым штукатурным материалам. Кроме того, при роботизации штукатурных операций требуются специальные инструменты, пригодные для автоматизированного нанесения растворов и их точного заглаживания. Лишь адаптированные к технологическому процессу инструменты делают возможным достижение высокой степени автоматизации при выполнении рабочих операций. Рассмотрим основные требования, имеющие место при создании штукатурных роботов.

В первую очередь роботизация операций нанесения и разравнивания растворов предъявляет определенные требования к штукатурному материалу:

- адгезионные качества материала, обеспечивающие хорошую схватываемость штукатурного материала с рабочей поверхностью без необходимости высокого давления прижатия и использования сжатого воздуха;
- незначительная налипаемость штукатурного материала на рабочий инструмент, обеспечивающая требуемое качество выполнения работ;

- длительный срок пригодности к применению, минимизирующий циклы очистки раствороводов и штукатурной машины чтобы увеличить продолжительность работы оборудования;
- достаточная жесткость и стабильность формы, обеспечивающие сохранение качества поверхности после этапа грубого разравнивания;
- устойчивость к скалыванию, позволяющая достигать требуемой затираемости с помощью штукатурного инструмента;
- малая склонность к набуханию, снижающая сопротивление текучести материала в раствороводе;
- неизменная консистенция, определяющая свойства материала и качество его нанесения на поверхность.

Используемые при роботизации механизмы и устройства управления должны обладать следующими свойствами:

- мобильностью, позволяющей менять позицию установки робота внутри этажа, оштукатуривать различные помещения, перемещать робот через лестничный пролет к следующему этажу;
- автонавигацией, обеспечивающей самостоятельное перемещение робота вдоль стены и нанесение на нее штукатурного раствора;
- ориентированием, распознающим при помощи сенсоров границы стен, высоту потолков, границы окон и дверей, выступы и углы, и обеспечивающим проводку робота в помещении для того, чтобы приспособить последовательность движений и подачу раствора к окружающей обстановке;
- достаточной несущей способностью, обеспечивающей удержание устройства подачи материала, заполненное раствором, штукатурного инструмента и позволяющей при движении вдоль обрабатываемых поверхностей справляться с возникающими при этом нагрузками;
- необходимой точностью, удовлетворяющей заданному качеству выполнения работ в пределах всей рабочей зоны, при этом точность позиционирования манипуляционной системы не должна превышать  $\pm 1$  мм;
- компактностью конструкции, дающей возможность проходить в дверные проемы и работать в ограниченных по площади помещениях;
- модульностью построения и незначительной массой, создающие удобства транспортировки робота к месту работы, мон-

тажа и демонтажа, при этом общая масса штукатурного робота не должна превышать допустимой нагрузочной способности перекрытий, составляющей около 250 кг/м<sup>2</sup>;

- прочностью и устойчивостью к погодным условиям, соответствующим типичным условиям строительной площадки;
- простотой обслуживания квалифицированным штукатуром с дополнительным образованием оператора.

Технологический инструмент, используемый роботом для нанесения и затирания раствора, должен удовлетворять следующим требованиям:

- многофункциональностью, обеспечивающей нанесение и заглаживание раствора одним инструментом без замены и многократного оштукатуривания;
- варьировемостью толщины штукатурного слоя, дающей возможность инструменту выравнять неровности между 5—30 мм при нормальном слое штукатурки или 3—6 мм при тонкослойном оштукатуривании;
- способностью к обнаружению отклонений в размерах стен, дающей возможность при автоматизированном проведении штукатурных работ компенсировать имеющиеся и лежащие в пределах допуска отклонения стен по размерам, при этом точность обнаружения должна составлять 0,2 мм;
- возможность использования технологических инструментов различных размеров и быстрой их замены при переходе от поверхностей малой площади к поверхности большой площади и обратно;
- равномерностью нанесения материала, исключающей образование пустот и наплывов материала, упрощающей затирание и сокращающей расход материала.

Определенные требования при роботизации штукатурных работ предъявляются к новой технологии:

- соблюдение геометрической точности штукатурных поверхностей при автоматизированном выполнении штукатурных работ, при этом должны соблюдаться плоскостность и угловая точность, которые не должны превышать 4 мм на расстоянии 2,5 м;
- многофункциональность, позволяющая выполнять штукатурную обработку стен и перекрытий как в новых зданиях, так и при выполнении ремонтных работ в старых строениях;

- простота интеграции в строительный процесс, минимизирующая затраты времени на оснастку и очистку исполнительного инструмента;
- достаточная безопасность, предотвращающая столкновение робота с окружающими предметами, стенами, потолками и делающая безопасным работу обслуживающего персонала;
- высокая производительность работы человеко-машинной системы, превышающая производительность сегодняшней штукатурной бригады, состоящей из 3 человек для обслуживания одной штукатурной машины и выполняющей штукатурные работы на площади 150 м<sup>2</sup> за один рабочий день.

### **9.3. Технология автоматизированного выполнения штукатурных работ**

Основываясь на вышеназванных требованиях, предъявляемых к технологии автоматизированного выполнения штукатурных работ, различными фирмами разрабатываются и испытываются принципиально новые способы нанесения раствора и грубого разравнивания штукатурных поверхностей с помощью роботов. Новые технологии нанесения штукатурного раствора оказывают свое воздействие и на применяемые материалы. Наиболее перспективные технологические концепции находят успешное применение на практике. Для автоматизированного выполнения штукатурных работ необходимо использовать инструмент, с помощью которого можно управлять потоком материала, наносить штукатурный материал на рабочую поверхность, компенсировать имеющиеся отклонения обрабатываемой поверхности от заданных размеров, проводить грубое разравнивание нанесенного раствора.

Функцию подачи материала к инструменту или к оштукатуриваемой поверхности выполняет штукатурная машина, которая также производит смешивание сухого материала с водой. Для подачи готового раствора штукатурная машина связана со штукатурным инструментом посредством растворовода. Для улучшения процесса подачи штукатурный инструмент может оснащаться дополнительными механизмами, например, ротационными, скребковыми или вибрационными инструментами подачи (рис. 9.3). Автоматическое нанесение штукатурки на стену может происходить посредством набрызгивания или набрасывания раствора, а также вслед-

ствие того, что штукатурный материал навальцовывается или придавливается к оштукатуриваемой поверхности. Другая возможность — наполнение полностью или частично замкнутых камер, образующихся между инструментом и рабочей поверхностью. Реализуемое в данном случае грубое разравнивание раствора на поверхности осуществляется посредством соскабливания или срезания излишнего материала. На рис. 9.3 представлены принципиальные эскизные схемы различных штукатурных инструментов для автоматизированного нанесения и разравнивания раствора.

Помимо нанесения и разравнивания штукатурного раствора решающее значение для автоматического выполнения штукатурных работ имеет управление потоком материала при помощи исполнительного инструмента. Для этого штукатурный инструмент может через штукатурную машину начинать и прекращать подачу материала. Для быстрого прекращения оштукатуривания в конце стены или при переходе на выступы стен и ниши все же недостаточно одной только настройки насоса, так как из-за остаточного давления в шланге на исполнительный орган штукатурного инструмента по инерции еще некоторое время поступает раствор. Поэтому требуется иметь в наличии управляемый запорный вентиль, который может сразу остановить истечение материала.

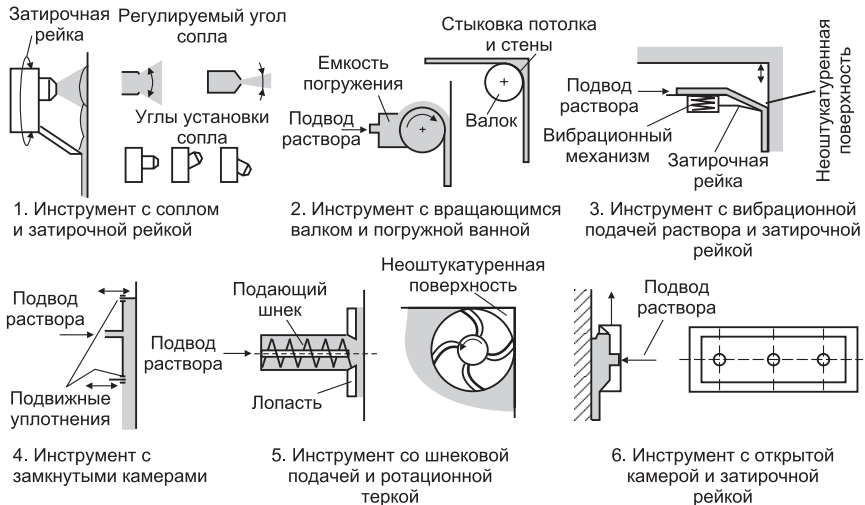


Рис. 9.3. Способы нанесения и заглаживания штукатурного раствора



Для выравнивания больших по размеру неровностей на оштукатуриваемой поверхности, поток материала должен регулироваться в соответствии с их геометрическими размерами. Это означает, что при больших углублениях в штукатурной поверхности для выравнивания требуется больший расход материала, чем при выступах. Это может быть реализовано за счет переменной производительности штукатурной машины, например, при помощи регулируемого насоса или изменения скорости движения штукатурного инструмента при постоянной ее производительности. Таким образом, режим работы исполнительного органа штукатурного робота определяется требуемым расходом материала, который подлежит контролю и управлению.

В первом варианте штукатурного инструмента с применением сопла со сжатым воздухом и встроенной затирочной рейкой для того, чтобы добиться по возможности большей гибкости изменения параметров штукатурного процесса, углы конуса набрызга и наклона сопла должны быть регулируемы как показано на рис. 9.3. Также как и при оштукатуривании вручную требуется затирочная рейка для разравнивания раствора и оштукатуривания стены до мест сопряжения ее с потолком. Вращающаяся или состоящая из нескольких элементов затирочная рейка делает возможным разравнивание снизу вверх и обратно, а также боковое затирание. Достоинства этого варианта заключаются с одной стороны в возможности обработки стен до сопряжения их с потолком и с другой стороны в настройке сопла в зависимости от размера подлежащей оштукатуриванию поверхности. Недостаток состоит в том, что требуется сжатый воздух как дополнительное средство для нанесения штукатурного раствора. Применение нескольких сопел для обработки поверхности большой площади нецелесообразно, так как трудно реализовать равномерное истечение материала через все из них. В этом варианте принципиально нужно производить обработку с гарантированным избытком материала, чтобы избежать возникновения пустот или слишком тонких слоев нанесения штукатурки. Для минимизации толщины слоев материала необходима предварительная оценка неровностей стены и выравнивание их за счет различных скоростей движения штукатурного инструмента. Однако в настоящее время эта проблема еще не решена. При данном способе нанесения штукатурки следует также учитывать потери материала за счет его отскока от обрабатываемой поверхности.

Идея второго варианта штукатурного инструмента, представленного на рис. 9.3 состоит в том, что посредством вращения вала штукатурный раствор забирается из погружной ванны и с определенным усилием равномерно прижимается к стене. Погружная ванна с одной стороны имеет входное отверстие для подачи раствора, а с другой — съемник для задания определенной толщины слоя на валке. Все другие места соприкосновения между валком и погружной ванной уплотняются таким образом, чтобы избежать истечения штукатурного раствора наружу. Достоинства этого варианта заключаются в том, что с помощью вала возможно достигать строго определенного усилия прижатия штукатурного раствора к стене, а также в объединении операций нанесения и разравнивания штукатурки. Недостатком является то, что сопряжения стен с полом и потолком не штукатурятся или же штукатурятся с оставлением переходов в виде закрулений. Из-за фиксированной ширины такого инструмента выступы и впадины поверхности, находящиеся в пределах ширины инструмента, невозможно оштукатурить никак иначе, как за счет избыточной подачи материала. Практическая реализация этого варианта исполнения штукатурного инструмента требует проведения дополнительных исследований и испытаний. Необходимо выяснить, каковы должны быть форма и материал вала, чтобы осуществлять забор штукатурного раствора и отделение его на стене, а также какую толщину слоев наносимой штукатурки можно при этом обеспечить и могут ли они варьироваться посредством различных скоростей вращения вала.

Принцип исполнения штукатурного инструмента с вибрационной подачей материала и затирочной рейкой (рис. 9.3) основывается на подаче штукатурного материала по наклонной плоскости к стене. Это достигается за счет собственного веса и действия вибрационного механизма, который приводит штукатурный материал в колебание, и тот за счет этого, под собственным весом приходит в движение. Специальная затирочная рейка в конце наклонной плоскости должна ограничивать толщину штукатурки заданным ее значением и заглаживать образующийся штукатурный слой. Для этого варианта инструмента также возможно объединение операций нанесения и затирки материала в один технологический ход. Недостаток данного инструмента заключается в невозможности оштукатуривания потолков. Обусловлено принципом его действия также то, что под потолком остается неоштукатуренная полоска стены. Кроме того, поверхность с впадинами с шириной меньшей,

чем фиксированная ширина инструмента не может быть качественно оштукатурена за один проход инструмента. При использовании данного конструктивного варианта необходимо определять оптимальное значение угла наклона плоскости исполнительного органа по отношению к стене. Кроме того, необходимо контролировать схватываемость материала с поверхностью при отсутствии придавливания раствора к стене.

Интересным представляется вариант штукатурного инструмента в виде замкнутой камеры с уплотнительными элементами (рис. 9.3). Этот штукатурный инструмент состоит из камеры, которая образуется пластиной, четырьмя подвижными элементами по ее краям и самой обрабатываемой поверхностью. В начале штукатурного процесса уплотнительные элементы образуют по кругу камеру для того, чтобы могло происходить ее наполнение штукатурным материалом. Во время формирования штукатурной дорожки должны открываться те уплотнительные элементы, у которых уже нанесенный слой штукатурки в состоянии перенять уплотнительную функцию. Если исходить из нанесения штукатурки в форме меандра, то этим элементом является уплотнительная губка, которая при своем движении еще раз промазывает нанесенную штукатурную поверхность. В случае наличия соседнего штукатурного слоя, уплотнительная губка должна быть к нему открыта для того, чтобы обеспечить бесшовную стыковку с ним. Пластина при нанесении штукатурки одновременно выполняет функцию грубого разравнивания.

Преимущества этого варианта инструмента состоят в том, что при корректной установке инструмента неровности стены устраняются автоматически за счет наполнения камеры раствором. Стены могут оштукатуриваться и разравниваться за одну рабочую операцию на всем протяжении от пола до сопряжения с потолком. В качестве недостатка следует отметить наличие подвижных уплотнительных частей, которые подвержены загрязнению и повреждениям, а также фиксированную площадь инструмента, которая не позволяет гибко настраиваться на обработку ниш и выступов. Данный вариант нуждается еще в проведении исследований с целью выяснения уплотняющего воздействия инструмента на качество поверхности. Нет ясности в определении оптимальных значений сил прижатия уплотнительных губок к штукатурным поверхностям. Необходимо также решить вопрос, как достичь хорошего схватывания материала с поверхностью одновременно с простым удалением штукатурного материала с поверхности инструмента.

При использовании инструмента со шнековой подачей материала и ротационной лопастной теркой нанесение штукатурки производится посредством шнекового подающего устройства, которое придавливает раствор к стене (рис. 9.3). Распределение раствора, а также выравнивание неровностей и грубое разравнивание штукатурной поверхности производится ротационной лопастной теркой с наклонными спиралеобразными лопастями. Излишний материал срезается лопастями и вдавливается в пустоты на штукатурной поверхности.

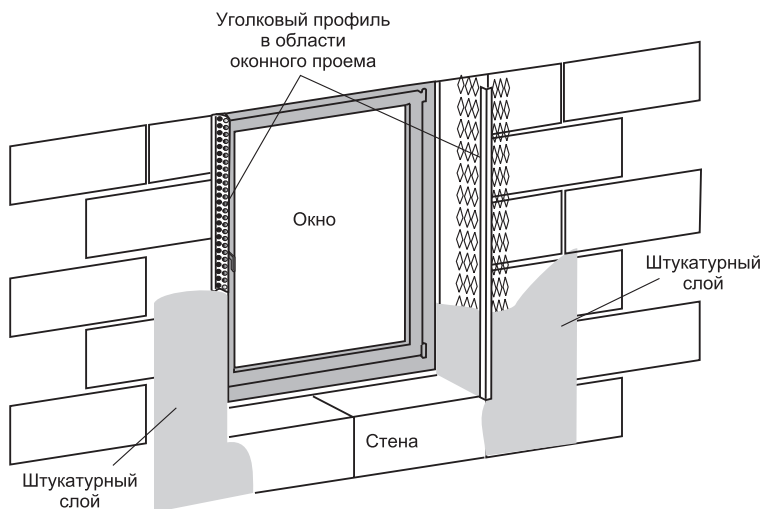
Достоинство данной конструкции заключается в том, что нанесение материала и его грубое разравнивание происходят при выполнении одной операции. Инструмент с помощью поворотных лопастей гибко приспосабливается к размерам штукатурной площади. Недостаток состоит в том, что при применении этого инструмента необработанными остаются углы помещения, которые необходимо штукатурить от руки. Исходя из этого кanten на сопрягаемых со стеной плоскостях, таких как пол и потолок, являются критическими областями, в которых для вращающегося инструмента может возникнуть опасность повреждения. Данное конструктивное решение необходимо еще детально исследовать с целью определения значений толщины штукатурного слоя, которые могут быть обеспечены этим инструментом без отслоения материала от поверхности, а также, начиная с какой толщины слоя, требуется сжатый воздух как дополнительное средство нанесения раствора. В равной степени не ясно, какая скорость вращения лопастей является оптимальной, и как они могут защищаться от повреждений.

Очень простым по конструкции является штукатурный инструмент с открытой камерой и встроенной затирочной рейкой (рис. 9.3). Он состоит из простой плиты с несколькими отверстиями для подвода штукатурки и примыкающей к ней по периметру затирочной рейки для заглаживания материала. Количество и расположение штукатурных подводов зависит от величины и равномерности заполнения камеры. Достоинством этого инструмента, также как у других вариантов, является то, что нанесение материала и его заглаживание выполняются одним инструментом. Принцип работы инструмента позволяет штукатурить стены от пола до потолка. Конструкция инструмента отличается повышенной прочностью, так как отсутствуют движущиеся части. Недостатки данной конструкции являются следствием фиксированных размеров инструмента, из-за которых невозможна адаптация к размерам штука-

турных площадей, так что выступы или впадины больше определенной величины могут быть оштукатурены лишь посредством замены инструмента. К тому же имеющиеся в инструменте отверстия требуют точного сопряжения с размерами диаметров подающих раствор шлангов. Данный конструктивный вариант также нуждается в проведении исследований с целью определения оптимальной степени наполнения инструмента штукатурным раствором, а также выяснения достаточности схватывания штукатурного раствора с поверхностью стены без дополнительного подвода сжатого воздуха. Исходя из этого, нужно оценить, достаточно ли уплотняющего воздействия, чтобы добиться сплошного покрытия поверхности без взбухания уже нанесенных слоев за счет притока материала.

При оштукатуривании потолка положение ориентирующей рейки, проложенной вдоль стены, не имеет значения. Ориентирование робота должно производиться по отношению к стенам и уже нанесенной на потолок штукатурки. Процесс оштукатуривания потолка должен начинаться со стены, вдоль которой робот может перемещаться и продолжаться до тех пор, пока он не достигнет конца перекрытия. После этого робот должен переместиться поперек стены на ширину нанесенного штукатурного покрытия, что происходит автоматически или посредством управляющего воздействия со стороны штукатурки. При этом необходимо обращать внимание на достаточное перекрытие рабочей зоны робота с уже нанесенным слоем, чтобы избежать зазоров при нанесении штукатурки. Каждый раз уже обработанный участок поверхности служит ориентиром для отделки последующего.

Наибольшие сложности возникают при оштукатуривании оконных или дверных проемов (рис. 9.4). Выполнение этих операций требует предварительной ориентации робота относительно кромочного профиля. На первом этапе автоматизации ориентацию робота лучше производить вручную с использованием ориентирующей рейки. Так задается необходимая толщина штукатурного слоя, определяемая положением углового профиля по отношению к поверхности стены. После этого робот перемещается в исходную позицию и штукатурный процесс может быть начат. В задании толщины штукатурного слоя теперь нет необходимости, так как он получается автоматически из уже измеренной толщины кромочного профиля. Эта измерительная операция повторяется для каждой боковой поверхности проема при наличии установленного кромочного уголка.



*Рис. 9.4. Нанесение штукатурки при наличии кромочных угловых профилей в области стыковки стены и оконного проема*

При оштукатуривании потолка положение ориентирующей рейки, проложенной вдоль стены, не имеет значения. Ориентирование работа должно производиться по отношению к стенам и уже нанесенной на потолок штукатурки. Процесс оштукатуривания потолка должен начинаться со стены, вдоль которой робот будет перемещаться. После этого робот должен переместиться поперек стены на ширину нанесенного штукатурного покрытия, что происходит автоматически или посредством управляющего воздействия со стороны оператора. При этом необходимо обращать внимание на достаточное перекрытие рабочей зоны робота с уже нанесенным слоем, чтобы избежать зазоров при нанесении штукатурки.

При использовании автоматизированной технологии выполнения штукатурных работ важным является распределение функций между штукатуром и роботом, оператором и системой управления роботом. Перед началом процесса нанесения штукатурного раствора на обрабатываемые поверхности необходимо выполнить определенные подготовительные операции. Часть этих операций проводится и при выполнении штукатурных работ вручную, без робота. Лишь после их окончания может начаться процесс оштукатуривания поверхностей. После его начала оператор может параллельно с работой робота проводить корректирующее разравни-

вание и другие виды работ. Отдельные функции между штукатуром и роботом должны быть четко распределены. Перед началом непосредственного процесса штукатур должен:

- проверить грунтовую основу стен и перекрытий;
- установить и выровнять вдоль стены ориентирующие рейки;
- обозначить трубы и электрическое оборудование;
- закрепить штукатурные профили для защиты кантов, образования швов и переходов в местах подоконников.

После этого следует доставить штукатурный робот и штукатурную машину на место работы и привести их в готовность к работе. Затем робот необходимо переместить в исходную позицию у стены и задать необходимую толщину наносимого штукатурного слоя. После начала автоматизированного процесса оштукатуривания роботом выполняются следующие операции:

- компенсация ошибок по наклону вследствие неровностей пола и ориентирование штукатурного инструмента относительно вертикали;
- измерение расстояния от инструмента до стены и его ориентация при помощи проложенной параллельно стене опорной направляющей;
- выверка штукатурного инструмента на требуемую толщину слоя, которая измеряется по отношению с имеющимся соседним штукатурным слоем;
- оценка поверхности стены в рабочей зоне робота, в особенности допусков стен, границ стен и имеющихся проемов, а также возможных помех;
- управление штукатурной машиной и подачей раствора по раствороводу;
- меандровое движение штукатурного инструмента для нанесения штукатурного раствора на стену и грубое разравнивание нанесенной штукатурки;
- автоматическая смена рабочей позиции вдоль стены.

Во время работы робота оператор может параллельно выполнять дополнительные операции: установку и выравнивание ориентирующих реек, обозначение мешающих контуров, закрепление штукатурных профилей, оклеивание оконных и дверных проемов, визуальный контроль качества уже оштукатуренной стены, тонкую затирку поверхности, устранение возможных недостатков.

## 9.4. Принципы построения штукатурных роботов

Исходя из направлений и требований автоматизации штукатурных работ, можно сформулировать основные принципы построения штукатурных роботов. Современные штукатурные роботы должны иметь специализированный манипулятор с набором инструмента, измерительно-управляющее устройство, обеспечивающее позиционное, скоростное и силовое управление перемещением рабочего инструмента, устройство передвижения, различные измерительные датчики и сенсорные устройства, устройства контроля и диагностики. Посредством сенсоров определяется необходимый объем потока подаваемого штукатурного материала, оценивается структура обрабатываемой поверхности, а также осуществляются регулирование положения и ориентирование инструмента относительно нее.

Особое значение придается, прежде всего, кинематической структуре штукатурного робота, с помощью которой осуществляется перемещение исполнительного инструмента для образования штукатурного слоя. Главная задача манипуляционной системы состоит в том, чтобы осуществлять ведение штукатурного инструмента вдоль обрабатываемой поверхности на необходимом расстоянии и с определенной ориентацией по отношению к ней. Для нанесения штукатурки в одной плоскости необходимы, как минимум, две степени свободы, чтобы перемещать штукатурный инструмент вдоль стены в продольном и поперечном направлениях. Для того, чтобы осуществить вертикальное движение инструмента, необходимо компенсировать уклон робота к стене с помощью еще как минимум одной степени свободы. Для точной установки расстояния инструмента до стены и его ориентирования вдоль нее необходимы еще две степени свободы, в случае, если необходимо выровнять неточности позиционирования. Дополнительные степени свободы необходимы для проведения точного ориентирования инструмента. Это необходимо для компенсации неровностей пола, выполнения технологических приемов или компенсации погрешностей позиционирования при мобильной платформе. Таким образом, в общем случае специализированный штукатурный робот должен содержать 6 степеней подвижности.

В зависимости от исполнения робота ориентирование инструмента может происходить с помощью специальной опоры, которая должна корректировать положение всего робота в целом. На рис. 9.5



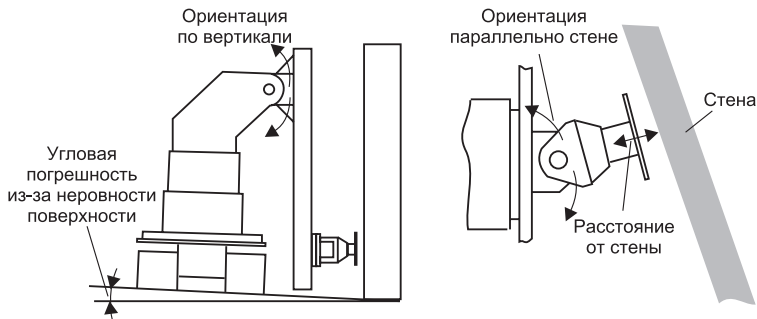


Рис. 9.5. Виды ориентации штукатурного инструмента робот

показаны степени свободы, необходимые для ориентации штукатурного инструмента на примере робота в декартовых координатах.

В основном кинематические модели роботов отличаются линейными осями и осями вращения, которые допускают прямые и круговые движения. Для штукатурных роботов интерес представляют четыре основные кинематические структуры с различным построением трех основных осей. На рис. 9.6 схематически представлены четыре кинематических принципа. Оценка этих кинематических принципов в соответствии с основными требованиями, предъявляемыми к выполнению штукатурных операций, проводится в таблице 9.1.

Таблица 9.1

*Сравнительная оценка кинематических схем для автоматизированного режима выполнения штукатурных работ*

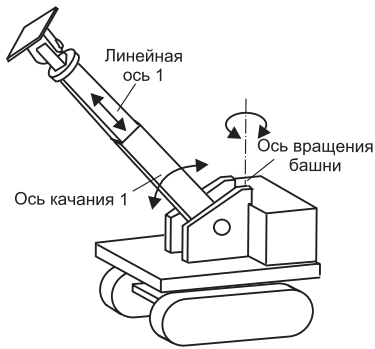
Критерии оценки	Системы координат кинематических схем			
	Прямоугольные	Цилиндрические	Полярные	С осями качаний
Требуемые степени свободы	2–5	4–5	5	4–5
Настраиваемая рабочая зона	+	☒	--	-
Компактность	-	☒	+	++
Высокая точность	++	+	☒	☒
Минимальные затраты на техническую реализацию	++	+	-	-
Простота монтажа датчиков	+	☒	-	-

Критерии оценки	Системы координат кинематических схем			
	Прямоуголь- ные	Цилиндри- ческие	Поляр- ные	С осями качаний
Гибкость	☒	☒	+	++
Простота контроля положения	☒	☒	-	-
Стоимость	☒	☒	-	-

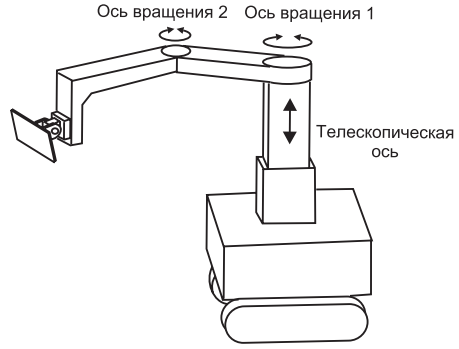
++ идеально ; + хорошо; ☒ достаточно; — недостаточно; -- плохо

Анализ показывает, что кинематические схемы с полярной системой базовых координат, несмотря на их компактное построение, меньше всего подходят для решения задачи оштукатуривания из-за сферической формы рабочей зоны. Более пригодными в этом смысле являются кинематические схемы с осями качаний, за счет ее большой гибкости и компактности. Технические затраты на управление и ограниченная точность из-за кинематических ошибок для этой схемы являются основными недостатками. Кинематические схемы с цилиндрической системой базовых координат, в равной степени как и с прямоугольной, хорошо подходят для штукатурных роботов, но все же с некоторыми недостатками, касающимися рабочей зоны и точности. Лучшее для выполнения штукатурных работ подходит кинематические схемы с прямоугольной системой координат, что объясняется хорошей согласованностью прямоугольной рабочей зоны робота с обычно плоской поверхностью оштукатуриваемых стен и повышенной точностью, за счет простоты выполнения ориентации кинематических осей вдоль заданных траекторий движения. Затраты на техническую реализацию подобных систем за счет простых кинематических связей являются существенно более низкими по сравнению с другими вариантами. Недостатком являются большие габаритные размеры, обуславливаемые применением подобной схемы построения кинематики.

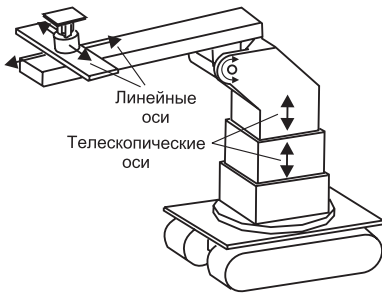
В качестве примера рассмотрим компоновочную схему штукатурного робота, представленного на рис. 9.7. Такой робот может использоваться для набрызга раствора в жилых и общественных зданиях. Он представляет собой мобильную конструкцию на мини-шасси. Основой манипулятора служит телескопическая штанга, которая в процессе работы распирается между полом и потолком. Манипулятор, установленный на штанге, имеет два звена и



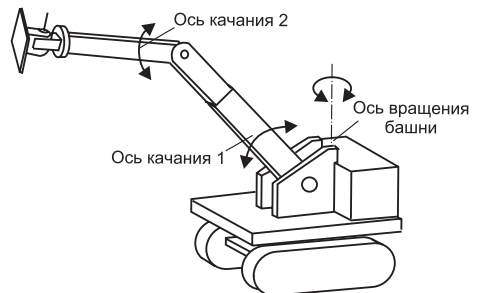
Сферическая кинематика



Цилиндрическая кинематика



Прямоугольная кинематика



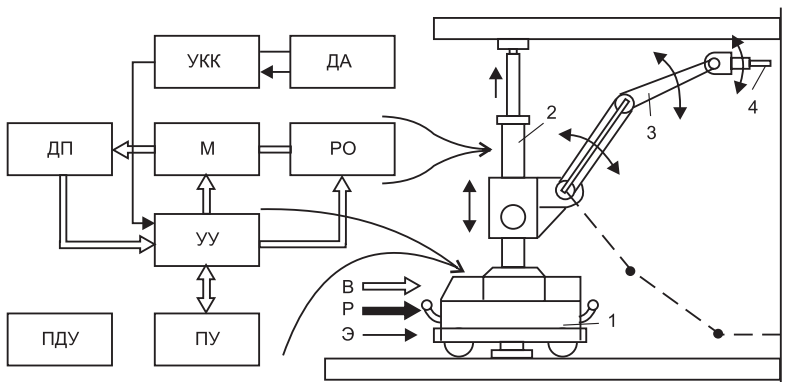
Кинематика с осями качания

Рис. 9.6. Кинематические принципы построения штукатурных роботов

может передвигаться вдоль штанги. Рабочий орган может занимать горизонтальное и вертикальное положения. Это позволяет вести оштукатуривание стен и потолков. Рабочий орган снабжается сменным набором рабочего инструмента. Подача команд и корректировка программы робота осуществляются с местного пульта ПУ или пульта дистанционного управления ПДУ. Эти команды поступают в устройство управления УУ, которое на их основе формирует управляющие воздействия для звеньев манипулятора и рабочего органа РО.

Положение звеньев манипулятора контролируется датчиками положения ДП. Для контроля качества поверхности используются устройство контроля УКК и акустические датчики ДА. Мобильные платформы штукатурных роботов могут использовать шагающие, гусеничные, колесные или гибридные механизмы передвижения. Такие роботы позволяют решать задачу комплексной автоматизации штукатурных работ в жилищном и гражданском строительстве.

Для штукатурных роботов могут применяться электромеханические и гидравлические приводы. Оба вида привода удовлетворяют требованиям, предъявляемыми к штукатурным роботам. Их срав-



*Рис. 9.7. Строительный робот для штукатурных работ*  
 1 — мини-шасси, 2 — телескопическая штанга, 3 — манипулятор, 4 — рабочий орган, М — манипулятор, РО — рабочий орган с соплом, УУ — устройство управления, ДП — датчики положения, ДА — датчик акустический, УКК — устройство контроля качества поверхности, ПУ — пульт управления, ПДУ — пульт дистанционного управления, В — воздух, Р — раствор, Э — электроэнергия

нительная оценка представлена в табл. 9.2. Анализ приведенных в табл. 9.2 результатов показывает, что гидравлические приводы являются более предпочтительными в отношении способности передавать энергию в концентрированном виде и прочности элементов управления (обычно ими являются регулируемые вентили). Основными их недостатками, по сравнению с электромеханическими приводами, являются плохая регулируемость, низкий КПД, невысокая жесткость рабочих характеристик, низкая точность и опасность загрязнения окружающей среды из-за возможных утечек масла.

Современные электромеханические бесколлекторные сервоприводы более пригодны для того, чтобы удовлетворить требованиям автоматизированного процесса выполнения штукатурных работ на строительной площадке. Это, прежде всего, основывается на простом регулировании, высокой жесткости их рабочих характеристик и точности позиционирования при достаточной прочности этих приводов. В целом применение этих двигателей простых контуров регулирования по току, скорости и положению гарантирует точность работы приводов и позиционирования степеней подвижности манипулятора.

Таблица 9.2

*Оценка свойств приводов штукатурных роботов*

Требования	Электро- Механический	Электро- гидравлический
Небольшая масса	⊘	⊘
Минимальные габариты	⊘	⊘
Концентрация энергии	+	++
Пиковые нагрузки	++	⊘
Регулируемость	++	–
Компактность и прочность блока управления	⊘	+
КПД	++	–
Срок службы	+	+
Высокая надежность	+	⊘
Низкая стоимость	⊘	⊘
Высокая жесткость рабочих характеристик	+	–
Динамические свойства	++	+

Требования	Электро- Механический	Электро- гидравлический
Высокая точность позиционирования	++	+
Экологичность	++	--

++ идеально; + хорошо; □ достаточно; – недостаточно; -- плохо

Для каждого привода дополнительно необходимы редукторы, обеспечивающие возможность передачи требуемых статических и дополнительных динамических сил и моментов. Лишь последняя ось привода, на которой с помощью фланца закреплен штукатурный инструмент, может быть выполнена без передачи. Редуктор необходим также для большинства приводов, чтобы достигать требуемых скоростей (числа оборотов) на выходном валу, лежащих большей частью в области ниже номинальных значений, без ухудшения качества процесса регулирования. Кроме того, для линейных осей необходим редуктор для преобразования вращательного движения привода в линейное перемещение. От редуктора требуется, прежде всего, высокая жесткость, компактность конструкции, отсутствие зазоров в передачах. Для этих целей могут использоваться специальные редукторы с планетарными передачами или похожие без зазоров, применяемые в роботах, которые в зависимости от исполнения обладают высоким степенями редукции или жесткости.

В качестве аппаратного обеспечения для управления штукатурным роботом достаточно применения контурной системы на базе микроЭВМ. Для настройки каждой оси привода, а также для ввода данных сенсорной системы необходимы соответствующие ресурсы для организации входа-выхода сигналов системы управления [112]. В качестве еще одного технического средства требуется устройство для радиосвязи с оператором. Для этого могут использоваться системы радиуправления, применяемые для управления кранами. Они уже широко используются в практике строительства и по объему выполняемых функций вполне достаточно для штукатурного робота. На базе этих технических средств основывается операционная система, работающая в реальном масштабе времени, с различными задающими элементами. В этой системе протекают все критические по времени процессы управления, как, например, регулирование осей привода или задание траекторий движения.

В процессе автоматического оштукатуривания на базе задаваемой программы и измерительной информации, поступающей с

датчиков и сенсоров, определяются подлежащие выполнению отдельные движения и коммутационные функции включения робота. Система управления робота формирует соответствующую последовательность команд, включающих команды перемещения, команды на открытие и закрытие штукатурного вентиля, управления штукатурной машиной. Этот набор команд подлежит предварительной интерполяции. При этом технологические команды анализируются с учетом ограничивающих факторов, например, удовлетворяют ли они параметрам рабочей зоны робота, могут ли произойти столкновения с окружающими предметами, может ли выдерживаться запрограммированная скорость перемещения и не произойдет ли наложения перемещений на технологических переходах. В соответствии с этим настраиваются необходимые параметры для интерполяции движения. Одна из основных функций интерполятора заключается в задании соответствующих скоростей в зависимости от неровностей стены, чтобы достичь желаемого качества нанесения материала на стену, не превышая значений кинематических и динамических ограничений робота. В соответствии с набором команд интерполятор при учете требуемых скоростей перемещения рассчитывает новую заданную позицию и ориентацию инструмента в прямоугольной системе координат. При этом движение робота, определенное в декартовом пространстве, пересчитывается в заданные позиционные значения для кинематических осей робота. Прошедшие трансформацию значения положения для осей робота передаются далее позиционным регуляторам. При планировании движений штукатурного робота выработка командных сигналов выполняется в соответствии с информацией датчиков и сенсоров, контролирующих расстояния инструмента до стены, измеряющих неровности стен. При этом возможно для задания траекторий перемещения аддитивное использование данных сенсоров. Необходимые сопряжения для присоединения сенсоров и измерительных датчиков, распознающих штукатурные поверхности и оценивающих штукатурный процесс, содержатся в стандартных системах управления лишь частично или отсутствуют вообще.

Для автономной работы в автоматизированном режиме роботу необходима определенная информация о его локальном местоположении и поверхности, которую он должен штукатурить. Этой информацией при выполнении штукатурных работ робот должен обеспечивать себя сам с помощью соответствующих измеритель-

ных датчиков, которые должны распознавать особенности окружающей обстановки: стенных проемов, углов, границ стен, инсталляционных труб и т. д. Это может осуществляться только при помощи сенсоров и датчиков, которые непрерывно поставляют необходимую измерительную информацию. Только так можно избежать столкновений с окружающими предметами и воспрепятствовать нанесению штукатурки на не предусмотренные для этого поверхности. Измерительные датчики штукатурных роботов должны обеспечивать при автоматизации выполнения операций:

- измерение расстояния до рефлектирующей рейки, проложенной вдоль стены с точностью не менее 1 мм;
- измерение угла наклона инструмента с точностью  $\delta < 0,15^\circ$ ;
- распознавание предметов, создающих помехи (труб и пр.)  
 $\delta < 5\text{--}10$  мм;
- распознавание дверных и оконных проемов, окончания стен  
 $\delta < 2\text{--}5$  мм;
- определение толщины нанесенного штукатурного слоя  
 $\delta < 1$  мм.

На рис. 9.8 представлен принцип ориентации рабочего инструмента по отношению к стене. С помощью датчиков расстояния определяется вначале расстояние до двух точек рефлектирующей рейки, проложенной вдоль стены. С учетом задаваемой толщины штукатурного слоя исполнительный инструмент точно устанавливается по вертикали с помощью датчика угла наклона. Определение толщины наносимого штукатурного слоя после смены положения робота производится по отношению к нанесенному соседнему слою, для избежания образования швов между ними.

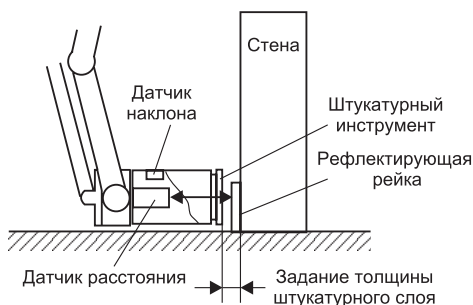


Рис. 9.8. Размещение датчиков при ориентации исполнительного инструмента



В зависимости от конструкции штукатурного инструмента могут использоваться различные измерительные датчики. В случае применения уже упоминавшихся камер для нанесения штукатурного раствора требуются дополнительные датчики для контроля степени их заполнения (рис. 9.9). Наряду с измерительными датчиками для определенных задач достаточно использовать детекторные датчики. Такие датчики можно использовать для распознавания дверных и оконных проемов, границ пола и потолка, монтируемых труб, толщины соседнего слоя, окончания стен.

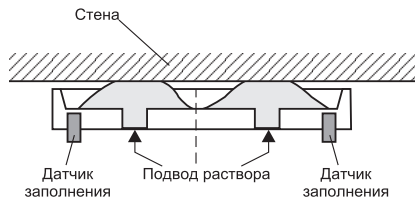


Рис. 9.9. Датчики для контроля заполнения инструмента

Во время выполнения штукатурных операций в автоматическом режиме оператор не должен находиться в рабочей зоне манипулятора, поэтому размещение управляющей системы непосредственно на работе не возможно. Вариант стационарного размещения производственной системы также не подходит, так как место работы на стройплощадке постоянно меняется и оператор, как и штукатур постоянно являются участниками рабочего процесса. Пульт управления должен быть постоянно при операторе. Он должен быть компактным и не тяжелым, чтобы оператор мог постоянно в течение рабочей смены носить его с собой без ограничения свободы передвижения. — 250×100×60 мм.

Пример исполнения панели обслуживания пульта для дистанционного радиоуправления роботом представлен на рис. 9.10. Такой пульт может подвешиваться на поясе штукатур, не создавая ему помех в перемещении. Наряду с кнопкой аварийного отключения, необходимой по условиям техники безопасности, на панели расположены еще кнопки для пуска и остановки робота. Для управления ходовой частью робота используется джойстик. На роботе размещается дисплей и световое табло, которое сигнализирует о рабочем состоянии. Из сообщений безопасности на роботе также имеется кнопка аварийного отключения и вращающаяся сигнальная лампа. Зона работы должна иметь временное ограждение.

Для достижения исполнительным органом всех необходимых рабочих точек штукатурный робот должен осуществлять смену рабочей позиции. Помимо необходимости иметь высокую мобильность на рабочем этаже, робот должен преодолевать типичные для строительной площадки препятствия такие, как выступы, трубы, доски и лестницы с уклоном до 35°. Для создания мобильной платформы штукатурного робота могут использоваться ряд принципов построения и реализации ходовых частей.

Колесные или гусеничные ходовые части обладают простотой построения, достаточной устойчивостью, однако они имеют ограниченную способность по преодолению лестниц и препятствий. Если используются колеса, то диаметр колеса должен быть значительно больше, чем высота преодолеваемой ступеньки лестницы. У гусениц достаточно выполнить колеса немного больше чем ступенька лестницы. К тому же при применении гусениц можно добиться высокой маневренности, до вращения на месте путем использования двойного привода.

Особый интерес для штукатурных роботов представляют шагающие ходовые части, которые могут преодолевать крупногабаритные предметы и высокие лестницы. Недостатками являются технически сложное регулирование и большое количество приводов, которые делают шагающий движитель громоздким и дорогостоящим. Гибридные ходовые части роботов объединяют в своей конструкции свойства шагающих и колесных платформ. Достигается это за счет оснащения опор специальными шарнирными узлами, позволяющими изменять ориентацию опоры и превращать механизм из шагающего в колесный и наоборот. Созданная в Токийском технологическом институте разработка носит название Roller-Walker [113, 114]. Обладая чрезвычайной маневренностью при перекатывании и разворотах (рис. 9.11), такая платформа позволяет роботу преодолевать и ступенчатые преграды на своем пути, что



Рис. 9.10. Пульт дистанционного управления робота

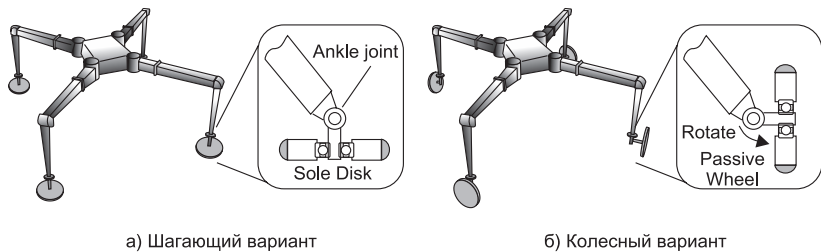


Рис. 9.11. Базисный вариант гибридной платформы *Roller-Walker*

особенно важно при перемещении по лестничным проемам. При необходимости взаимное положение несущих штанг может меняться, что дает возможность такому роботу перемещаться по довольно узким прямолинейным полосам, остающимся свободными от препятствующих движению предметов, вдоль обрабатываемых штукатурных раствором стен.

Опорные диски таких мобильных платформ служат одновременно и колесами. Механизм разворота шарнирного соединения представлен на рис. 9.12. Он в состоянии выдерживать полезную нагрузку на треть превышающую его собственную массу. При дальнейшем совершенствовании узлов и соединений это соотношение может

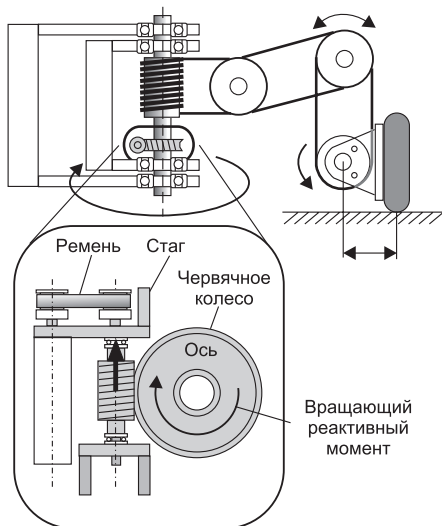


Рис. 9.12. Шарнир вращения механизма передвижения платформы

быть улучшено. Важное значение имеет поддержание оптимального сочетания между размерами опор, углами их взаимного расположения в колесном варианте, а также диаметрами и геометрией колес. Из нашедших применение ходовых частей, наиболее полно требованиям, предъявляемым к мобильной платформе штукатурного робота, удовлетворяют устройства на гусеничном ходу. Такие ходовые механизмы имеют большинство строительных машин, а также транспортных средств военной техники. Накопленный опыт позволяет создавать эффективные и надежные узлы механизмов передвижения, принципиальные технические решения которых могут быть положены в основу создания мобильных штукатурных роботов. С их помощью можно преодолевать уклоны до  $40^\circ$ .

## 9.5. Конструктивное исполнение штукатурных роботов

Одним из первых применений манипулятора для штукатурных работ является создание в Белоруссии специального многофункционального манипулятора для штукатурных работ (рис. 9.13). Манипулятор выполнен на трехколесном шасси, на котором смонтированы несущая стойка, привод и блок управления [136]. Вдоль стойки перемещается щит, закрепленный на ползуне, передвигаемом электроприводом. В рабочем положении манипулятор раскрепляется в распор между полом и потолком. При выполнении штукатурных работ у стены монтируют инвентарные маяки, по которым устанавливают плоскость щита манипулятора. Между щитом и стеной образуется полость, куда закачивается раствор. После его схватывания щит отводится от стены и электроприводом поднимается вдоль вертикальной стойки на шаг, равный высоте щита, и вновь прижимается к маякам. После оштукатуривания первой захватки устройство передвигают вдоль стены на ширину щита и процесс повторяется. Манипулятор снабжен цикловой системой управления, которая обеспечивает дистанционное и автоматическое управление в зоне рабочей захватки. Система управления позволяет обеспечить автоматический скользкий режим работы, при котором щит непрерывно перемещается по маякам и непрерывно подается раствор. Несмотря на невысокое качество оштукатуренных поверхностей, испытания этой конструкции показали принципиальную возможность автоматизации

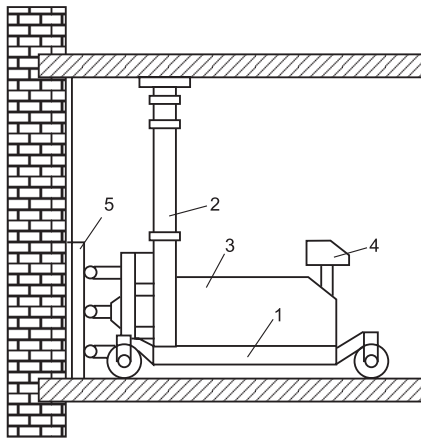


Рис. 9.13. Манипулятор для штукатурных работ на подвижной платформе

1 — шасси; 2 — стойка телескопическая; 3 — привод; 4 — пульт управления; 5 — щит

штукатурных операций на основе использования достижений робототехники. Они позволили определить основные направления роботизации штукатурных работ. В первую очередь это относится к технологии разравнивания и затирки штукатурного слоя. Использование этой установки на затирке цементной стяжки показало достаточно высокое качество обработанной поверхности и хорошую производительность.

Одним из возможных вариантов конструктивного исполнения штукатурных роботов является техническое решение, базирующееся на манипуляционной кинематике с вращающимися осями (рис. 9.14). За счет этого возможно чрезвычайно компактное исполнение робота. На рисунке представлены рабочие позиции такого робота в состоянии оштукатуривания стен и потолков.

Вторым возможным вариантом конструктивного исполнения робота является базирующееся на линейной кинематике техническое решение, при котором выдвижение телескопической оси по высоте достигается подъемной штангой, приводимой в движение передачей вращения (рис. 9.15). При такой кинематике за счет встроенного механизма качения также возможно оштукатуривание потолков. На рис. 9.15 представлены габаритные размеры и параметры рабочей зоны при этой кинематической схеме.

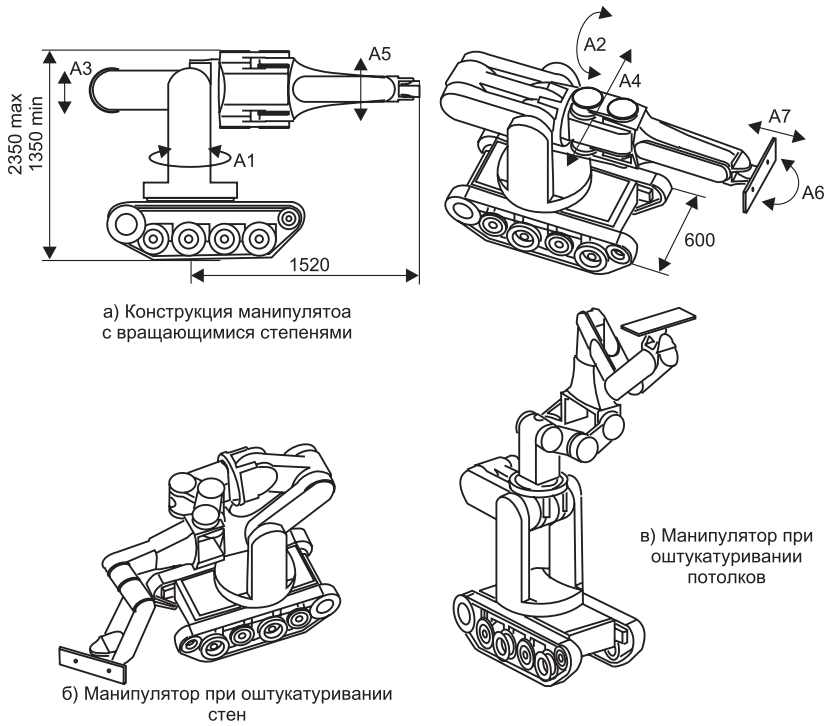


Рис. 9.14. Конструктивное исполнение штукатурного робота, базирующегося на манипуляционной кинематике

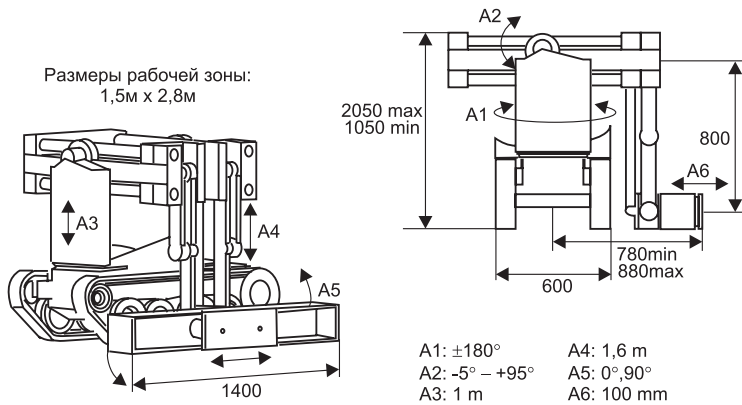


Рис. 9.15. Конструкция робота для оштукатуривания стен и потолков, базирующаяся на линейной кинематике

В качестве третьего конструктивного варианта штукатурного робота может быть приведено техническое решение, также базирующееся на линейной кинематике с очень простым и недорогим в конструктивном исполнении построением осей (рис. 9.16). Данное кинематическое исполнение характеризуется регулируемой производительностью. Степень автоматизации может варьироваться, начиная от базового устройства с тремя приводными осями для реализации штукатурных операций. Такая конструкция снабжается колесной ходовой частью и опорными домкратными механизмами для установки платформы в рабочее положение. В таком исполнении перемещение и фиксация всех других осей и выполнение связанных с ними операций по ориентации штукатурного робота осуществляются вручную. При полностью автоматизированном уровне исполнения манипулятор снабжается приводными механизмами по всем степеням подвижности и оснащается гусеничной платформой. На рис. 9.16 представлен базовый вариант робота с его степенями свободы и реализуемой рабочей зоной. Используемая прямоугольная система координат позволяет упростить управление роботом.

На рис. 9.17 показано размещение робота при оштукатуривании стен, а также габаритные размеры кинематики в свернутом положении для обеспечения перемещения робота через дверные проемы. Рассматриваемый штукатурный робот имеет ширину за-

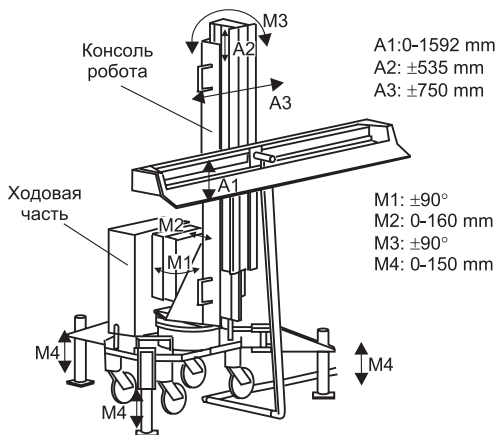


Рис. 9.16. Штукатурный робот с линейной кинематикой для стен и потолков

хвата 1,5 м и обеспечивает оштукатуривание стен высотой до 2,7 м. При выполнении штукатурных работ у стены монтируют инвентарные маяки, по которым устанавливают манипулятор. Робот снабжен системой управления, которая обеспечивает дистанционное и автоматическое управление в зоне рабочей захватки. Система управления позволяет обеспечить автоматический скользящий режим работы. В этом случае рабочий инструмент непрерывно перемещается по маякам, и непрерывно подается раствор. Технико-экономический анализ показывает, что использование такого робота на штукатурных работах эффективно при выполнении работ на крупных объектах социально-бытового назначения, где имеются большие объемы работ, не требующие частой перестановки и переноски оборудования.

Рассмотренные конструкции безусловно представляют определенный практический интерес для строительных фирм. Однако они требуют проведения комплексных исследований и испытаний для получения оптимальных конструкторских решений.

Нанесение штукатурки на потолок может производиться несколькими способами: параллельно полу, параллельно необработанному потолку, путем горизонтирования исполнительного органа. Самый простой способ нанесения штукатурки на потолки — пу-

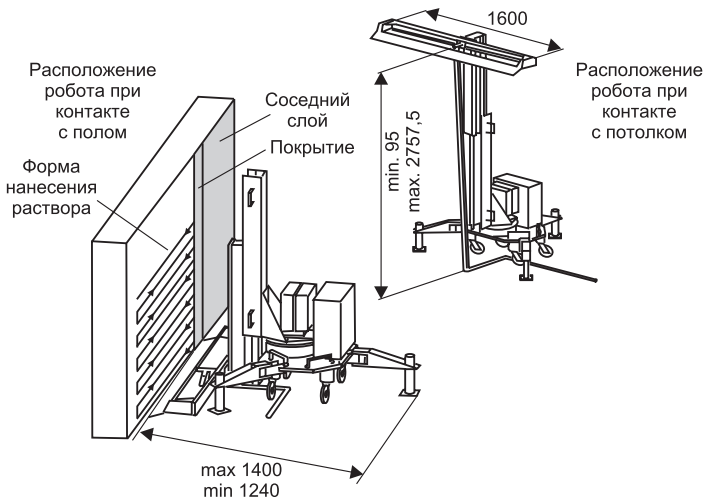


Рис. 9.17. Размещение робота с линейной кинематикой при выполнении штукатурных работ



тем ориентации исполнительного органа робота параллельно полу. При этом необходимо только удерживать фиксированное расстояние до пола, что довольно просто с помощью движущегося по полу робота. Однако имеющиеся неровности пола из-за отсутствия на нем монолитного покрытия могут зеркально отражаться на потолке, что недопустимо. Возможны два других варианта. Для нанесения штукатурки параллельно поверхности потолка необходимо удерживать постоянное расстояние рабочего инструмента по отношению к нему. При нанесении штукатурки методом горизонтирования исполнительного органа определяющим параметром является задаваемая толщина штукатурного слоя. Она может существенно меняться в зависимости от неровностей поверхности и степени уклона необработанного потолка. Поэтому рекомендуется штукатурить потолок параллельно необработанной поверхности.

В качестве носителя энергии в большинстве случаев требуется электрическое напряжение питания. Требуемое электроснабжение штукатурного робота может принципиально производиться с помощью электросети, дизельного или бензинового генератора или аккумулятора. Большое преимущество использования генератора или питающей батареи заключается в обеспечении автономности робота и независимости его от дополнительного кабеля питания. Недостатком такого рода снабжения энергией являются большие габариты и масса устройств, которые должны дополнительно перемещаться с роботом, особенно в том случае, когда речь идет об энергоснабжении от аккумулятора. У генератора, который обычно приводится в действие двигателем внутреннего сгорания, имеются еще и другие недостатки, такие как выхлопные газы, наличие которых внутри помещения недопустимо.

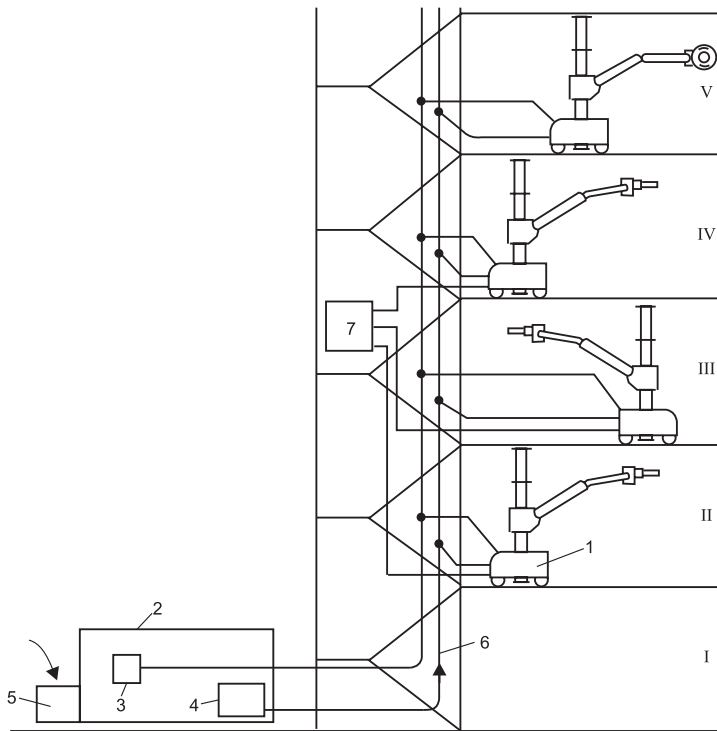
В целом, рассматривая возможность применения подвода питания извне, можно оценить его преимущества, заключающиеся в том, что конструкция робота не отягощается дополнительными устройствами, требующими места для их размещения. К одним из недостатков относится опасность повреждения кабеля при перемещении робота. Поэтому при перемещении робота в пределах этажа и при смене этажей оператор должен обращать внимание на то, чтобы не было повреждения электрокабеля. При автономном движении робота вдоль стены повреждение кабеля почти исключено, так как речь идет о прямолинейном движении, при котором кабель едва ли может за что-то зацепиться или чем-то зажаться.

Для подачи штукатурного материала необходима магистраль, интегрированная в робот и способная перемещаться вдоль его осей. Лучше всего для этих целей подходит гибкий шланг. Положение шланга должно быть таким, чтобы было возможным осуществление всех необходимых перемещений осей робота в пределах рабочей зоны. Это может осуществляться посредством:

- пружинной оттяжки со свободной подвеской для проводки растворного шланга от платформы непосредственно к штукатурному инструменту;
- линейных установок протягивания кабеля для каждой оси движения, в которых шланг проводится или навивается.

## 9.6. Роботизированные штукатурные комплексы

Анализ технологии штукатурных работ, средств их механизации, а так же выполненные технические и экспериментальные работы по роботизации процессов нанесения растворов и затирки поверхности позволяет сделать вывод о целесообразности создания для штукатурных работ передвижных РТК. В состав такого комплекса должны входить: установка для приема, перемешивания и транспортировки раствора и известкового молока, растворонасосные установки и автоматические манипуляторы, снабженные рабочими органами для нанесения и разравнивания слоев раствора и затирки поверхности. В них должны быть предусмотрены регулировка усилия прижатия уплотняющих и затирочных механизмов, контроль качества поверхности и выверка ее горизонтальности и вертикальности. Комплексы должны иметь дистанционное и программное управление, обеспечивающее выполнение заданной схемы выполнения работ. На рис. 9.18 представлена компоновочная схема роботизированного штукатурного комплекса, включающая группу роботов и обеспечивающая ведение работ поточно-расчлененным методом. Раствор к манипуляторам подается растворонасосом из бункера-смесителя штукатурной станции, устанавливаемого у подъезда здания. Здесь же размещается установка для приема и перекачки известкового молока. На лестничной площадке размещают растворопровод, к которому подсоединяют рабочие органы манипуляторов. Сжатый воздух подают от компрессорного агрегата, находящегося на лестничных площадках.



*Рис. 9.18. Роботизированный комплекс для штукатурных работ  
 1 — манипулятор; 2 — штукатурная станция;  
 3 — электрораспределительный щит; 4 — растворонасос;  
 5 — приемный бункер; 6 — растворопровод; 7 — компрессор; I–V —  
 виды операций*

В качестве рабочих органов манипуляторов, входящих в состав этих комплексов, могут использоваться рассмотренные выше приспособления. Однако для робототехнических комплексов лучше использовать универсальные форсунки, которые могут работать с растворами любой консистенции выполнять набрызг, грунтование поверхности, а также наносить накрывки. При этом они должны снабжаться электромагнитными или электромеханическими вентилями для регулирования подачи воздуха. А также иметь устройства для автоматического регулирования размера факела.

Таким образом, форсунка как рабочий орган строительного робота снабжается регулировочными элементами, обеспечивающими в процессе работы автоматическое управление диаграммой распы-

ления и степенью раздробления струи. Размер выходного отверстия сопла выбирают так, чтобы обеспечивалась необходимая скорость раствора на выходе из сопла, создающая надежное сцепление раствора с поверхностью. В связи с тем, что скорость раствора на выходе из сопла определяется скоростью его движения по трубопроводу, в форсунках роботехнических систем должно предусматриваться регулирование размера выходного отверстия. Качество нанесения слоя раствора определяется расстоянием между выходным отверстием форсунки и поверхностью, а также зависит от угла наклона сопла. Поэтому при роботизации необходимо предусматривать стабилизацию угла наклона сопла и автоматическое регулирование расстояния его до поверхности.

Подача материала производится с помощью растворного насоса, а также порциями посредством небольших напорных резервуаров с сухой смесью и водой или готовым раствором (рис. 9.19). Если такой напорный резервуар может быть размещен непосредственно на роботе, то для непрерывной подачи материала требуется один или несколько подводов к роботу. Наилучшая подача материала достигается при использовании варианта, при котором возможно непрерывное проведение работ при небольших затратах на очистку рабочего инструмента и обеспечивается простая, быстрая подача материала с этажа на этаж при ограниченной массе манипулятора. Сопоставление возможных вариантов подачи материала показывает, что применение напорных резервуаров размещаемых непосредственно на роботе, представляется достаточно эффективным и удобным.

### **1. Емкость с материалом интегрирована с роботом**

#### *Достоинства*

Нет необходимости в подающих магистралях

Малые затраты на очистку из-за коротких шлангов для подачи раствора

Необходимость в перемещении лишь самого робота

#### *Недостатки*

Частая смена емкости с материалом

Большая масса робота за счет интегрированной в нем емкости с материалом

### **2. Раздельная подача компонентов к роботу**

#### *Достоинства*

Малые затраты на очистку из-за коротких шлангов для подачи раствора

Необходимость в перемещении лишь самого робота

***Недостатки***

Необходимость в большом количестве подающих шлангов (для сухой смеси, воды и сжатого воздуха)

Большая масса робота за счет конструктивной интеграции со штукатурной машиной

**3. Штукатурная машина возле емкости с материалом**

***Достоинства***

Отсутствуют затраты на перемещение штукатурной машины

Наличие лишь одного подающего шланга

***Недостатки***

Большая затрата на очистку длинных растворных шлангов

Высокая несущая нагрузка из-за тяжелых шлангов

**4. Штукатурная машина размещается на рабочем этаже**

***Достоинства***

Малые затраты на очистку из-за коротких шлангов для подачи раствора

Наличие лишь одного подающего шланга

***Недостатки***

Дополнительные затраты на перемещение штукатурной машины

К роботу должны подаваться или отдельные компоненты материалы штукатурного материала, которые на месте перемешиваются и подаются к штукатурному инструменту или уже готовый раствор. В случае отдельного от робота перемешивания и подачи штукатурного раствора эти задачи выполняются штукатурной машиной. Она может быть установлена или на бункере с раствором или на том же самом этаже, на котором работает робот. Доставка материала для штукатурной машины производится, как правило, из растворного бункера посредством сжатого воздуха как транспортного средства. В исключительных случаях возможна доставка мешками. Для производства сжатого воздуха требуется компрессор. Необходимая порция воды должна подаваться шлангом. На рис. 9.19 представлены описанные возможные варианты подачи материала и отражены их специфические достоинства и недостатки.

Наилучшая подача материала достигается при использовании варианта, при котором возможно непрерывное проведение работ при небольших затратах на очистку рабочего инструмента и обеспечивается простая, быстрая подача материала с этажа на этаж при ограниченной массе манипулятора. Сопоставление других

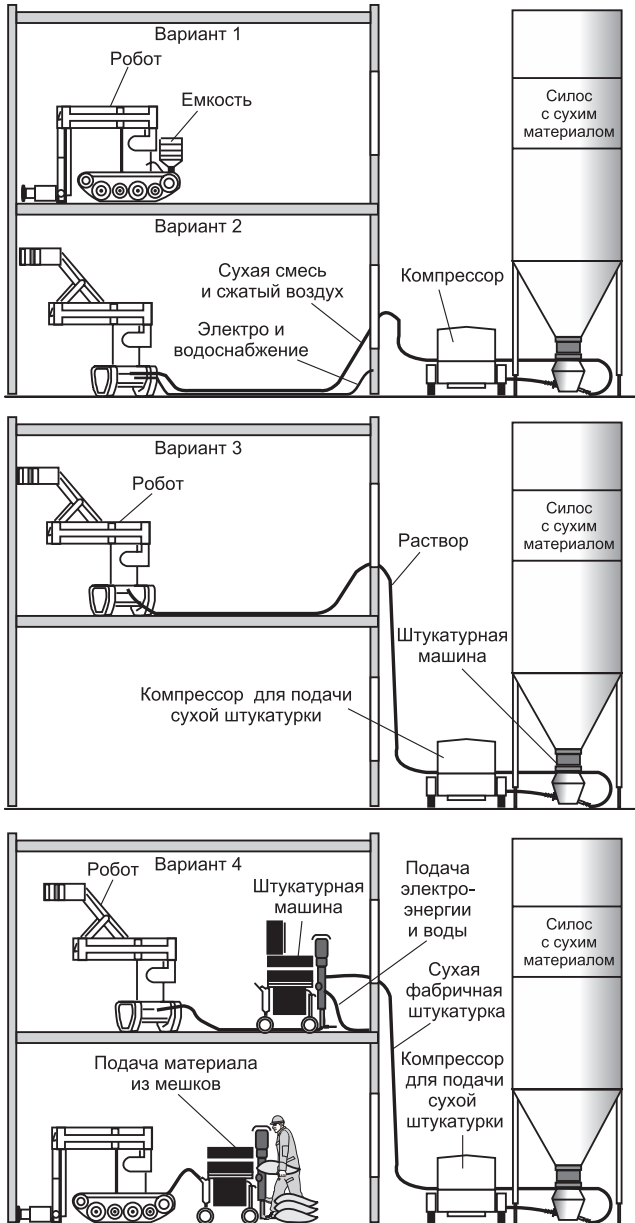


Рис. 9.19. Варианты подачи материала к штукатурному роботу

возможных вариантов подачи материала показывает, что применение напорных резервуаров, размещаемых непосредственно на работе, представляет собой независимое от разводки магистралей конструктивное решение, однако, частая смена напорных резервуаров все-таки в значительной мере препятствует реализации непрерывного процесса работы.

Так как современные штукатурные машины, предназначенные для перемешивания и подачи готового штукатурного раствора, имеют массу до 250 кг, то объединять их конструктивно с роботом невозможно. Наиболее эффективным является вариант с располагаемой отдельно от робота штукатурной машиной, которая транспортируется с ним на рабочий этаж. При этом длина подводимого к роботу растворорода обычно ограничивается 10—15 м.

Для подачи материала посредством винтового или поршневого насосов необходимо принимать во внимание следующее:

- Свойства затворенного штукатурного раствора и возможность бесперебойной подачи к месту нанесения зависят от его консистенции. На них оказывает влияние дозированная подача воды и ее равномерное смешивание с растворной массой, поэтому решающую роль при этом играет точная подача и регулирование водной массы.
- Каждый продолжительный перерыв в работе приводит к изменениям консистенции штукатурного раствора, которые чаще всего обусловлены влиянием налипания материала на стенках растворорода, а не функциональными сбоями в подаче воды.
- Каждая магистраль для подачи сухой штукатурной смеси, воды, сжатого воздуха, а также штукатурного раствора должна выполняться через простые разъемные соединения.

При остановке растворного насоса, несмотря на прекращение подачи материала, происходит истечение части штукатурного материала, продолжающееся некоторое время из-за остаточного давления в шланге. Для немедленного прекращения утечки материала нужен вентиль, установленный на рабочем инструменте для нанесения раствора.

При роботизации штукатурных работ одновременно рассматриваются и решаются вопросы автоматизации приготовления и транспортировки раствора. Оборудование передвижных растворных узлов, входящих в состав РТК, снабжается средствами конт-

роля, защиты, автоматического и дистанционного управления. На трубопроводе, подающем на этажи здания, устанавливают электромагнитные клапаны для управления подачей, а также датчики давления для регулирования режима работы насосных агрегатов.

Для разглаживания и затирки лицевого штукатурного слоя манипуляторы снабжают штукатурно-затирочными органами. На первой стадии роботизации могут быть использоваться пневматические и электрические затирочные машинки. При создании специализированных роботов для штукатурных работ нужны специальные рабочие органы, выполняющие затирочные операции, которые должны иметь встроенный привод и комплект съемного затирочного инструмента. Робот, снабженный такими рабочими органами, должен выполнять механизированную затирку накрывочного слоя, затирку цементно-песчаного раствора на поверхности железобетонных панелей, шлифовку прошпатлеванных вертикальных и горизонтальных поверхностей. При создании затирочного инструмента должна предусматриваться автоматическая стабилизация удельного давления затирочного диска на обрабатываемую поверхность и регулирование его величины в зависимости от состава раствора и времени его нанесения, а также регулирование скорости вращения дисков. Затирочная плоскость дисков может иметь увеличенную по сравнению с ручными затирочными машинками площадь. Так как процесс затирки происходит при смачивании поверхности, то к рабочему органу робота предусматривается подвод воды с регулированием ее подачи.



# **Глава 10. Автоматизация и роботизация работ в подземном строительстве**

## **10.1. Требования к проведению подземных строительных работ**

Особенностью подземного строительства являются чрезвычайно сложные для человека условия выполнения работ: высокая влажность, запыленность и, иногда, взрывоопасность окружающей среды. Именно это и является причиной того, что подземные строительные работы всегда были в большей степени, по сравнению с наземными, механизированы и имели более высокий уровень энерговооруженности. С 60-х годов здесь начинают находить применение автоматизация, а затем роботизация. Стоит только упомянуть, например, лазерные системы автоматизации контроля положения тоннелепроходческих щитов, нашедшие повсеместное распространение во всем мире. Интересно, что в данном случае, лазерные приборы в течение всего 5 лет после появления в физических лабораториях были внедрены на практике.

Тоннелестроение переживает в настоящее время стремительное развитие. Масштабные проекты, связанные прежде всего с необходимостью расширения транспортных сетей, выполняются в условиях очень высоких требований к защите окружающей среды, обуславливающих, естественно, повышение строительных затрат, и могут быть реализованы только при постоянном улучшении и совершенствовании технической и организационной сторон методов и способов ведения работ. Этот способ строительства все чаще выбирается при необходимости снижения влияния отрицательно-го воздействия выхлопных газов и шума от транспортных потоков на окружающую среду обитания. В Австрии и Германии, примерно, две трети всех тоннелей строятся буровзрывным способом, а одна треть — при помощи щитовых проходческих комплексов [115—117]. Мобильные буровые установки представляют собой роботизированные комплексы с дистанционным лазерным или радиоуправлением и способны осуществлять высокоточное бурение сразу 12—16 шпуров. Человек удален из рабочего пространства, что позволяет беспрепятственно проводить работу в очень слож-

ных с точки зрения охраны тупа условиях. Для щитов, в свою очередь, находят широкое применение автоматические системы управления, обеспечивающие их надежное ведение по сложным криволинейным траекториям без превышения допустимых по технологии отклонений от заданного направления проходки. В обоих случаях важное значение имеет крепление и обработка поверхности выработки. Используемое для этих целей торкретирование все чаще выполняется при помощи специальных автоматических манипуляторов. Точное ведение сопла позволяет очень экономно расходовать материал, качественно обрабатывать поверхность, и это все, без непосредственного участия человека [118—120].

Очень важным видом работ в строительстве, объемы которых всегда были и будут очень значительными, являются буровые работы и связанные с ними вспомогательные операции. Применяемые для данных целей бурильные установки могут быть в значительной степени усовершенствованы за счет использования адаптивных принципов бурения.

## **10.2. Автоматизированное управление тоннелепроходческими щитами**

Тоннелепроходческий щит должен перемещаться по заданной ему траектории без превышения допустимых отклонений от проектной оси. В последние 30 лет непосредственное ведение щита осуществляется, за редким исключением, при помощи направленного лазерного излучения. Это предполагает наличие высокоточных измерительных систем, позволяющих производить как пространственную ориентацию луча под землей, так и привязку исходного и конечного пунктов проходки тоннеля в трехмерной системе координат. На этом принципе измерений построена размещаемая в передней части тоннеля система управления машиной, так что, как наземная и подземные измерительные системы, так и компоненты, служащие для управления машиной, должны рассматриваться как единая замкнутая система управления. Ошибки или неточности, возникающие в отдельных частях общей системы, оказывают естественным образом влияние на правильность проходки.

Подземные измерения непрерывно привязываются к точкам наземной измерительной сети, причем, даже в том случае, если изме-

рения, связанные с проходкой, производятся только от определенных точек стартового участка. Метод открытой полигонометрии является простейшей формой реализации подземной сети, однако он может быть пригодным к применению лишь для тоннелей длиной не более 800 м. Анализ переноса ошибок и практический опыт показывают, что при более протяженных выработках отклонения от заданной оси переходят в дециметровую область, а при нескольких километрах могут достигать даже многих дециметров. Для других способов строительства это были бы вполне допустимые значения, но непременно связанная с применением щитов установка тьюбингов или других элементов внутреннего крепления и отделки выработанного пространства делает их недопустимыми. Проведение полигональной линии, являющееся логичным с точки зрения наземного строительного производства, приводит, однако, в данном случае к существенным, обусловленным рефракцией, сторонним отклонениям. При прохождении линии на расстоянии меньшем, чем 50 см от стены штольни или строительного оборудования, уже при всего лишь нескольких километрах проходки значение отклонения щита от требуемого направления может превысить 1 м. Если даже в конечной точке полигональной линии в штольне для задания направления движения щита устанавливается высокоточный лазерный прибор, то и при его наличии ошибка, естественно, не станет меньше. На рис. 10.1 представлена подобная стандартная схема измерений. Значения измеряемых отрезков, определяемых размерами консолей, являвшихся одновременно опорами для инструментов, вычисляются при помощи электрооптического дальномера (с точностью около 2 мм), углы — посредством прецизионного теодолита (с точностью около  $0,3''$ ), а азимут гироскопом.

Проведение контрольных измерений и расчетов показывает наличие изменений положения опорных точек, привязываемых к консолям вследствие подвижки горных пород, механических повреждений консолей, а также противоречий в результатах, обусловливаемых различными ошибками, например, из-за применения не прошедших испытания микропроцессорных программ. Это все и приводит к таким значительным отклонениям щитов по мере их продвижения. Лишь прямое попадание лазерного луча с места установки задатчика на приемную мишень, прикрепляемую к щиту, обеспечивает ограничение его отклонений от заданной оси 2—4 мм. Как правило, это бывает возможным на участке в 250 м. Затем требуется перестановка задатчика и его юстировка.

При четком выполнении всех наземных и подземных измерений, точность ведения щита достигает 1—2 см на расстоянии 1 км. Высокая производительность современных щитов требует выполнения всех измерений и обработки их результатов в предельно сжатые сроки. Так, например, скорость проходки щитов при сооружении Евротоннеля достигала 30—40 метров в сутки, причем их диаметры составляли 5,7 и 8,7 м.

Задачами автоматизированных систем контроля и управления тоннелепроходческими щитами являются:

- обеспечение проходки без пауз за счет непрерывного проведения необходимых измерительных работ;
- соблюдение допустимых значений отклонений щита от проектного положения;
- исключение корректировки положения щита, сопровождающейся недопустимо высоким сжатием его горными породами, вследствие сильного отклонения от проектной оси;
- избежание проблем, связанных с установкой тубингов и обусловленных соприкосновениями со щитом при их креплении [120].

Предпосылкой для строительства каждого тоннеля является точная подземная трехмерная сеть опорных точек, связанная через стартовую выработку с наземной измерительной сетью (рис. 10.1).

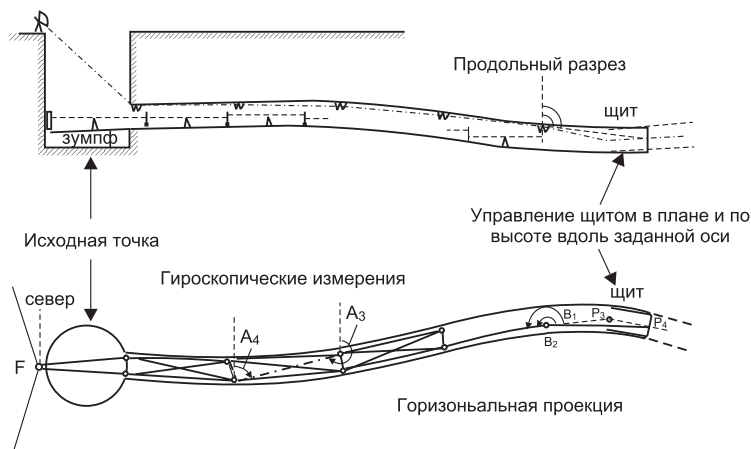


Рис. 10.1. Система опорных точек для ведения тоннелепроходческого щита

Основная идея измерительной системы на базе использования лазерного луча заключается, таким образом, в том что, исходящее из опорной точки с координатами геодезического направления  $T_L$  и зенитного расстояния  $Z_L$  (рис. 10.2) видимое лазерное излучение должно пространственно задаваться так, чтобы оно могло регистрироваться и рассчитываться в точке  $D$ , находящейся на определяемой планом ведения работ продвигаемой плоскости. Исходя от этой точки могут в простейшей форме устанавливаться все необходимые при строительстве тоннеля координаты, например, положение оси щита, границы выработки и т. д.

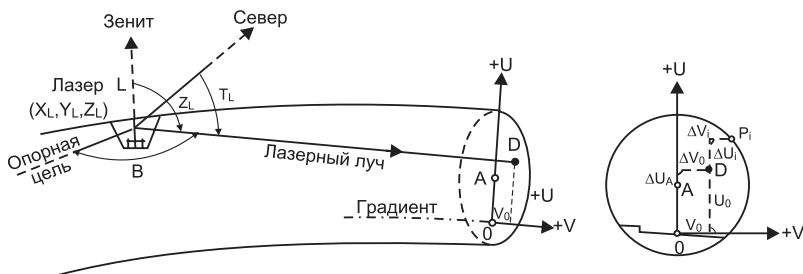


Рис. 10.2. Схема построения измерений на базе лазерного излучения

На данном принципе построена система «Stolizka», получившая название по имени ее разработчика [120]. Лазерный пучок получает соответствующее направление при помощи прибора, размещенного в точке с координатами  $X_L, Y_L, Z_L$ . На щите устанавливаются две приемных мишени  $Z1$  и  $Z2$ , причем они ориентируются перпендикулярно к его цилиндрической поверхности, а связывающая их центры ось параллельна оси щита (рис. 10.3). С целью однозначного определения положения мишеней, перед началом проходки должны измеряться расстояния между осями щита и мишеней  $\Delta U1, \Delta U2$  и между соответствующими осевыми сечениями  $\Delta L1, \Delta L2$ , а также возможные перестановки центров мишеней относительно вертикальных осей.

Заданное направление оси проходки выбирается исходя из обобщенной системы координат  $X, Y, Z$ . Это позволяет в любом месте определить положение щита по точкам  $D_1, D_2$  в ней или же в относительной системе координат  $U, V$  приемных мишеней. Координаты точек  $D_1, D_2$  задаются для всех заранее выбираемых контрольных мест положения щита и по ним строятся соответ-

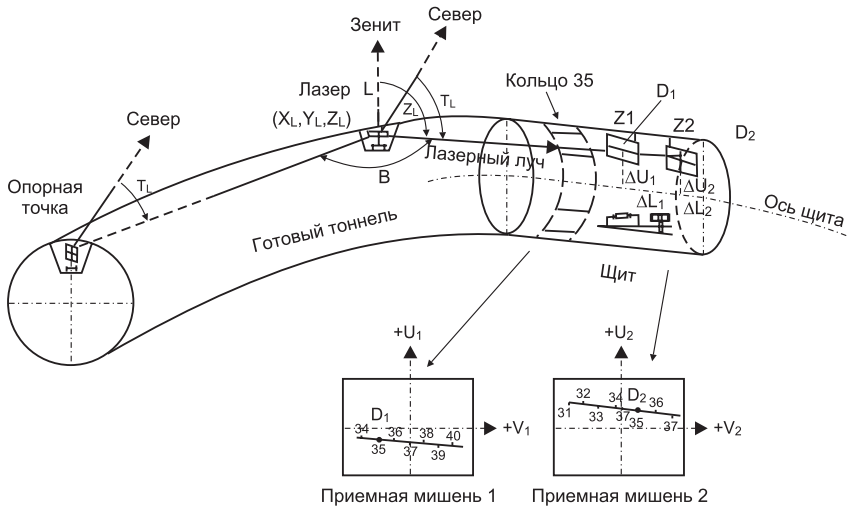


Рис. 10.3. Система «Stolizka» для ведения тоннелепроходческого щита

вующие диаграммы изменения их положения относительно центров координат мишеней (рис. 10.3). При проходке машинист должен осуществлять управление щитом так, чтобы регистрируемые точки лазерного луча постоянно находились на заданных подобным образом экстраполяционных линиях.

Для исключения вращения щита положение мишеней внутри профильных плоскостей, измеряемое датчиками наклона, постоянно корректируется таким образом, что их V-оси занимают горизонтальное положение. Каждое значение наклона щита контролируется дополнительно вторым устройством для измерения уклонов (рис. 10.4).

Описанная система обеспечивает ведение щита по предусмотренной планом строительной оси. При возникновении ошибок при проходке, исходя из значений отклонений  $\Delta U$ ,  $\Delta V$  от заданного положения, определяются горизонтальные и вертикальные смещения щита от заданной оси и оперативно вырабатываются корректирующие воздействия.

Подобная простая система ведения щита имеет своим преимуществом обо-

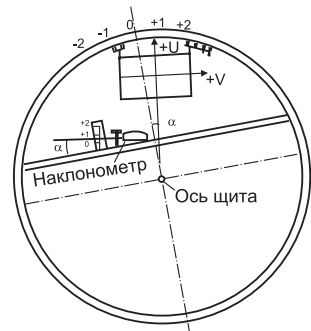


Рис. 10.4. Контроль поворота щита

зримость результатов и не требует больших инвестиций на приборы для своей реализации. К недостаткам ее, особенно при проходе тоннелей большой протяженности, относятся:

- необходимость предварительного вычисления заданного положения приемных мишеней и продвигаемой плоскости для довольно большого количества отрезков траектории, а также графического построения эталонных диаграмм и нанесения их на элементы крепления мишеней;
- необходимость осуществления визуального контроля попадания лазерного луча на приемные мишени, с целью сравнения заданного и истинного пространственного положения щита;
- влияние вибраций, вызываемых работой щита, на лазерный прибор, что может приводить к изменению положения луча в пространстве;
- вследствие неизбежного закручивания щита, постоянно требуется ручная корректировка положения обеих приемных мишеней, в соответствии с измеренными значениями его наклона.

Фирма ZED-Instruments (Англия) разработала систему «Zollmann» для ведения щитов, существенно отличающуюся и по принципу действия и по степени развития реализующих ее приборов (рис. 10.5). Так, например, обе приемные мишени заменены в ней на единый электронный приемный блок (Target-Unit), с помощью которого электронным путем измеряется положение (U, V-координаты) и изменение направления принимаемого лазерного луча. Относительно малая площадь приемной зоны, всего лишь  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup>, может быть расширена за счет перемещения или поворота крепления приемного устройства относительно оси щита на определенный угол.

Фирма «Hochtief AG» (Essen, Германия) использует в данной системе электронный лазерный теодолит с шаговыми двигателями для горизонтальной и вертикальной ориентации луча (рис. 10.6). При этом приемное устройство неподвижно, а рабочая зона измерений автоматически расширяется, за счет изменения положения луча в пространстве при достижении им границы приемной панели. Кроме того, электронным путем считывается и обрабатывается информация с датчиков наклона щита и электронно-оптическим способом определяется расстояние между лазерным теодолитом и приемным устройством [121].

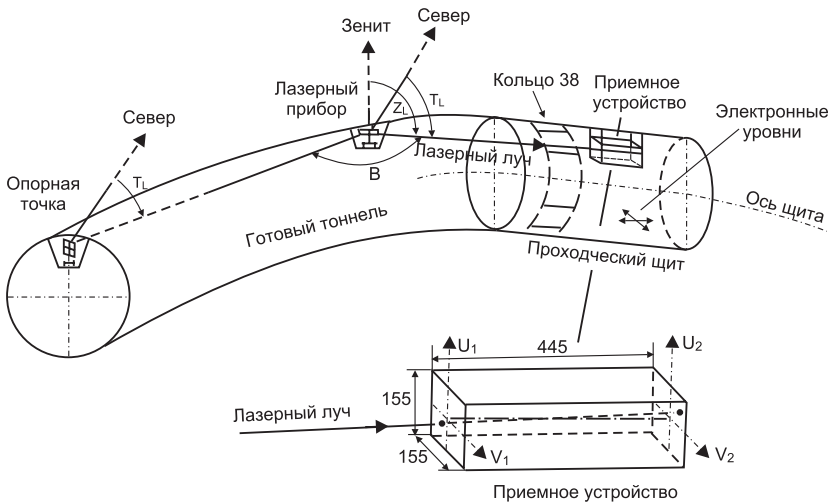


Рис. 10.5. Схема построения системы «Zollmann» для ведения щита

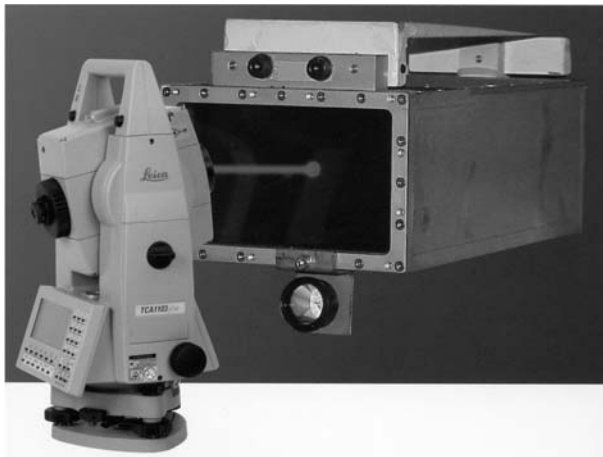


Рис. 10.6. Лазерный теодолит с приемным устройством

Результаты измерений подаются на встроенное в систему вычислительное устройство. В нем они обрабатываются и полученные значения (разница между заданным и истинным положением щита, тенденция изменения этой разницы и т. п.) представляются на пульте управления машиниста, а также передаются на монитор, размещенный на поверхности.



Данная система нашла очень широкое применение в практике современного строительства. Например, при строительстве Евротоннеля с английской стороны, при проходке трех морских тоннелей на французском побережье и т. д. Высокая точность, непрерывность измерений и электронная обработка результатов являются, безусловно, большим ее преимуществом по сравнению с другими известными системами. В то же время следует отметить значительную стоимость приборов и устройств системы. В среднем она составляет 120 тыс. евро.

Чисто с технической точки зрения к основным недостаткам сегодняшнего уровня развития подобной техники можно отнести следующие:

- как и прежде, результаты измерений могут быть в значительной степени искажены вибрациями, имеющими место при работе щита, поэтому требуется постоянный контроль и ручная корректировка положения задатчика направления;
- необходимость относительно частого задания вручную требуемой траектории движения щита, из-за перестановок задатчика в новое место, обусловленных стесненностью рабочего пространства;
- при выходе из строя какого-либо электронного блока, ведение щита вручную является почти невозможным, поэтому возникают нежелательные и очень дорогостоящие паузы и остановки в строительстве.

В 1988 году в ФРГ была разработана система управления тоннелепроходческим щитом, получившая известность под названием TUMA. Ее принцип действия отличается от описанного выше, базирующегося на использовании направленного лазерного излучения и регистрации его с помощью измерительных устройств, устанавливаемых на щите. Это стало возможным после появления измерительных геодезических станций, в данном случае — марки 140 SMS (Geodimetr, ФРГ). Основная идея, положенная в основу реализации системы, заключается в автоматизации измерения положения двух фиксированных точек оси щита в обобщенной системе координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и непрерывного сравнения получаемых результатов с заданным положением оси. Одновременно эти данные могут использоваться для подготовки к последующей после проходки укладки тубингов и секций для крепления выработки. Кроме того, система осуществляет расчет минимальных радиусов

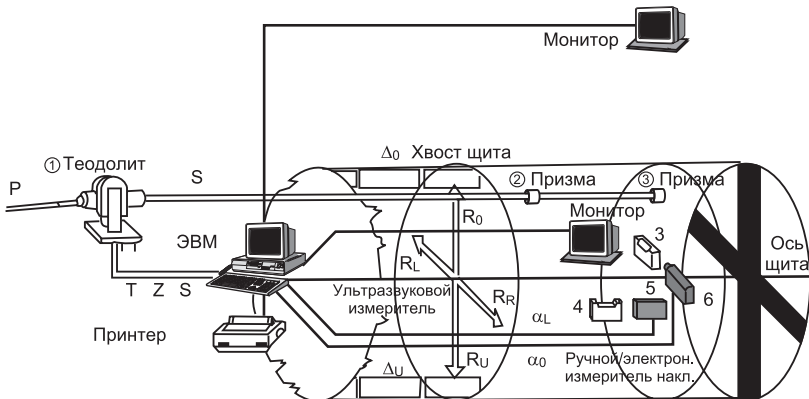
кривизны перемещения щита и необходимые корректировки его положения по отношению к заданной оси проходки. Значения этих радиусов ограничиваются имеющимися допусками на отклонения при выполнении подобных операций.

При выходе из строя отдельных измерительных электронных элементов системы возможно проведение измерений вручную. Полученные данные могут обрабатываться при помощи резервного вычислителя. Таким образом, исключаются паузы в работе щита и непредусмотренные планом работ остановки.

Система, как это представлено на рис. 10.7, состоит из следующих основных компонентов:

- приводного теодолита;
- призм, установленных в фиксированных точках оси щита;
- датчика наклона вдоль осей X,Y;
- четырех ультразвуковых дальномеров;
- компьютера с монитором и принтером.

Наиболее важным компонентом системы, определяющим ее качество и стоимость, является измерительная станция с автома-



**Рис. 10.7. Схема размещения компонентов системы TUMA**  
 1 — измерительная станция; 2 — отражающие призмы;  
 3,4 — электронные датчики наклона; 5,6 — ручные измерители наклона;  
 $r$  — горизонтальное направление;  $z$  — вертикальный угол;  
 $s$  — измеряемый отрезок;  $F$  — точка отсчета для измерений;  
 $\alpha_0$  — угол закручивания;  $\alpha_L$  — угол наклона;  $R_0, R_u, R_L, R_R$  — радиальные расстояния;  $\Delta_0, \Delta_u, \Delta_L, \Delta_R$  — отклонения хвоста щита

тическим приводом. Она в состоянии по сигналам, получаемым с трипфельпризм, самостоятельно ориентироваться на контролируемые точки и определять горизонтальное направление, угол и расстояние, на котором они находятся от нее.

Методика проведения измерений может быть описана следующим образом:

1. При продвижении щита теодолит непрерывно отслеживает закрепленные на нем трипфельпризмы и через определенные интервалы времени измеряет горизонтальный и вертикальный углы, а также расстояние и передает эти данные в компьютер. Для исключения возможных изменений в задании направления, теодолит также регулярно осуществляет привязку к точке отсчета  $F$  и вносит полученные данные в основу последующего измерения углов.
2. При каждом определении положения трипфельпризм при помощи электронных датчиков наклона измеряются продольный и поперечный углы наклона щита по отношению к проектному положению.
3. Вначале, на основании данных измерений по заложенной в компьютер программе, рассчитываются координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  фиксированных точек оси щита. Затем при помощи данных о продольном и поперечном наклоне щита, а также о значении расстояния между призмами и его осью, определяются трехмерные координаты положения оси щита.
4. В результате сравнения значения заданных и действительных координат положения оси щита определяются его вертикальные и горизонтальные смещения от проектного положения, информация представляется на дисплее в цифровой и графической форме (рис. 10.8). Графическое представление осуществляется при помощи светящейся точки. Центр пересечения осей координат, высвеченных на экране, соответствует нулевому отклонению щита от проектного положения. Максимальное отслеживаемое отклонение по обеим осям составляет 50 мм.
5. Основываясь на данных о моментальном положении оси щита и учитывая их изменение на последних десяти пройденных метрах, компьютер определяет тенденцию их изменения для последующего участка проходки.
6. Как только компьютер распознает превышения щитом допустимых отклонений от заданного курса, он тут же рассчитыва-

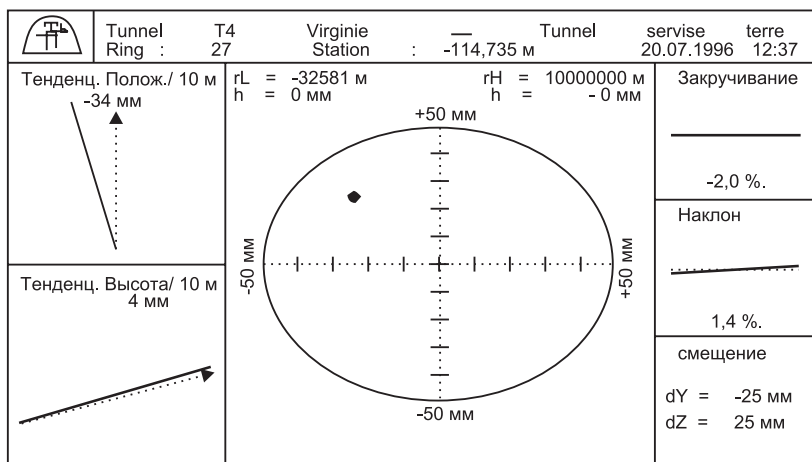


Рис. 10.8. Дисплей системы TUMA для представления информации

ет корректировочную кривую, по которой щит на отрезке в 10—30 м проходки возвращается к теоретической траектории.

- Размещенные на щите ультразвуковые измерительные устройства перед каждой установкой секторов крепления определяют четыре радиальных отрезка, от оси до его поверхности, имеющей цилиндрическую форму, а после их установки — четыре таких же расстояния, но уже до поверхности тубинга. Получаемые при этом данные об имеющихся зазорах хвоста щита с горной породой вместе с другими необходимыми величинами используются для определения оптимальной последовательности установки тубинговых колец, что, с одной стороны, позволяет наиболее точно придерживаться оси тоннеля, а с другой стороны, гарантирует отсутствие заклиниваний между щитом и подлежащими установке элементами оболочки тоннеля.
- Все результаты (например, время проходки, значения отклонений от заданной оси, место и время установки тубингов, корректировочные проходки и т. д.) последовательно запоминаются и выдаются в зависимости от потребности в графической или цифровой форме. Эти результаты составляют также основу для ежедневных протоколов ведения работ.

Система TUMA была успешно использована при строительстве многих тоннелей. Определенные сложности при ее применении

были связаны лишь с ультразвуковыми датчиками, которые не всегда гарантировали необходимую точность и надежность результатов измерений. В некоторых случаях их приходилось заменять датчиками других физических величин, имеющими повышенную помехоустойчивость [122]. Еще одной важной особенностью и большим достоинством системы является возможность непрерывной компенсации даже самых малых отклонений щита от заданного курса, за счет использования информации о его положении относительно проектной оси с целью оперативной выработки управляющих воздействий для исполнительных гидроцилиндров, осуществляющих, ориентацию и фиксацию щита в выработке.

Современные тоннелепроходческие щиты оснащаются комфортабельными климатизированными кабинами, располагаемыми в хвостовой части комплекса (рис. 10.9). По приборам управления оператор в состоянии оценивать до 200 параметров в режиме реального времени. Программное обеспечение помогает ему выбирать оптимальные режимы работы и минимизировать отклонения щита от заданной траектории проходки. Как правило, на двух мониторах представляется актуальная информация, еще два служат для реализации функций управления и контрольных измерений. На пятом мониторе оператор имеет возможность наблюдать за процессом работы конвейера для перемещения отработанных пород [123].



*Рис. 10.9. Кабина оператора тоннелепроходческого щита*

Породы, через которые осуществляется проходка щита, несмотря на все геологические исследования могут содержать включения непредвиденные планом производства работ. Даже в однородных видах грунтов (например, в песчаниках) могут неожиданно встречаться гранитные целики. Для того чтобы быть готовым ко всякого вида неожиданностям и избежать столкновений проходческие комплексы оснащаются сейсмическими системами предупреждения типа SSP (Seismic Softground Probing). В этом случае (рис. 10.10) речь идет о полностью автоматических системах, оце-

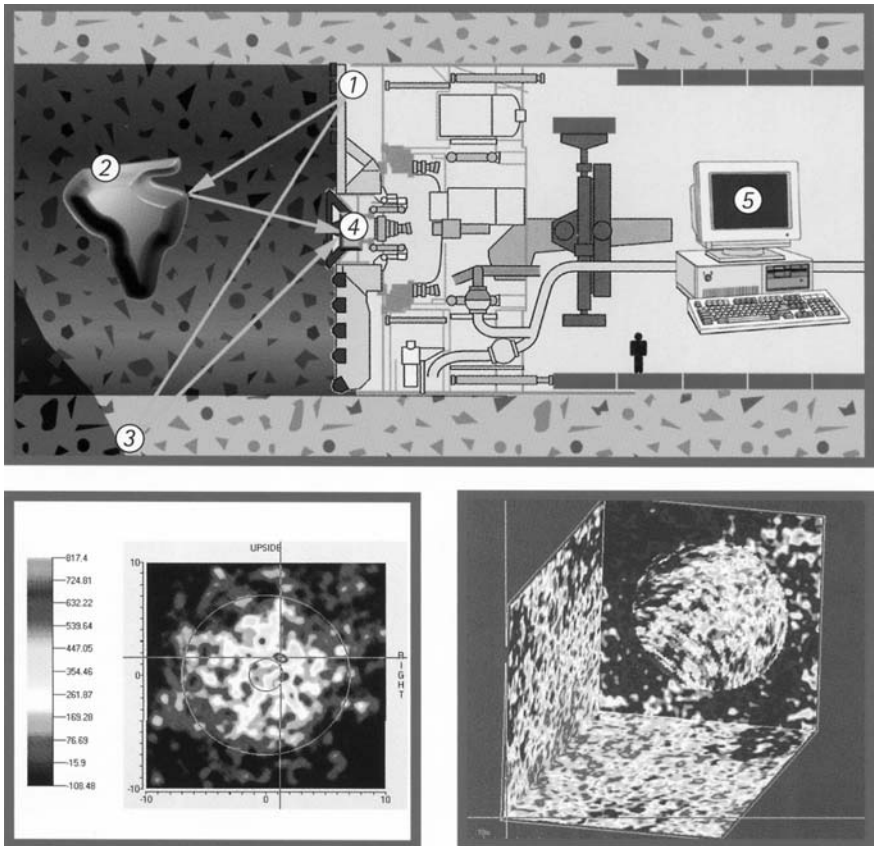


Рис. 10.10. Система сейсмического прогнозирования  
 1 — передатчик; 2 — включение в грунте; 3 — граница слоя;  
 4 — приемник; 5 — монитор

нивающих на расстоянии до 40 м контрасты плотности грунта и визуализирующих результаты измерений (см. нижнюю часть рис. 10.10). Ультразвуковые излучатели устанавливаются на конструкции режущего исполнительного органа и посылают в направлении проходки частотные закодированные сигналы, которые по-разному отражаются в зависимости от свойств грунта. Отраженные сигналы принимаются специальным приемным устройством и им же автоматически полностью обрабатываются с визуальным представлением полученной информации. Исходя из продолжительности сигналов и их амплитуд, рассчитывается трехмерный профиль грунта и представляется оператору в форме цветной трехмерной графики. Автоматическая система обеспечивает возможность виртуальной экстраполяции процесса проходки и заранее предупреждает оператора о геологических изменениях грунта. В этом случае остается достаточно времени, чтобы принять верное решение по режиму проходки или изменению ее направления.

### **10.3. Управление мобильными установками для бурения шпуров**

Существенный прогресс достигнут в последние годы в области автоматизации подземного бурения шпуров. При прокладке транспортных коммуникаций в крепких породах буровзрывной способ является по-прежнему доминирующим способом строительства. Для бурения шпуров используются преимущественно мобильные установки с несколькими исполнительными органами (рис. 10.11). Операции выполняются согласно паспорту буровзрывных работ. С целью обеспечения одновременного задействования всех исполнительных органов и достижения заданной глубины бурения, разработаны системы автоматического управления данными процессами. Эта обеспечивает сокращение времени, связанного с выполнением подготовительных операций, а также позволяет повысить скорость бурения. Только за счет оптимального выбора параметров режима бурения и их точного соблюдения, время на подготовку одного шпура может быть сокращено в 3—7 раз в зависимости от крепости подлежащей бурения породы. Работоспособность резцов при этом увеличивается в 1,1—7,2 раза, энергоемкость снижается в 1,5—4,5 раза, а стоимость одного метра пробуренного шпура уменьшается в среднем в 4,9 раза [77]. Буро-

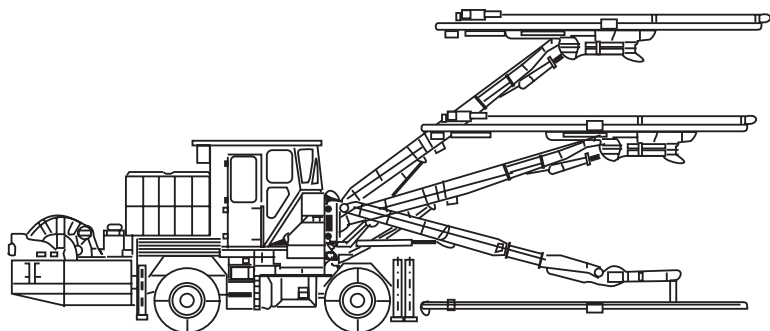


Рис. 10.11. Буровая установка с программным управлением

вые резцы мобильной установки располагаются на стрелах, напоминающих манипуляционную систему робота. Схема одной из первых автоматизированных буровых установок, разработанных в середине 70-х годов в Новочеркасском политехническом институте, приведена на рис. 10.12.

Установка состояла из стрелы манипулятора 1 с приводами вертикального 2 и горизонтального перемещения, автоподатчика 4 с приводами вертикального 5 и горизонтального 6 перемещения, гидроцилиндров 7 и 8, а также гидроцилиндров-корректоров с упорами 9 и 10. Задающее устройство включало в себя программ-

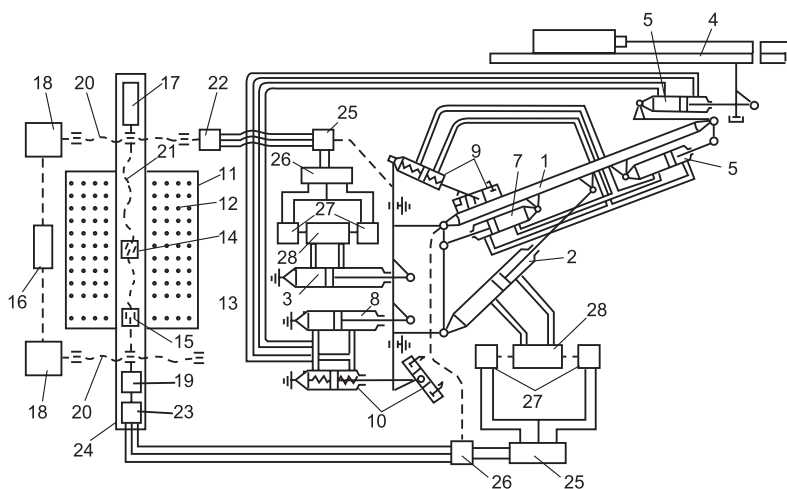


Рис. 10.12.



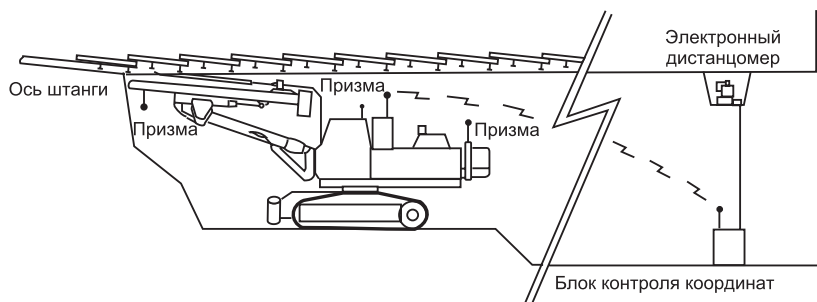
наборную панель 11 со штырями 12 и 13, вертикальную 14 и горизонтальную 15, считывающие головки 14, приводимые в движение при помощи микродвигателей 16 и 17, посредством редукторов 18, 19 и ходовых винтов 20, 21. В него же входили сельсины 22, 23 горизонтальной и вертикальной считывающих головок, размещаемые в каретке 24. Система программного управления содержала также датчики 25 обратной связи контроля вертикального и горизонтального перемещения стрелы манипулятора, сравнивающие и усилительные устройства 26, электромагниты 27, гидрораспределители 28.

Автоматизированная буровая установка работала следующим образом. Перед началом бурения отверстия программно наборной панели заполнялись штырями 12 и 13 согласно паспорту буровзрывных работ, причем, каждое отверстие было привязано двумя координатами относительно принятого начала отсчета. Штыри 12 воздействовали на считывающую головку 14 вертикального перемещения, а штыри 13 — на считывающую головку 14 горизонтального перемещения манипулятора. Каждая из головок представляла собой бесконтактный генераторный датчик. При помощи микродвигателей, кинематических редукторов и ходовых винтов обеспечивалось перемещение каретки с установленными на ней считывающими головками относительно программонаборной панели. Получаемые в результате сигналы через сравнивающие и усилительные устройства подавались на исполнительные приводы манипулятора. Стрелы с буровым инструментом занимали требуемое положение и процесс бурения мог начинаться.

Снабженная лазерной системой контроля и автоматической системой управления положением буровой установки в горной выработке, автоматическим регулятором режимов ее бурения, данная разработка соответствовала в то время лучшим зарубежным образцам и даже превосходила их по комплексности решения проблемы.

Достижения электроники последних лет сделали возможным существенно упростить системы управления мобильными буровыми установками и повысить степень их точности и надежности. Схема бурения и глубина шпуров могут изменяться за счет внесения изменений в программу управления установкой. Появившиеся помехоустойчивые датчики обеспечивают точный контроль профиля выработки. Системы радиуправления в сочетании с электронными оптическими дальномерами позволяют с заданной точностью осуществлять вождение установки для бурения шпуров

без наличия в ней водителя (рис. 10.13). Программа бурения может задаваться через дискету на удаленном от забоя контрольном блоке или непосредственно вноситься на пульте управления установки через соответствующую клавиатуру. Бортовой компьютер в состоянии оптимизировать схему бурения в зависимости от изменения степени крепости горных пород. Специальные контрольные и измерительные элементы размещенные на буровой установке, обеспечивают ее автоматическое вождение по заданной оси тоннеля, в том числе и криволинейной. Рефракции и связанные с этим возможные отклонения задающего направление лазерного излучения учитываются в системе автоматически.



*Рис. 10.13. Система дистанционного управления мобильной установкой для бурения шпуров*

Для проходки тоннелей с большим диаметром при крепости пород до 100 Н/мм успешно используются мобильные установки с телескопической стрелой и буровым исполнительным органом. Разработанная немецкой фирмой «Mannesmann Demag Baumashipen» модель «Demag H 55» весом 65 т в состоянии обрабатывать сечение высотой 8 м и шириной 12,5 м с уклонах выработки 8,5° [124, 125]. Управление ее осуществляется в автоматическом режиме при помощи специальной радиосистемы. Некоторые буровые установки снабжаются нагребными лапами и производят сами погрузку обрушенной породы.

Современные самоходные установки для бурения шпуров применяются при крепких породах грунтов (рис. 10.14). Они оснащаются ударно-вращательными исполнительными органами, электронными системами управления и системами обработки данных измерений. Компьютер используется как для ориентации бурового инструмента и автоматического управления направлением переме-



*Рис. 10.14. Самоходная установка для бурения шпуров в тоннелях*



*Рис. 10.15. Кабина автоматизированной самоходной установки для бурения шпуров*

щения (рис. 10.15), так и для контроля и управления процессом бурения и регистрации всех важнейших параметров технологического процесса. Подобные роботы были разработаны специально для проходки тоннелей с повышенными требованиями к точности и скорости выполнения операций.

Буровой исполнительный орган выполнен в виде перфораторов, способных осуществлять бурение в граните. Однако совсем без

участия человека технологический процесс не обходится. Буровой мастер присутствует, однако его функции ограничиваются общим контролем и выбором режимов работы: ручной, полуавтоматический и автоматический. Кабина автоматизированной бурильной установки является просторной и в ней есть место еще для одного оператора. В распоряжении каждого из них имеется дисплей, на котором представляются важнейшие параметры технологического процесса: схема бурения, угол наклона бурового инструмента к фронту забоя, глубина шпуров, значения скорости вращения и подачи инструмента. Кроме того, все перфораторы могут управляться вручную с панели управления. Это рекомендуется в том случае, если требуется наивысшая скорость проходки, так вручную, особенно вдвоем, в полной мере можно использовать производительность исполнительного инструмента. В ручном режиме работы буровой мастер осуществляет ориентацию робота как при обычном бурении. Схема бурения на дисплее обеспечивает ему возможность правильного выбора позиции шпуров, а также угла их наклона. Если же требуется повышенная точность, то буровой мастер переключает систему в полуавтоматический режим работы. Буровая установка сама осуществляет последовательную ориентацию отверстий, а оператор путем нажатия на соответствующую кнопку подтверждает правильность выполнения операций и начинает процесс бурения, который протекает автоматически. Если буровой мастер определяет, что позиции для бурения выбраны неверно, он может их исправить вручную. В автоматическом режиме работы процесс корректировки положения инструмента выполняется роботом самостоятельно с тем, чтобы положения отверстий соответствовали первоначально запрограммированным.

Одним из примеров масштабного подземного строительства с применением самоходных буровых установок является прокладка линий метро и возведение подземного вокзала (рис. 10.16) в г. Цюрихе (Швейцария). Геологические условия были определены мореной ледникового периода и спресованным озерным щебнем. Во избежании пльвунов и затопления отработанного пространства, проходка осуществлялась при замораживании грунта. Обрушенные породы собирались автопогрузчиком в специальной шахте и оттуда транспортировались краном на поверхность. Из-за столь дорогостоящих сопутствующих мероприятий, проходка должна была осуществляться в максимально сжатые сроки и с очень высокой точностью обработки заданного профиля. Одновременно

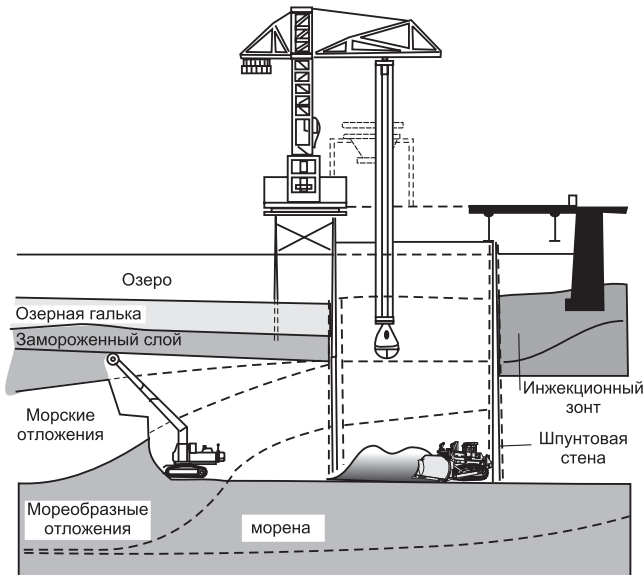


Рис. 10.16. Схема работ при строительстве тоннеля в г. Цюрихе (Швейцария)

проходилось сразу три выработки, а работа выполнялась в три смены. Производительность буровой установки колебалась в очень широких пределах. Замедления в работе вызывались частым попаданием скалистых и замороженных пород. Оптимизация и автоматическое регулирование процесса бурения обеспечивали безаварийную и безостановочную работу буровых установок. Управление осуществлялось как из кабины водителем, так и с дистанционного пульта операторов. Такая комбинация позволила без риска дополнительных затрат на реализацию полностью автоматической системы управления справиться с поставленными задачами [126].

#### 10.4. Роботизированные комплексы для укладки тюбингов

Прочная водонепроницаемая оболочка тоннеля является одним из основных критериев его качества. Наилучшим образом удовлетворяют этим требованиям железобетонные тюбинги, состоящие из сборных секций, изготавливаемых на специальных предприятиях.

От точности их изготовления во многом зависит конечный результат работы.

При строительстве тоннеля между двумя датскими островами Seeland и Sprogø уложено 64000 тьюбингов. Заказчик потребовал проведения оценки геометрических размеров каждого двадцатого из них. Речь шла о 15 различных параметрах. Они должны были контролироваться непосредственно в производственном цехе сразу после их изготовления. Весь комплекс измерений занимал около одного часа. В этот отрезок времени выполнялись следующие операции:

- доставка элемента в измерительную камеру и предварительное его юстирование;
- определение координат в заданных точках;
- обработка результатов измерений и сравнение заданных и действительных значений геометрических параметров.

Фирма «Dywidag», занимавшаяся решением данной проблемы, выбрала для проведения измерений и обработки полученных результатов автоматическую измерительную систему SPACE (система для позиционирования и автоматического измерения координат) швейцарской фирмы Kern [83—85]. Принцип действия системы основан на трехмерном определении координат методом прямой засечки (рис. 10.17). При этом используются минимум два элект-

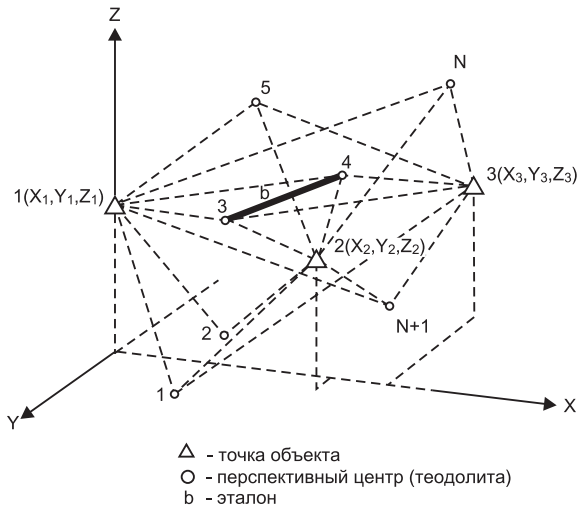


Рис. 10.17. Схема измерений координат системой SPACE

ронных теодолита, устанавливаемых непосредственной близости от объекта измерений и связанных с компьютером, осуществляющим расчеты в режиме подлинного времени. Горизонтальный и вертикальный углы к оцениваемому объекту, измеряются одновременно двумя теодолитами. По заложенной в компьютер программе, на основе значений измеренных углов, происходит расчет трехмерных координат, причем высоты определяются дважды и тем самым обеспечивается возможность контроля результатов.

Координаты  $dx'$  и  $dy'$  трансформируются в угловые  $d\alpha(x)$  и  $d\alpha(y)$  теодолитной системы. Дополнительно к этому должны определяться положение визирной линии  $X', Y'$ , угол поворота  $\Phi$  ППЗ, а также масштабные показатели  $SC(X)$ ,  $SC(Y)$  приемных устройств.

Точность измерения зависит от различных факторов:

- точности программного обеспечения;
- конфигурации системы;
- методов обработки информации и ориентации осей.

В автоматическом режиме работы с четырьмя теодолитами требовалось примерно 15 секунд для следующих операций:

- позиционирование двух теодолитов на цель;
- обработка изображений с обоих ППЗ;
- трансформация координат ППЗ;
- расчет координат  $X, Y, Z$  объекта;
- запоминание результатов.

Исходя из этого могли определяться координаты 240 точек в час, причем ошибка составляла менее 0,1, мм.

При четырехтеодолитной системе подлежащая оценке с шести сторон секция тубинга устанавливается в измерительной камере вначале с точностью 2 см. Затем измерения выполняются в автоматическом режиме. При этом последовательно выполняются, обусловленные задающим файлом, следующие операции:

- выбор номера точки;
- выбор двух теодолитов, выполняющих измерения;
- выбор лазерного (рис. 10.18) или рефлексионного способа проекции.

При оценке секции тубинга измеряются около 110 точек, при этом 92 из них совместно лазерным и обычным теодолитом, снабженным ППЗ.

Лазерный теодолит направляет свой луч на подлежащие измерению точки и определяет таким образом углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Второй теодолит измеряет значения этих углов и передает соответствующие сигналы на обработку в компьютер. Все полученные данные автоматически заносятся в спецификацию изделия.

Соответствие размеров сегмента заданным значениям оценивается при помощи эталонной математической модели с учетом имеющихся температурных условий. Применяемое программное обеспечение не требует выполнения программирования непосредственно на месте измерений. В случае необходимости внесения каких-то изменений, пользователь имеет возможность сделать это посредством диалогового управления.

Не менее высокие требования предъявляются к самому процессу укладки сегментов тьюбингов и сооружения таких образом оболочки тоннеля. Позиционирование большеформатных и массивных элементов в стесненных условиях горной выработки является сложной технологической операцией. Появившиеся в последние годы роботизированные комплексы позволяют выполнять их в автоматическом режиме с соблюдением всех необходимых технических характеристик. Разработанный фирмой «Hitachi» (Япония) подобный комплекс был впервые использован для укладки пяти-тонных секций тьюбингов диаметров 9,5 м при строительстве тоннеля протяженностью 600 м в Токио [127]. К числу основных его особенностей принадлежат: роботизированное устройство с семью степенями свободы, лазерные сканирующие элементы и компьютер, осуществляющий управление выполнением всех операций. Комплекс работает во взаимодействии с системой автоматического контроля и управления (H1-SDACS) проходческого щита, поставляющей для него базовые данные. При его создании были заложены следующие требования:

- точность позиционирования секций должна составлять 1 мм;

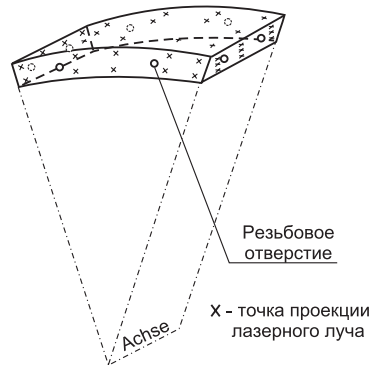


Рис. 10.18. Проецирование лазерного пучка на измеряемую секцию



- время для установки одного сегмента не должно превышать 10 мин, а для всего тьюбинга — 80 мин;
- наличие постоянного обмена информацией с системой H1-SDACS.

Общий вид комплекса приведен на рис. 10.19. Он состоит из опорного и перемещающего колец, эректора (устанавливающего элемента), устройства для подачи секций и элемента для их захвата и перемещения. Тьюбинг (рис. 10.20) собирается из железобетонных секций по 4,8 т (А1-А5, 01 и 02) и 1,2 т (К). Основной функцией комплекса является захват подаваемых для укладки секций и точное их скрепление в заданных местах. Самая малая из секций (К) устанавливается последней и позволяет легче устранять возможные неточности в монтаже за счет изменения положений крепящих болтов. Конструкция колец для опоры и перемещения секций была разработана фирмами «Nazama Co.» и «NKK Co.». Кольца снабжены сервоприводами, управляемыми от компьютера, и работают в соответствии с задающими воздействиями со стороны направляющего элемента, являющегося главным звеном во всей комплексе. Опорное кольцо расположено на уровне подающего кольца эректора. Подлежащая установке секция поддерживается ею при перемещении, наклоне и повороте посредством направляющего кольца.

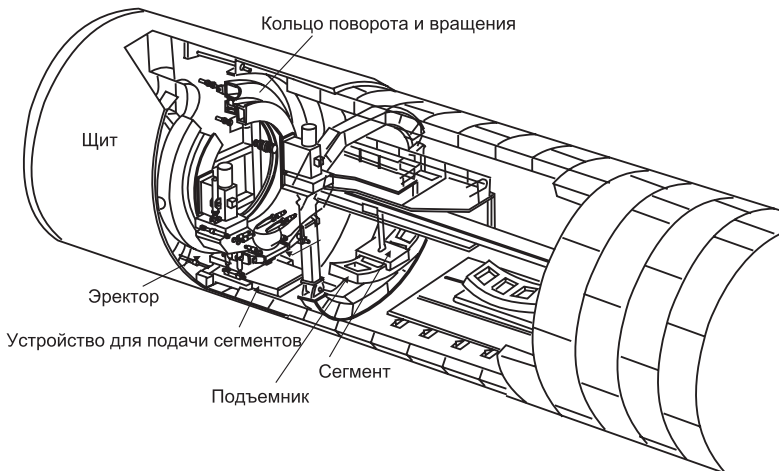


Рис. 10.19. Автоматическая система для укладки тьюбинговых секций

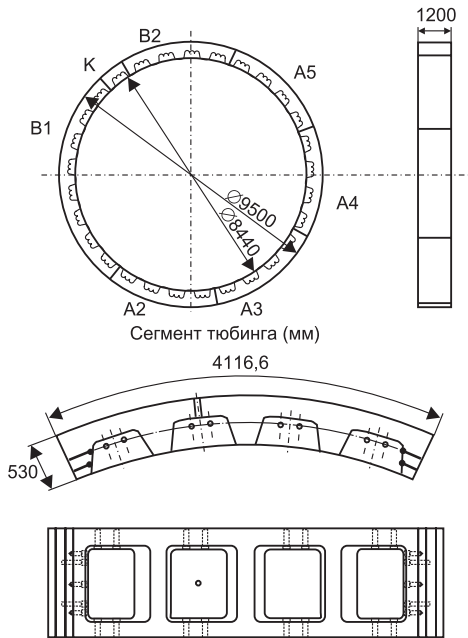


Рис. 10.20. Тюбинг и его составляющие

Конструкция эректора (рис. 10.21) обладает семью степенями свободы: по осям поступательного перемещения ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ); по осям вращения колец ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ) и по оси поворота  $\theta_s$ . Каждая поступающая в него секция ориентируется им в пространстве и подается к требуемому месту крепления.

Таким образом, устанавливающий механизм можно рассматривать как роботизированный механизм с семью степенями свободы. Слева и справа на нем установлены визирные столбики, функционально связанные с работой механических узлов 1 и 2. Узел 2 предназначен для перемещения тюбинговых секций по осям  $X$ - $Y$ . Положение его центра, а также находящегося под ним узла 3, постоянно контролируется и управляется. На узле 3 расположен фотоэлемент и струбцина для фиксации сегмента.

Перемещения вдоль оси  $Z$  осуществляются цилиндрами  $J_1$  и  $J_2$ , вдоль оси  $X$  — цилиндрами  $J_3$  и  $J_4$ , вдоль оси  $Y$  — цилиндрами  $J_5$  и  $J_6$ . Наклон устанавливающего элемента обеспечивают цилиндры  $J_7$  и  $J_8$ , вращение —  $J_9$  и  $J_{10}$ . В таблице 10.1 приведены основные технические характеристики направляющего элемента.

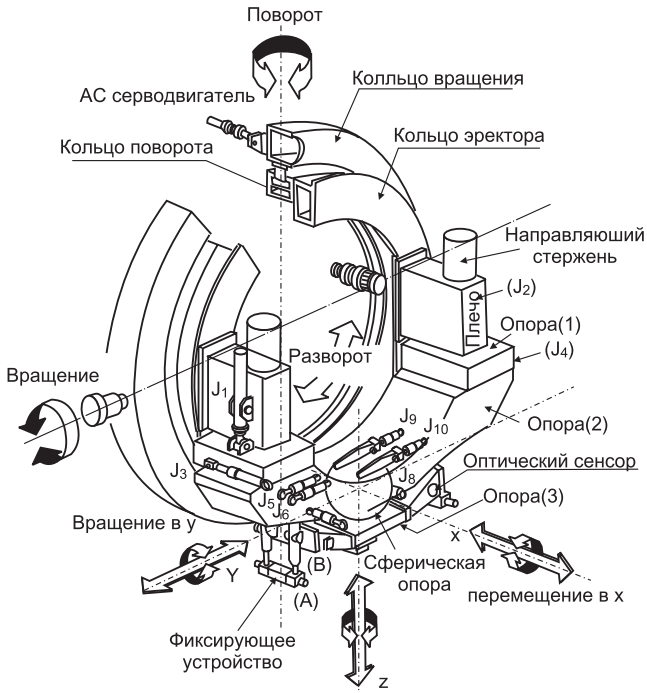


Рис. 10.21. Конструкция устанавливающего элемента

Таблица 10.1

Направление	Диапазон перемещений	Скорость (max)
Ось X	200 мм	40 мм/с
Ось Y	200 мм	40 мм/с
Ось Z	1200 мм	40 мм/с
Ось поворота	1,5°	0,41 с <sup>-1</sup>
Ось закручивания	1,5°	0,41 с <sup>-1</sup>
Ось наклона	2°	0,60 с <sup>-1</sup>
Ось вращения	200°	0,6 мин <sup>-1</sup>

Наконечник А струбины предназначен для ввода его в болтовое отверстие сегмента. Подъем сегмента до уровня крепления его в струбине осуществляется гидроцилиндром В.

Гидравлическая схема устанавливаемого элемента представлена на рис. 10.22. Из нее видно, что гидроцилиндры  $J_1$ — $J_4$  снабжены индивидуальными управляющими электро-гидрозолотниками. Гидроцилиндры  $J_5, J_6$  и  $J_7, J_8$  включены параллельно и имеют по одному общему электро-гидрозолотнику. Между гидроцилиндрами и золотниками установлены управляемые запорные ( $C_1, C_2$  и т. д.) и магнитные ( $V_1, V_2$  и т. д.) вентили, предохраняющие систему от неожиданно возникающих перегрузок. Расход жидкости составляет 150 л/мин, а рабочее давление — 210 кг/см.

Функциональная схема системы управления комплекса приведена на рис. 10.23. Из ее рассмотрения видно, что управление всей системой осуществляется от шести программируемых контроллеров (PC1-PC6). Координация всех выполняемых операций осуществляется от главного контроллера, установленного между программируемыми и исполнительными контроллерами [128]. Связь между H1-SDACS и PC1, а также между PC1 и PC2-PC6 осуществляется при помощи локальной системы (LAN), которая, в свою очередь, взаимодействует с процессором, а также с главным и управляющими контроллерами посредством шины данных RS422. Главный контроллер обменивается данными с процессором и, при наличии отклонений устанавливаемого сегмента от проектного положения, выдает соответствующие сигналы на исполнительные контроллеры.

Схема автоматического монтажа тубинговых сегментов представлена на рис. 10.24. Весь процесс заключается в последовательном выполнении повторяющихся операций.

1. Подача сегмента: сегменты подаются и позиционируются эректором.
2. Крепление сегментов: осуществляется введением болтов в соответствующие отверстия сегмента, подъем его одним из гидроцилиндров к месту установки и предварительное крепление.
3. Грубое позиционирование: при помощи сигналов с фотоэлемента осуществляется монтаж сегмента с точностью 20 мм.
4. Точное позиционирование:
  - а. предварительная установка всего тубингового кольца в целом;

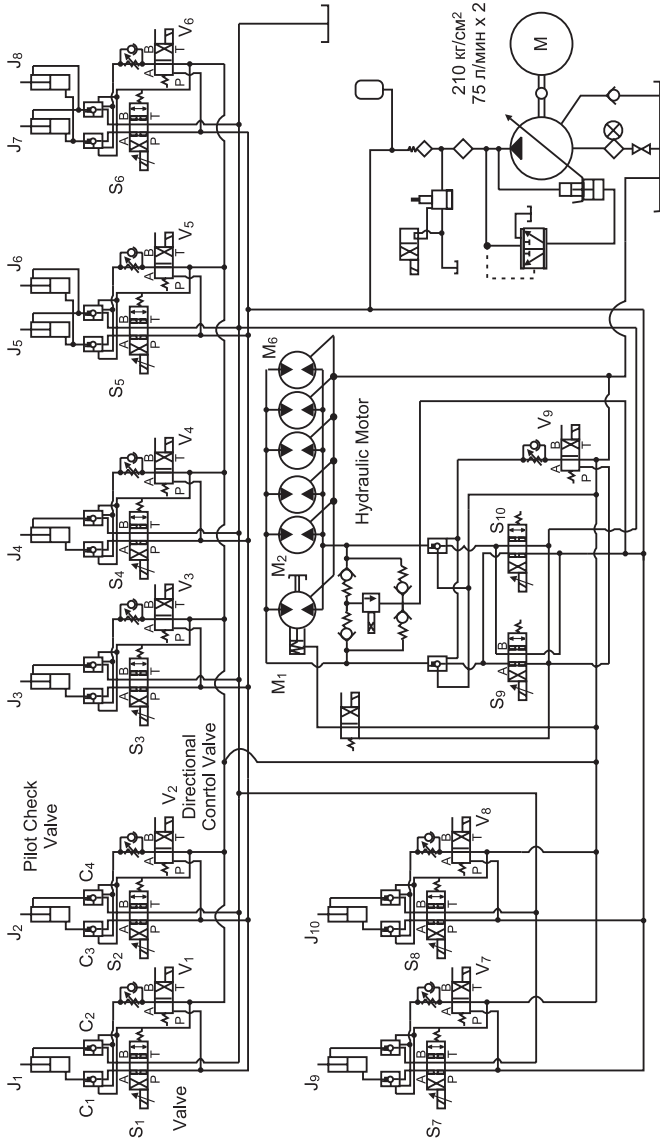


Рис. 10.22. Гидравлическая схема управления эректора  
 $J_1$ – $J_{10}$  – гидроцилиндры;  $C_1$ – $C_4$  – обратные клапана;  
 $S_1$ – $S_{10}$  – сервоцилиндры;  $V_1$ – $V_6$  – управляющие вентили;  
 $M_1$ – $M_6$  – гидродвигатели

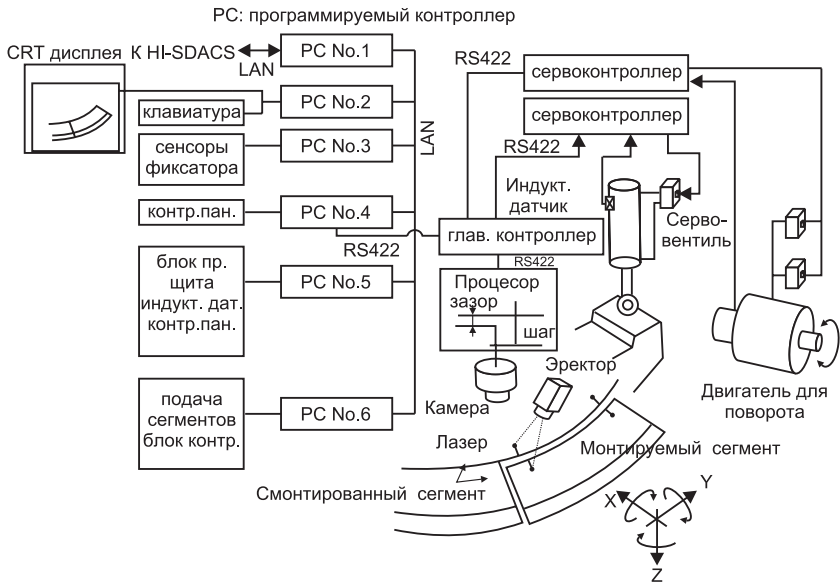


Рис. 10.23. Функциональная схема системы управления

- б. крепление сегментов левого полукольца тьюбинга;
- в. крепление сегментов правого полукольца тьюбинга;
- г. ввод малоформатного сегмента в пространство, образующееся между левым и правым полукольцами после их монтажа, и фиксация его в нем.

Принцип реализации такого пошагового монтажа секции представлен на рис. 10.25. Реализация пункта 4а осуществляется при помощи сенсоров S8, S1, S7 и S2, как это показано на рис. 10.25а. Реализации пунктов 4б, 4в и 4г соответствуют части б, в, г данного рисунка.

После завершения монтажа и крепления тьюбинга главный контроллер оценивает значения отклонения параметров ( $\Delta x$   $\Delta y$   $\Delta z$ ) и ( $\Delta\theta_x$ ,  $\Delta\theta_y$ ,  $\Delta\theta_z$ ) от проектных и формирует сигналы для исполнительных элементов, осуществляющих их необходимую корректировку. Достижимая точность монтажа секций составляет 0,1 мм, что соответствует наивысшей степени качества и надежности, прежде всего с точки зрения водонепроницаемости, уложенной таким способом тьюбинговой оболочки тоннеля.

После завершения установки тьюбинга в оставшиеся пустоты, образованные поверхностями его внешней оболочки и горной выра-

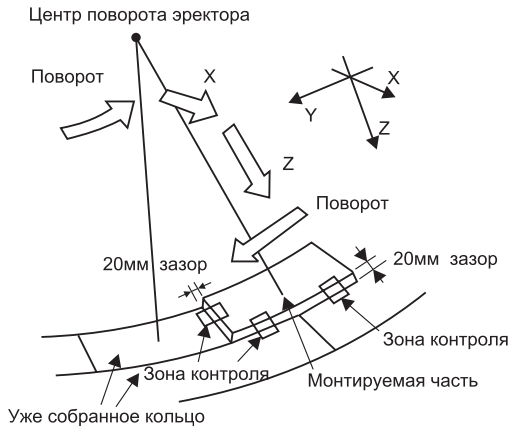


Рис. 10.24. Схема установки сегментов

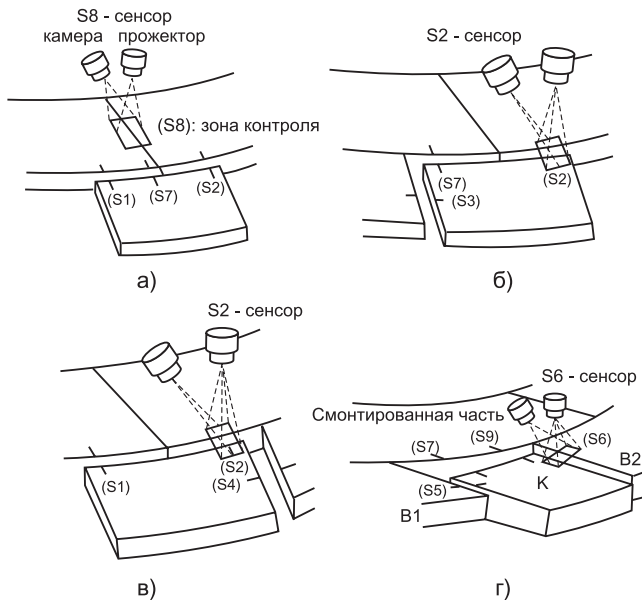


Рис. 10.25. Схема расположения светочувствительных сенсоров при точном монтаже тьюбинговых секций

- а — предварительная установка всего тьюбингового кольца;
- б — крепление сегментов левого полукольца тьюбинга;
- в — крепление сегментов правого полукольца тьюбинга;
- г — установка малоформатного сегмента

ботки, закачивается бетонный раствор, обеспечивающий их прочное сцепление. В три выработки английской части Евротоннеля было уложено вместе 442000 железобетонных тюбинговых секций общим весом 1,33 млн. тонн. В таблице 10.2 приведены некоторые данные, характеризующие объемы и темпы выполненных работ.

Таблица 10.2

Показатель		Инженерный тоннель	Ж. д. тоннель
Диаметр тоннеля	м	4,80	7,60
Длина оболочки			
Морская часть (север)	км	22,30	17,91
Морская часть (юг)	км	—	19,03
Земная часть (север)	км	8,52	8,14
Земная часть (юг)	км	—	8,16
Основные + замковая секции тюбингового кольца		6+1	
Размеры секций			
Длина	м	2,35	2,86
Ширина	м	1,50	1,50
Толщина (морская часть)	м	0,27	0,36
Толщина (земная часть)	м	0,41	0,54
Замковая секция	м	0,95	0,95
Скорость укладки	м/нед		
Морская часть		295	425
Земная часть		251	321

Ежедневно на одном из заводов по производству железобетонных изделий на британском побережье изготавливалось до 600 тюбинговых секции массой 0,75—9 т. Это происходило одновременно на восьми технологических линиях, управляемых от компьютеров, с тепловой обработкой элементов. Каждый час изготавливалось 70 м<sup>3</sup> бетона. Предел прочности бетонных элементов на сжатие находился в области 90—100 Н/мм<sup>2</sup>. Точность изготовления сборного тюбингового кольца составила 1—2 мм с отклонениями значения радиуса от нормы до 0,1 мм [129].

Естественно, что при подобных темпах установки тюбингов чрезвычайно высокие требования предъявляются к механизмам,



осуществляющим забутку бетоном пустот между внешней поверхностью кольца и горной породой. Специальный тьюбингозабучивочный агрегат напорного раствора (рис. 10.26) фирмы «Putzmeister» обеспечил безотказную подачу и запресовывания 350000 м бетона во время всего строительства [130].

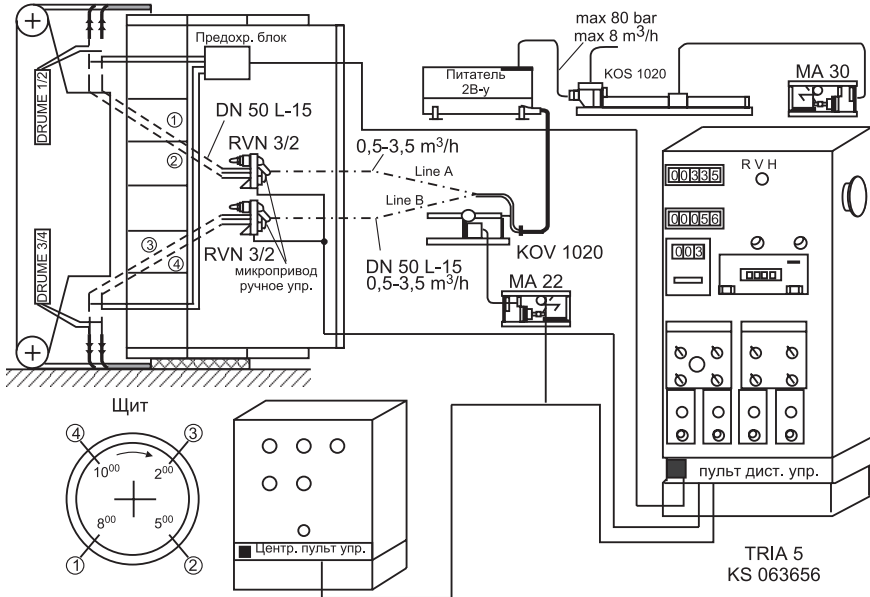


Рис. 10.26. Установка фирмы «Putzmeister» для забутки тьюбингов

Это уже само по себе является характеристикой его исключительной надежности. Подаваемый под давлением к месту запресовывания раствор, изготовлялся из двух компонентов. При этом обязательным являлось точное поддержание соотношения между этими компонентами, что было возможным за счет совмещенного управления обоими напорными насосами. Регулирование объемов транспортируемых компонентов осуществлялось с общего пульта управления.

Первая подобная управляемая от компьютера установка фирмы «Putzmeister» была разработана и применена еще в 1986—87 годах при строительстве метро в г. Нюрнберге (ФРГ). Универсальность конструкции обеспечивает возможность ее использования при различных режимах эксплуатации:

1. Режим ручного управления. В этом случае, как инъекционный блок, так и перекачиваемый объем регулируются вручную.
2. Режим ручного управления с предварительной установкой уровня подачи. При достижении определенного значения объема подаваемого раствора, насос автоматически отключается.
3. Режим работы «Программирование напорной схемы». При этом выбирается ряд инъекционных блоков и задаются объемы перекачиваемых ими растворов.
4. Автоматический режим. При этой задаются следующими критериями: предварительная установка давления и уровня подачи, задание времени.

При данных режимах работы основным параметром является давление. Эта значит, что при достижении определенного значения давления весь процесс прерывается без учета значений других параметров. Тем самым гарантируется избежание деформации тюбингов. Значение максимального давления выбирается в зависимости от конкретных условия строительной площадки для того, чтобы, прежде всего, воспрепятствовать попаданию воды через инъекционный блок. При подработке подлежащего заполнению бетоном пространства это давление должно быть минимум так высоко, как окружающее ее горное давление. Тем самым исключаются возможные просадки. Управление установкой настраивается на подаваемый объем раствора и автоматически согласуется со скоростью проходки выработки щитовым комплексом.

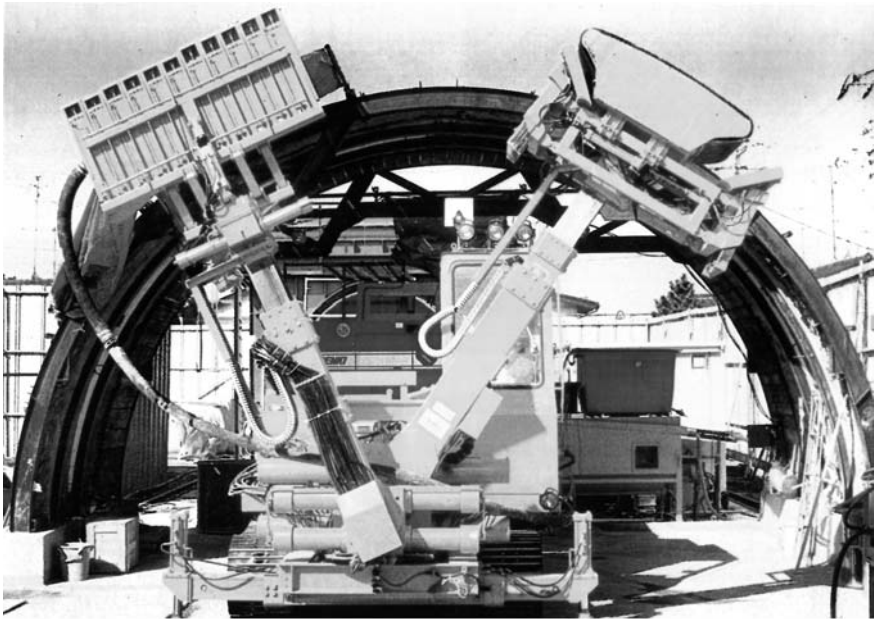
Железобетонные элементы могут монтироваться с миллиметровой точностью. Уложенные тюбинги служат кроме всего прочего и в качестве опорного элемента, на которые опираются гидродомкраты щита, обеспечивающие его подачу на фронт забоя. От точности работы монтажного устройства зависит в значительной степени точность сборки тюбинговых колец. Устройство должно точно позиционировать сегменты тюбинга и развивать достаточную силу, необходимую для сжатия уплотнений между ними. Для избежания местных напряжений в бетоне тюбинги должны тщательно и точно конструироваться, изготавливаться и устанавливаться. Допустимые отклонения при их изготовлении лежат в области 1 мм. Зона корректировки является ограниченной, так как отделка тоннеля должна следовать непосредственно за его проходкой щитом, и определяется как производная от геометрии тюбингового кольца, чтобы избежать повреждений щита или самих колец. Управление щитом должно осуществляться по задаваемой траектории и не

зависеть только от положения уложенных колец. Это делается для того, чтобы избежать его выхода из допустимой зоны отклонений, если одно кольцо будет уложено неверно. Как известно, корректировка положения многотонного щита в горных породах является очень сложной операцией.

Важнейшими требованиями при укладке тюбинговых колец являются:

- определение положения проходческого щита с представлением информации в графической и цифровой форме;
- определение и представление информации о положении колец после их установки;
- определение тенденции отклонения проходческого щита от заданной траектории при его перемещении;
- расчет корректировочной траектории, для возвращения щита к заданной оси;
- расчет последовательности установки колец (на основании корректировочной траектории);
- представлении информации о развиваемых усилиях для оптимального ведения щита по заданной траектории;
- полный контроль всех элементов автоматизированного проходческого комплекса при помощи персонального компьютера;
- расчет траектории на основе обычных геометрических параметров трассы;
- автоматический контроль положения лазерного теодолита;
- программное задание положения лазерного теодолита, например, во время монтажа колец;
- опциональное представление информации об актуальном положении проходческого щита в строительном управлении участка или в другом месте (посредством телефонной связи);
- опциональное автоматическое измерение зазора между окончанием щита и последним установленным тюбингом.

Измерение зазора между хвостовой частью щитового комплекса и последним тюбинговым кольцом осуществляется при помощи приборов, устанавливаемых на устройстве для монтажа колец. Такие приборы устанавливаются при изготовлении монтажных устройств с учетом их конструктивных особенностей. Это экономит затраты на выполнение измерений вручную и на внесение информации в устройство управления, являющейся предпосылкой для проведения предварительных расчетов колец.



*Рис. 10.27. Опалубочный робот для отделки сводов тоннеля*

Для отделки сводов тоннеля иногда используются так называемые опалубочные роботы (рис. 10.27). Такой робот имеет две телескопические штанги: с опалубочным щитом и с соплом для подачи раствора. Он может быть использован для тоннелей различного диаметра. Этапы технологического процесса представлены на рис. 10.28. При этом возможно создание гладкой и равномерной поверхности тоннеля. Рабочий процесс выполняется в автоматическом режиме и синхронизирован с проходческим комплексом.

## **10.5. Автоматизация строительства мини-тоннелей**

Под мини-тоннелями понимаются подземные выработки для прокладки труб большого диаметра и коллекторных систем. Строятся они при помощи мини-щитов, обеспечивающих высокую надежность и точность проходки, экономичность и экологичность строительства. Спектр их назначения лежит от подключения зда-

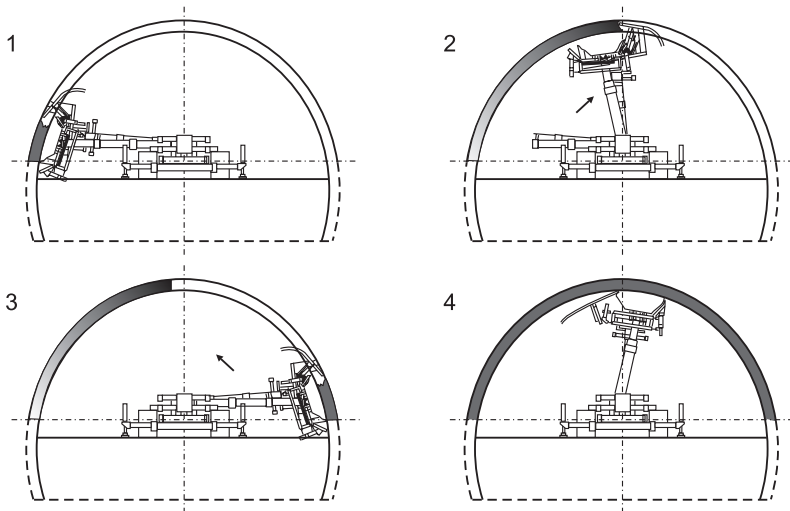


Рис. 10.28. Схема рабочего процесса опалубочного робота

ний к коммуникационным сетям до канализационных каналов, с возможностью перемещения в них обслуживающего персонала.

Открытые разработки грунта ограничиваются устройством стартового и приемного стволов малого диаметра. Перемещение отработанного буровым агрегатом грунта осуществляется соответствующей транспортной системой. В стартовом стволе устанавливается силовое оборудование для перемещения проходческого устройства и вдавливания отрезков труб в направлении приемного ствола (рис. 10.29) [131]. Тоннель наращивается шаг за шагом из отдельных стыкуемых между собой труб до достижения положенной длины.

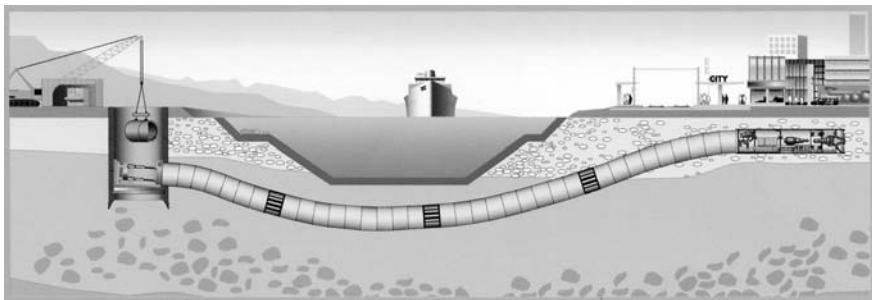


Рис. 10.29. Прокладка мини-тоннеля криволинейной траектории на протяженном участке

Мини-щиты обеспечивают возможность строительства тоннелей длиной до 1000 м без необходимости устройства промежуточных стволов (рис. 10.30). Размещаемые в трубопроводе расширители обеспечивают избежание превышения значения силы для продавливания труб в грунте допустимого предела. Автоматическая бентонитная смазочная система обеспечивает даже в меняющихся геологических условиях оптимальную смазку внешней поверхности трубопроводов. Системы управления мини-щитами позволяют осуществлять точное их ведение по протяженным участкам и криволинейным траекториям.

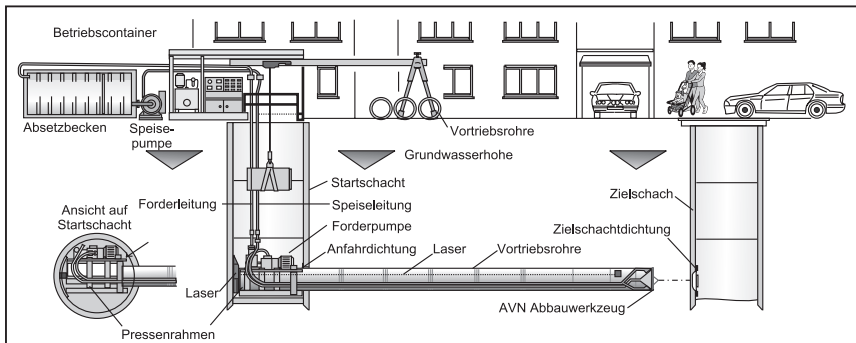
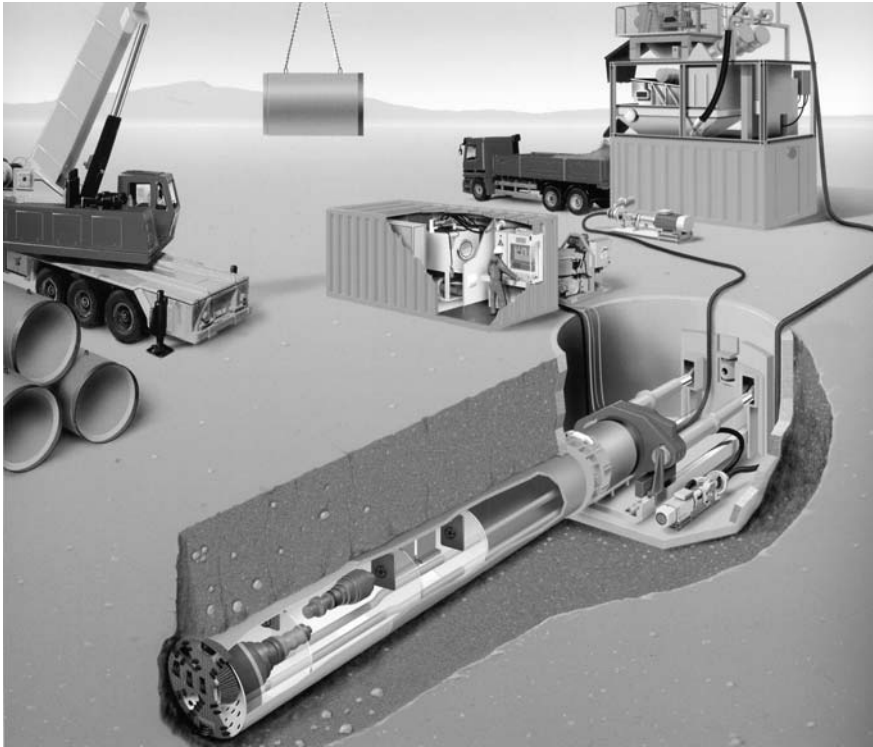


Рис. 10.30. Прокладка мини-тоннеля в условиях тесной городской застройки

Отработанный грунт может транспортироваться к стартовому стволу механическим или гидравлическим способом. У щитов, работающих на принципе гидроразмыва грунта (рис. 10.31) для отвода материала используется рабочая жидкость. На поверхности грунт отделяется от жидкости, и она вновь используется в рабочем процессе. Таким способом могут строиться мини-тоннели большой протяженности.

Современные гидрощиты характеризуются первоклассными техническими решениями, например, наличием программно управляемых буровых исполнительных органов, использованием гидроразмыва высокого давления, смазочных бентонитных систем, доступностью забоя для осмотра. Высок их технические характеристики. Исполнительный орган диаметром 2270 мм развивает рабочий момент вращения в 430000 Н·м при номинальной мощности 250 кВт (рис. 10.32).



*Рис. 10.31. Мини-щит с гидроразрывом грунта*

У щитов, работающих по механическому принципу, отвод грунта от забоя осуществляется при помощи шнекового органа (рис. 10.33). Для дальнейшего его перемещения используются транспортерные ленты, тележки или перекачивающие насосы. Для погрузки грунта могут использоваться мини-экскаваторы или специальные погрузчики. Преимуществом транспортерных лент является возможность перемещения всех видов грунта. Перекачивающие насосы применяются при мягких грунтах и характеризуются высокой производительностью. Предотвращение обрушения забоя и проходимого мини-тоннеля обеспечивается выполнением щитовым комплексом еще и функции крепления выработки (рис. 10.34).

При отсутствии водоносных слоев в грунте щиты снабжаются ковшем экскаватора или струговым исполнительным органом, позволяющими осуществлять погрузку грунта на ленту транспортера. В особых случаях проходческие комплексы оснащаются пневмати-



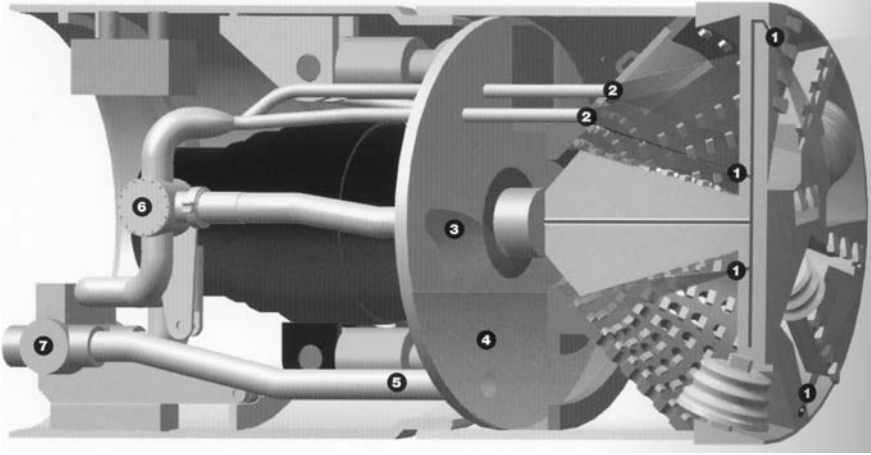


Рис. 10.32. Буровой орган с регулированием положения в пространстве  
1 — сопло воды высокого давления; 2 — отверстия;  
3 — промывочная жидкость; 4 — смешительная камера; 5 — канал для овода промывочной жидкости; 6, 7 — вентили

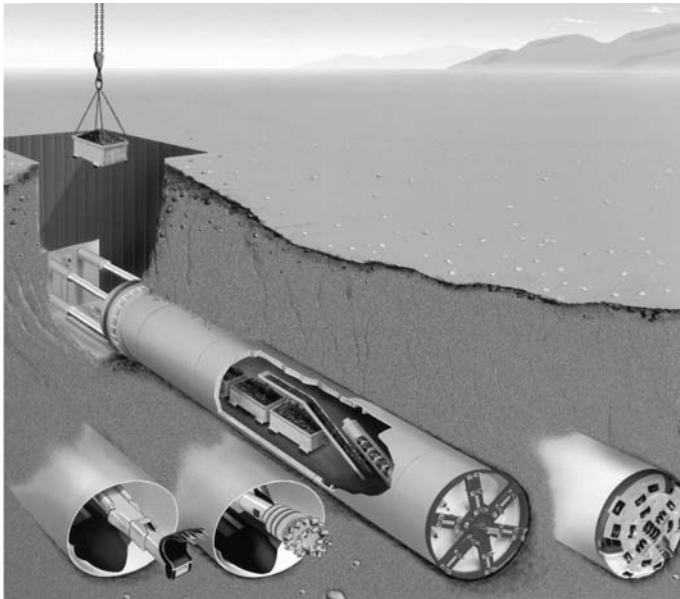
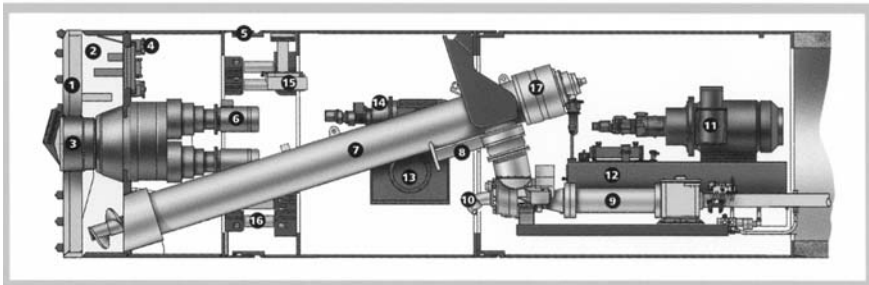
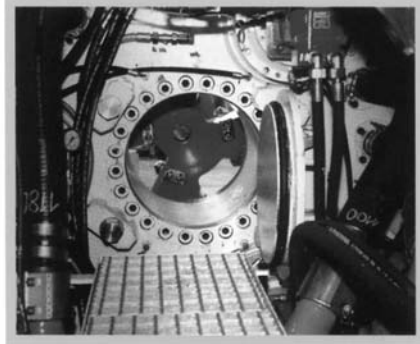
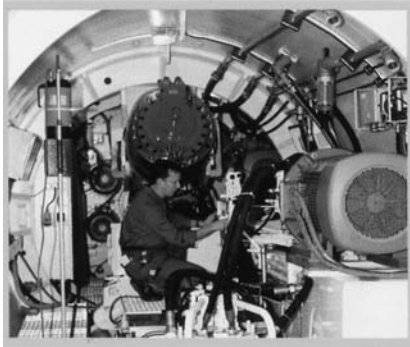


Рис. 10.33. Типы проходческих мини-щитов





*Рис. 10.34. Конструкция мини-щита*

*1 — исполнительный орган; 2 — камера исполнительного органа; 3 — привод бурового органа; 4 — дверь; 5 — сочленение щита; 6 — привод режущего инструмента; 7 — шнековый транспортер; 8 — салазки транспортера; 9 — шламовый трубопровод; 10 — нагнетающая труба; 11 — агрегат шламонасоса; 12 — емкость масляного насоса; 13 — масляный бак щита; 14 — агрегаты щита; 15 — приемная мишень; 16 — цилиндр управления; 17 — привод шнеков*

ческими опорными элементами. При необходимости экскаваторы заменяются струговыми исполнительными органами. На современном рынке строительной техники предлагаются установки для строительства мини-тоннелей диаметром от 250 мм до 4 м.

Благодаря интеллектуальным методам управления трубы могут без проблем укладываться на протяженных участках криволинейной формы. Высокоточные сенсоры обеспечивают высокую точность проходки даже при резко меняющихся геологических условиях. Система автоматического контроля типа SLS-RV (Германия) позволяет в любой момент времени иметь точную информацию о положении щита в выработке (рис. 10.35) [132].

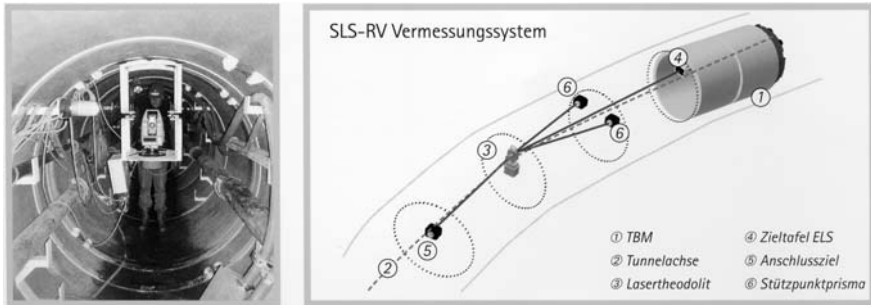


Рис. 10.35. Система автоматического контроля положения щита

Оператор имеет возможность быстро реагировать на возникающие недопустимые отклонения от заданной оси и своевременно вмешиваться в работу щитового комплекса. Система автоматического контроля состоит из лазерного теодолита, фотоприемной мишени и отражающих призм. Размещается она в передней части тоннеля.

Для тоннелей малого диаметра применяется гироскопическая система управления типа Gyro-Tunneling-System (GTS) (рис. 10.36) [132]. Установленный на щите гироскоп измеряет положение щита при помощи специального компаса и датчиков наклона. Существенное преимущество подобного способа измерений заключается в возможности контролировать траектории движения при очень малых диаметрах щита. На примере систем автоматического управления мини-щитами можно убедиться, что степень сложности техники не связана с трудностью ее обслуживания. Трехмер-

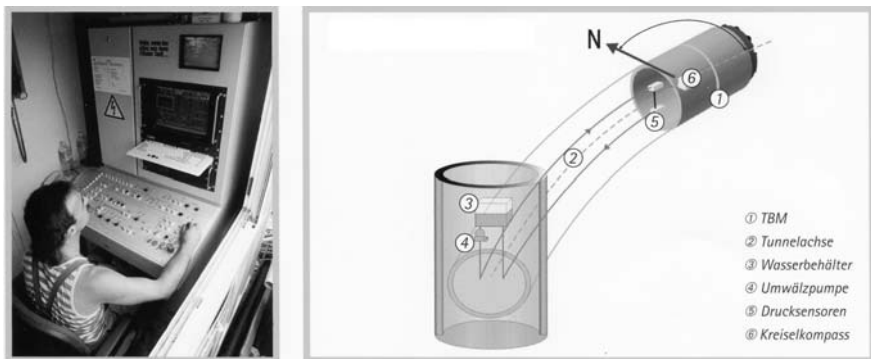


Рис. 10.36. Гироскопическая система для тоннелей малого диаметра

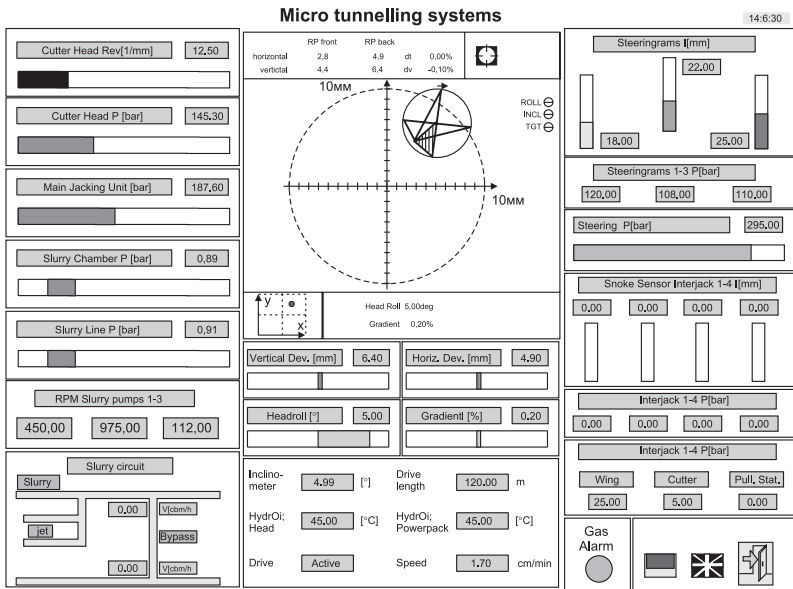


Рис. 10.37. Монитор системы управления мини-щитом

ное представление положения щита в пространстве на мониторе позволяет персоналу очень просто контролировать автоматический режим его работы (рис. 10.37).

## 10.6. Роботы для торкретирования сводов тоннелей

Торкретбетон, являющийся бетоном, наносимым путем напыления под давлением воздуха на подлежащую бетонированию поверхность, появился в строительстве еще в начале прошлого века и получил название по имени особенно активно применяющей его фирмы, Tokkret. Однако до сих пор еще он рассматривается иногда как нечто новое и особенное, хотя для него в полной мере справедливы все традиционные законы бетонной технологии.

Различаются два способа приготовления торкретбетона: сухой и влажный. В первом случае сухая цементная смесь подается по специальному шлангу при помощи сжатого воздуха в рабочее сопло, где происходит ее смешивание с впрыскиваемой водой, доза которой регулируется оператором вручную. Точное поддержание со-

отношения — вода/цементная смесь весьма затруднительно. Давление воздуха в шланге должно быть таким, чтобы, во-первых, частички транспортируемой сухой смеси не осаждались на его стенках и, во-вторых, обеспечивался набрызг подготовленной бетонной смеси на обрабатываемую поверхность. Очевидно, что, из-за недостаточно интенсивного смешивания цемента с водой в рабочем сопле, при данном способе неизбежны высокие уровни отскока материала и пылеобразования.

При втором способе торкретирования, нашедшим наиболее широкое распространение в последние 25 лет, к рабочему соплу подается уже готовый бетон (рис. 10.38).

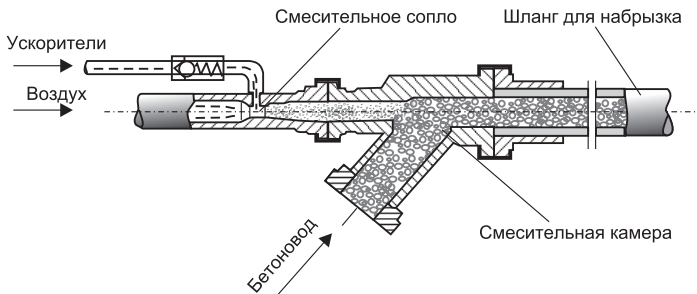


Рис. 10.38. Инжекционное сопло для нанесения торкретбетона

Здесь в него добавляются ускорители, а за счет сжатого воздуха он получает необходимое для торкретирования ускорение. При встрече с поверхностью его кинетическая энергия преобразуется в компрессионную, т. е. она определяет уровень плотности образуемого бетонного покрытия. Степень сжатия воздуха определяется не столько требованиями к подаче бетона, сколько оптимальностью его уплотнения.

Система, получившая известность под названием Top Shot, разработанная фирмой Holzmann (ФРГ), базируется на подаче готового бетона [133]. Представленная на рис. 10.39 ее схема является типичной для данного метода.

Торкретбетон для подземного строительства приобретает в последние годы все большее значение. Его применение, однако, осложняется тем что рабочее место на торкретной установке чрезвычайно опасно для здоровья. Исследования показывают наличие в воздухе больших объемов пыли, и прежде всего кварцевых частиц, часто превышающих допустимые нормы. Работа оператора

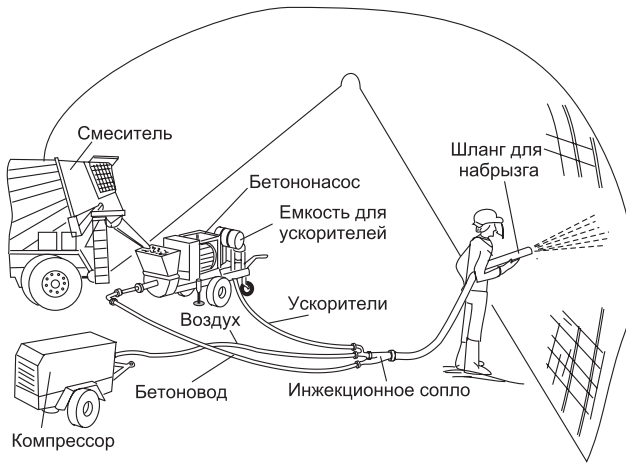


Рис. 10.39. Система Top Shot

связана с большими физическими нагрузками, затрачиваемыми на ведение наносящего раствор сопла, высоким шумом и концентрированным отскоком высокодисперсных частиц пыли. В условиях еще незакрепленной выработки постоянно присутствует опасность скола и обвала породы (рис. 10.40). Цемент и соответствующие торкретные добавки (ускорители) являются в соединении с водой высокощелочными. Раздражение кожи, аллергия и заболевания дыхательных органов, как правило, сопутствуют этой профессии. Исходя из перечисленных факторов можно установить, что для повышения качества, экономичности и соблюдения требований по охране труда, данный процесс должен быть автоматизирован настолько широко, насколько это является возможным. Работы, направленные на решение данной проблемы, были начаты еще в 60-е годы. Тогда при строительстве подводного тоннеля в Ноелjes (Швеция) для ведения рабочего инструмента был создан первый специальный манипулятор [134]. Установка (рис. 10.41) представляла стреловидную конструкцию, на конце которой была закреплена поворачивающаяся телескопическая рука. Пространственные перемещения стрелы реализовывались за счет наличия тягового троса. Оператор обслуживал установку, т. е. осуществлял управление рабочим соплом, с платформы, находясь на некотором удалении от места обработки поверхности.

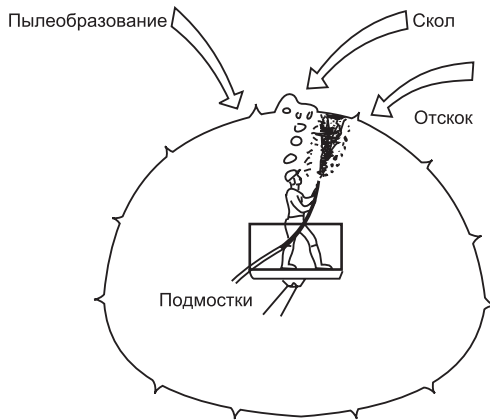


Рис. 10.40. Воздействия на оператора при торкретировании

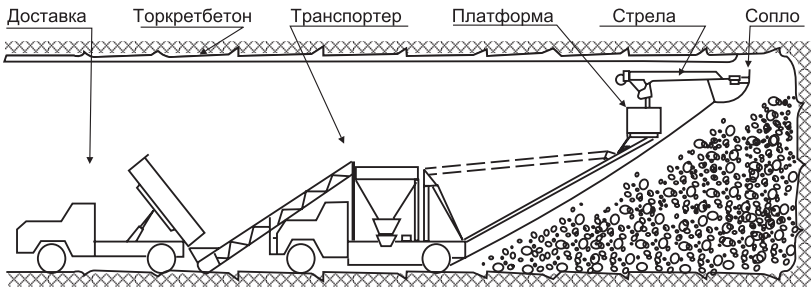


Рис. 10.41 Торкрет-установка, примененная в 1960 г. при строительстве подводного тоннеля Hoeljes (Швеция)

Последующей наиболее известной разработкой в данном направлении является манипулятор (рис. 10.42) для нанесения торкретбетона, примененный при строительстве железнодорожного тоннеля в Heisterberg (Швейцария).

При проходке этого тоннеля в период 1969—1972 гг. в щитовой проходческий комплекс были интегрированы два таких манипулятора. Первый из них находился непосредственно за исполнительным органом и предназначался для предварительной обработки поверхности выработки. Второй манипулятор располагался на некотором удалении от первого и осуществлял усиление уже нанесенного слоя бетона. Его конструкция позволяла осуществлять автоматическое вращательно-маятниковое движение относительно оси тоннеля и, тем самым, посегментное нанесение бетона. Пе-

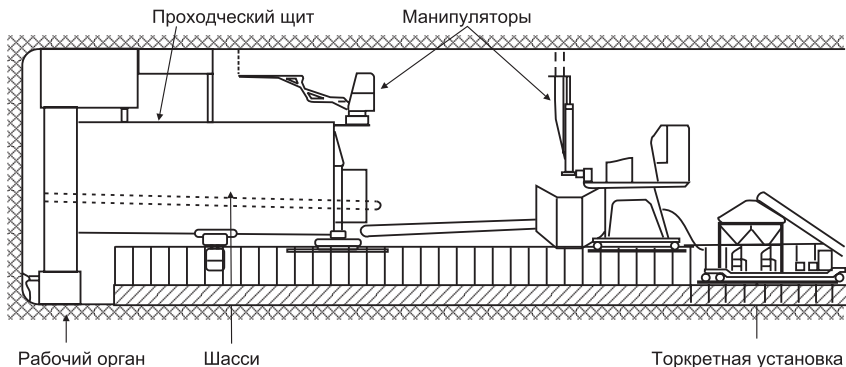


Рис. 10.42. Манипуляторы для нанесения торкретбетона при строительстве тоннеля в Heisterberg (Швейцария)

редний манипулятор был снабжен вращающейся осью и мог перемещаться вдоль оси тоннеля вперед и назад, что значительно расширяло его рабочую область.

Два данных типа манипуляторов определили, практически, конструкции устройств, нашедших распространение в настоящее время. Простейшим из них является манипулятор с разворачивающейся и наклоняющейся телескопической стрелой (рис. 10.43 а).

Исполнительные гидроцилиндры производят подъем и опускание стрелы, а турель, обеспечивающая конструктивную связь стрелы с несущим основанием, служит для ее поворота. Данная кинематическая схема манипулятора лежит в основании последующей системы с двойной шарнирно сочлененной конструкцией (рис. 10.43 б). Общим у них является возможность поворота всего

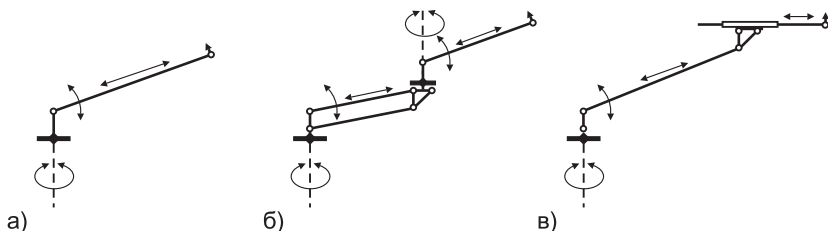


Рис. 10.43. Кинематические схемы манипуляторов с вращением стрелы относительно вертикальной оси  
 а — с разворачивающейся и наклоняющейся стрелой; б — с двойной шарнирно-сочлененной конструкцией; в — с разворачивающейся и наклоняющейся стрелой в комбинации с телескопическим лафетом

устройства относительно одной вертикальной оси. Для обеспечения необходимого перемещения механизма подачи по длине, при горизонтальном ведении сопла с поддержанием постоянного расстояния его до обрабатываемой поверхности, система располагает подвижной несущей конструкцией. Перемещаемость достигается при помощи специальной направляющей системы, размещаемой на переставляемой по высоте платформе или, как при строительстве тоннеля в Heisterberg, встраиваемой в конструкцию проходческого комплекса.

Еще одной распространенной кинематической схемой манипулятора для торкретирования является система отличающаяся от базовой наличием телескопического лафета (рис. 10.43 в). Поворотные и выравнивающие гидроцилиндры обеспечивают автоматическое поддержание параллельного положения лафета относительно оси выработки. При этом горизонтальное ведение сопла возможно уже при одном только продольном перемещении лафета. Весь манипулятор может перемещаться вверх и вниз подъемным гидроцилиндром.

Все перечисленные кинематические схемы построены по принципу вращения вокруг вертикальной оси. Представленные на рис. 10.44 схемы отличаются тем, что вращение конечного плеча манипулятора происходит относительно горизонтальной оси и позволяет тем самым при кругообразных профилях горной выработки точное ведение сопла по вертикали.

Первая из них состоит из главного и двух пар вспомогательных звеньев. Главное звено делает возможным упомянутое уже вращение вокруг горизонтальной оси. Его подъем и опускание происходит посредством гидроцилиндров. Шарнирная опора нижних вспо-

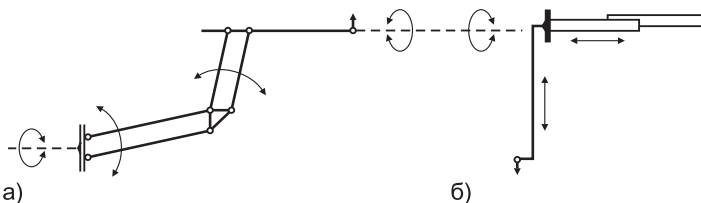


Рис. 10.44. Кинематические схемы с вращением сопла вокруг горизонтальной оси

- а — устройство с вращением стрелы вокруг продольной оси;  
 б — система с вращением телескопической стрелы относительно перемещаемого основания



могательных звеньев позволяет изменять угол наклона манипулятора. Тем самым достигается продольная подача верхних звеньев. Представленная параллелограммообразная конструкция гарантирует горизонтальное ведение верхних вспомогательных звеньев.

Во второй схеме (рис. 10.44 б), в противоположность первой, вокруг горизонтальной оси вращается телескопическое звено. Связь этого звена с несущим основанием имеет ту особенность, что данное основание является перемещаемым и позволяет осуществлять подачу рабочего элемента по направлению вырабатываемого пространства.

Одна из систем, построенная по такому принципу, представлена, на рис. 10.45. Она была разработана в Японии и является первой из них способной осуществлять автоматическое ведение сопла в соответствии с предварительно заданной программой, определяемой параметрами сечения выработки.

На рис. 10.46 представлена одна из последующих японских разработок в данной области. В ней, наряду с автоматическим ведением сопла, при помощи двух лазерных приборов происходит электронное позиционирование установки. В обоих случаях необходимо отметить наличие значительных проблем связанных с управлением, проведением измерений и степенью гибкости сис-

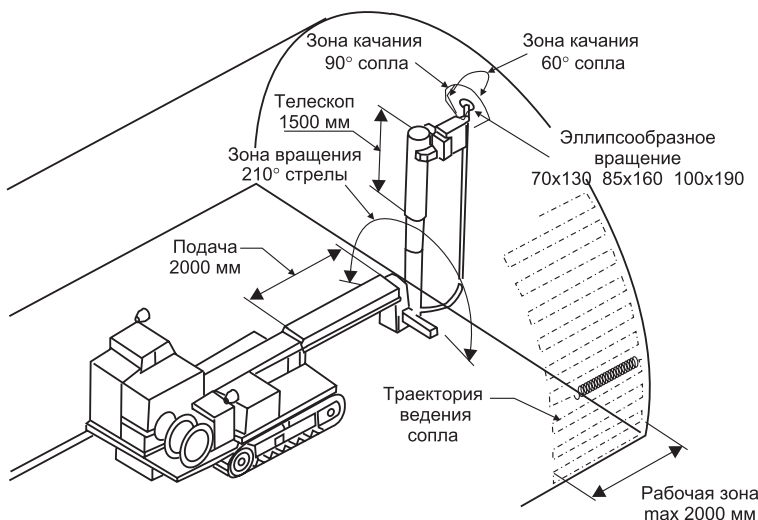


Рис. 10.45. Мобильный торкретманипулятор с автоматическим ведением рабочего сопла

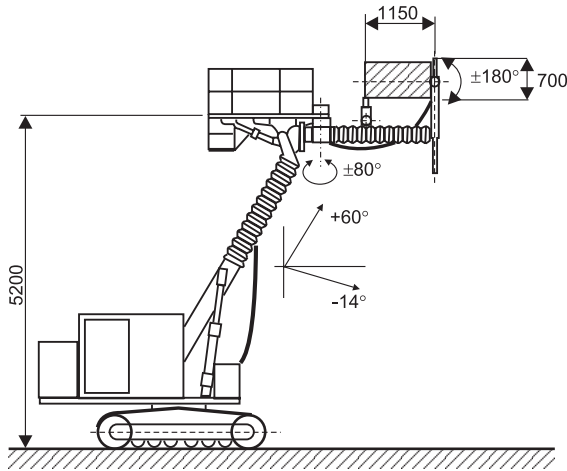


Рис. 10.46. Торкретробот с позиционированием положения мобильной платформы

тем. Вследствие этого они так и не нашли широкого применения в практике подземного строительства. Особенно сложно их использовать в выработках с возможными выбросами газа, когда непременно требуются повышенная гибкость систем и особые меры безопасности при проведении работ.

Приведенные примеры показывают, что автоматическое ведение рабочего органа, в данном случае — сопла, связано лишь с небольшим количеством определенного вида базовых движений. Техническая реализуемость рассмотренных систем зависит от существующих в каждом конкретном случае краевых условий: размеров выработки, характера горных пород, степени взрывоопасности окружающей среды.

Решающего повышения качества торкретирования можно добиться при автоматизации ведения рабочего сопла. При круговых движениях выделение высокодисперсионной пыли, по сравнению с фиксированным положением сопла, сокращается на 15%. Ее концентрация снижается также с увеличением расстояния до поверхности выработки. Так как достигаемая прочность бетона в высокой степени зависит от этого параметра, то его значение должно составлять около 1,5 м. При этом соблюдается компромисс между сокращением выделяемой пыли и качеством бетона. Исследования [135] показывают, что концентрация высокодисперсионной

пыли  $C_F$  зависит прежде всего от объемного расширения и расстояния струи от обрабатываемой поверхности (рис. 10.47).

При оптимальном ведении сопла выделение пыли может сократиться до  $40 \text{ мг/м}^3$ , что в два раза меньше обычных показателей.

На одной из последних строительных выставок в Париже была представлена мобильная роботизированная торкретустановка с телевизионным контролем области нанесения бетона. Система состоит из очень прочной, нечувствительной к вибрации и сотрясениям, защищенной от повреждения острыми частичками пыли камеры, а также пульта дистанционного управления торкретроботом с монитором, размещенным в защищенной фильтром кабине, располагаемой на несущей платформе. Два галогенных прожектора обеспечивают хорошую освещенность контролируемой зоны.

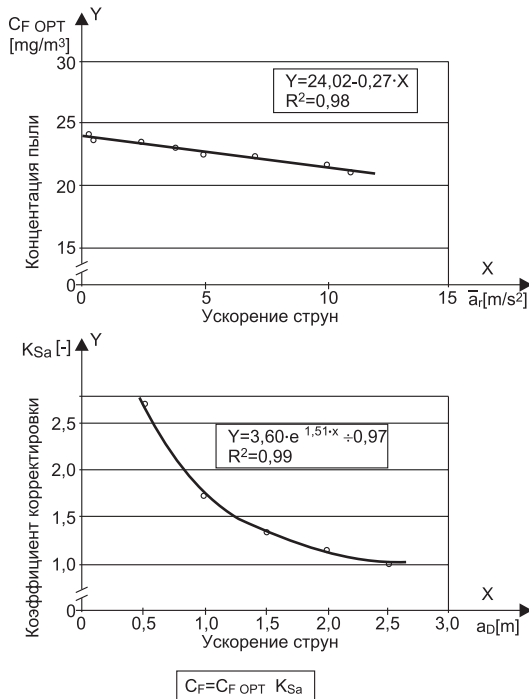
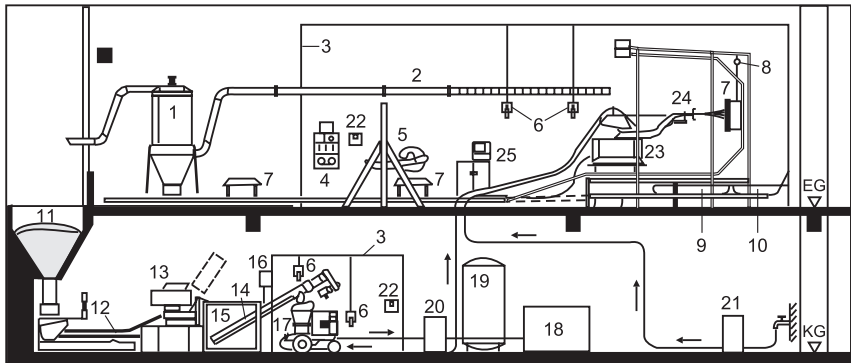


Рис. 10.47. Влияние ведения сопла на концентрацию высокодисперсионной пыли  
вверху — зависимость от силы струи; внизу — зависимость от расстояния сопла до поверхности выработки

Применение роботов способствует не только улучшению рабочих условий, но и повышению качества и экономичности подземного строительства [136]. За счет автоматизации ведения рабочего сопла, устанавливаемого на специальном роботе, достигается почти полное устранение недостатков, сопровождающих торкретбетонирование при обычных, выполняемых вручную операций, связанных с качествах бетона (прочность, равномерность нанесенного слоя, рассеиваемость струи), экономичностью (потери при отскоке) и условиями труда (пылеобразование). Комплексные исследования данных вопросов в течение ряда лет интенсивно проводятся в Рурском университете г. Бохума (ФРГ). На специально созданном для этого испытательном стенде (рис. 10.48) возможно определять технологические и технические параметры соответствующих устройств при оптимизации ведения сопла. Стенд включает в себя элементы позволяющие определять качество бетона, долю отскочившего материала и концентрацию пыли, а также устройства для моделирования движений сопла на шарнире робота (вращение и раскачивание с варьируемыми радиусами и бесступенчатые изменения частоты движений). В соответствии со специально разработанной программой задания соплу различных видов движения, скорости перемещения, углов и расстояний к обрабатываемой поверхности, на данном стенде была установлена область оптимальных параметров его ведения при торкретировании. В то время как род или вид движения сопла обеспечивается соответствующим программированием робота, для поддержания расстояния и угла наклона сопла к поверхности требуются особенно прочные и надежные сенсоры, способные безотказно работать в крайне сложных условиях, а именно: при пылеобразовании; плохих освещении, видимости и соотношениях контрастности; во влажном окружающем воздухе; неровностях поверхности; постоянном наличии отскока наносимого материала и динамических нагрузках из-за вибрации и дрожания сопла.

Проведенные на испытательном стенде исследования показали, что радиолокационные и ультразвуковые способы измерения расстояния сопла до поверхности выработки мало пригодны при торкретбетонировании, а вот лазерные приборы, работающие в инфракрасном диапазоне излучения, обеспечивали очень точные и надежные результаты. Они практически не подвержены влиянию материалов, попадающим в зону измерения в результате отскока (рис. 10.49).



**Рис. 10.48. Схема испытательного стенда в Бохуме для исследования процессов, связанных с торкретбетонированием**  
 1 — установка для всасывания и отделения пыли; 2 — система проветривания; 3 — пыленепроницаемая оболочка; 4 — Блок обработки измерительной информации; 5 — стенд для бурения и резания; 6 — прибор для измерения концентрации пыли; 7 — подвижная панель; 8 — панельные весы; 9 — весы для взвешивания отскока; 10 — дифференциальные весы; 11 — емкость для цемента и добавок; 12 — дозатор; 13 — смеситель; 14 — дозирующий шнек; 15 — накопительная емкость с весами; 16 — добавка ускорителей для бетона; 17 — машина для транспортировки торкретбетона; 18 — компрессор; 19 — котел сжатого воздуха; 20 — устройство для измерения и регулировки воздуха; 21 — устройство для измерения и регулировки воды; 22 — станция дуплексной связи; 23 — торкретробот; 24 — система для измерения расстояния сопла до панели; 25 — блок управления роботом

Результаты проведенных в Бохуме исследований были внедрены на практике на базе переоборудованного для этой цели промышленного робота Unimate 2105G (рис. 10.50) в экспериментальной горной выработке Termonia неподалеку от г. Дортмунда (ФРГ).

Для крепления выработки сечением 12,6 м, использовались бетонные плиты шириной по 1,2 м. Для заполнения швов между ними, составляющих 15 см, и пустотных полостей с горной выработкой использовался торкретбетон. Как и ожидалось, применение программируемого робота позволило повысить качество бетонного покрытия, снизить отскок и уровень пылеобразования.

На основании проведенных экспериментальных работ были доработаны и улучшены кинематические характеристики робота,

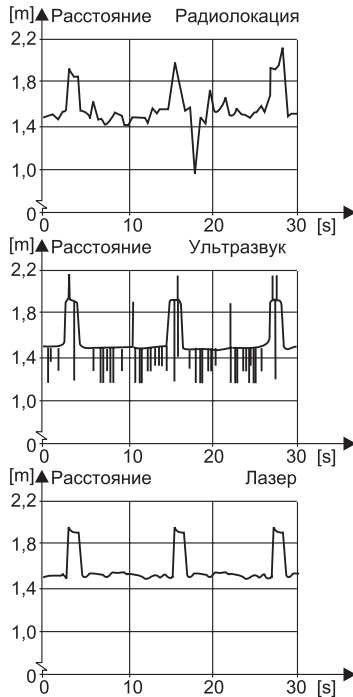


Рис. 10.49. Результаты измерения различными способами расстояния сопла до обрабатываемой поверхности

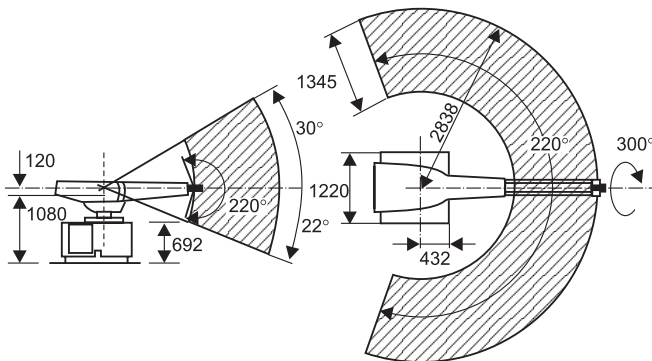


Рис. 10.50. Промышленный робот Unimate 2105 G

усовершенствована система управления и несколько изменены его геометрические размеры.

### Основные технические характеристики робота Unimate 2105 G

Количество степеней свободы	5
Точность позиционирования, мм	1
Напряжение, В	380
Частота тока, Гц	50
Мощность, кВА	11,5
Несущая способность суставов:	
при сгибе, Нм	220
при повороте, Нм	90
Максимальные значения скорости:	
радиальная скорость, мм/с	762
вертикальная скорость, град/с	35
скорость вращения, град/с	110
скорость сгиба плеча в суставе, град/с	110
скорость поворота плеча в суставе, град.с	110
Температура, °С	10—50
Влажность воздуха, %	90

Большой интерес с точки зрения повышения эффективности управления ведением рабочего сопла представляет разработка фирмы Putzmeister (ФРГ) [137]. Предложенная ею насадка (рис. 10.51) к роботу обеспечивает равномерное нанесение бетона, за счет жесткого крепления сопла и универсальности выполняемых ею движений. Производительность сопла составляет 20 м<sup>3</sup>/ч,

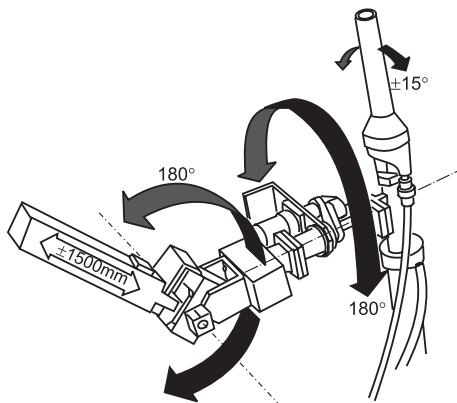


Рис. 10.51. Конструкция насадки для сопла

что, естественно, удовлетворяет самым высоким требованиям к темпам ведения работ.

Торкретбетон находит все большее применение и в других областях строительства: при герметизации котлованов, предназначенных для хранения вредных отходов; при ремонте бетонных свай, мостов, опорных стен, водосливов и т. д.; при герметизации шахт и штолен. В последнее время все большую популярность приобретает торкретбетон со стальным волокном или стальной стружкой. В этом случае можно отказываться от армировки поверхности с обеспечением герметичности бетонной оболочки [94]. Отскок материала при этом также имеет место, но он может быть сведен к минимуму за счет оптимизации управления ведением рабочего сопла. Для определения параметров такой оптимизации на, упомянутом уже выше, испытательном стенде в Бохуме были проведены специальные испытания, программа которых представлена в таблице 10.3.

Таблица 10.3

Параметр		Вариация параметров				
<b>Форма ведения сопла</b>						
Форма	( )					
Скорость движения	(см/с)	10	20	25		
Толщина слоя	(см)	10	5	4		
Расстояние	(м)	0,5 1,0	1,5	2,0	2,5	
Угол	(°)	60	75	90		
<b>Форма собственного движения</b>						
Форма	( )		Маятник	Круг		
Частота	(л/с)	1	3	5		
Амплитуда/Радиус	(см)	5	10	20		

Они должны были дать ответ: в какой степени влияет тот или иной вид движения сопла на пылеобразование, отскок и качество торкретбетона. В качестве изменяемых параметров служили: вид ведения сопла и форма ее собственных движений; расстояние соп-



ла и угол его наклона к обрабатываемой поверхности. Вариация этих параметров лежала не только в зоне доступных для оператора значений, но и в области совершенно недостижимой при ручном управлении. Для реализации программы использовался робот Unimate 2105 G. Во время испытаний, на специально предназначенную для этого панель, наносилось в несколько слоев пробное бетонное покрытие толщиной 25—30 см. В каждом случае строго соблюдалась и постоянно поддерживалась заданная форма перемещения сопла, что было возможно за счет соответствующего программирования системы управления роботом (рис. 10.52).

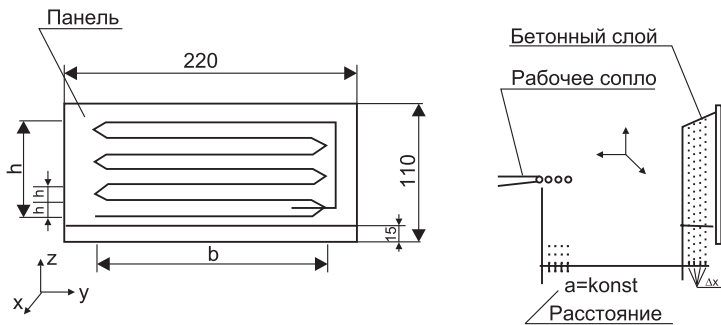


Рис. 10.52. Схема управления движения сопла

Анализ полученных результатов показал значительное влияние характера собственных движений сопла на отскок материала (рис. 10.53). Например, при ее круговых движениях отскок может быть на 20% ниже, по сравнению с жестким креплением сопла. В то же время должны избегаться слишком большие амплитуды и высокая частота вращениям сопла, так как это ведет к перегрузкам узла крепления. Исследования отскока материала, обусловленного расстоянием сопла до обрабатываемой поверхности, позволили установить повышение его до 30% при 0,5 м, по сравнению с минимальным, достигаемым при 1,5 м. Точно на столько же может повышаться отскок при отклонении сопла от строго вертикального положения всего лишь на 15°, что, естественно, очень часто имеет место при ручном управлении.

Анализ влияния характера собственных движений сопла на пылеобразование показал аналогичную зависимость, как и при отскоке. С увеличением расстояния сопла до поверхности уровень пылеобразования снижается.

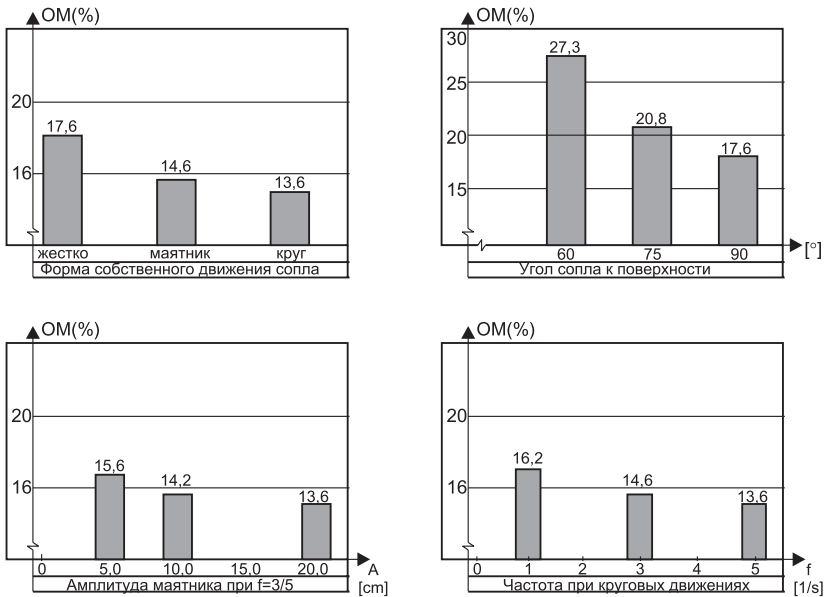


Рис. 10.53. Диаграммы по отскоку материала при торкретировании

Наилучшие показатели по пределу прочности бетона при сжатии достигаются при жестком креплении сопла и при ее строго перпендикулярном положении к поверхности на расстоянии 1,5 м. Наиболее равномерное нанесение торкретбетона возможно при круговых движениях сопла, причем эта тенденция особенно четко прослеживается при повышении частоты и амплитуды вращения.

Строгое поддержание оптимальных значений всех перечисленных параметров возможно за счет высокой динамики устройства для ведения сопла. Это позволяет значительно снизить отскок материала и уровень пылеобразования, повысить качество образующегося бетонного покрытия. Естественно, что вручную сделать это чрезвычайно трудно.

Из краткого анализа полученных результатов можно сделать вывод о высокой практической целесообразности автоматизации и роботизации процесса торкретирования. Следующей ступенью развития является адаптация разработанных роботизированных систем к технологии подземного строительства и органичное включение их в существующие производственные комплексы.

# **Глава 11. Роботизация строительных операций**

## **11.1. Технологические предпосылки и особенности применения средств роботизации в строительстве**

Роботизация технологических операций является важным направлением автоматизации технологических процессов в строительстве. Роботизации строительных работ предшествует тщательный анализ технологических операций и процессов. В ходе анализа должны быть подвергнуты разбору технические, организационные и социальные факторы, а также проведена оценка экономической целесообразности. В первую очередь в ходе обследования оценивается уровень механизации и автоматизации строительных процессов, оценивается уровень сложности операций и выполняется пооперационный их анализ. Результаты пооперационного анализа позволяют предварительно установить уровень сложности роботизируемого процесса и техническую целесообразность использования средств робототехники. Анализ средств технологического оснащения позволяет оценить возможность совместной работы используемого технологического оборудования со средствами роботизации или принять решение о необходимости его замены. При анализе проводится оценка возможности автоматизации отдельных операций на основе традиционных средств механизации и целесообразности использования промышленных роботов. В процессе оценки целесообразности роботизации строительного процесса учитываются возможности максимальной загрузки технологического оборудования и внедряемых средств робототехники, затраты времени на перемещение оборудования в пределах объекта и на другой объект, а также потери времени на монтаж и наладку оборудования. Программирование, эксплуатация и техническое обслуживание средств робототехники требует специальной квалификации, поэтому на стадии анализа роботизируемых строительных процессов следует рассмотреть вопросы структуры кадров и уровня их квалификации.

Оценка экономической целесообразности роботизации отдельных строительных процессов осуществляется на основе анализа за-

трат и расчета их окупаемости. При этом учитывается совместимость внедряемых средств робототехники с другим технологическим оборудованием. Объекты роботизации считаются выбранными, если они обеспечивают экономический эффект. Окончательное решение о целесообразности внедрения средств робототехники лучше принимать на основании экспертных оценок и заключения специалистов о том, что роботизация данных операций или процессов технически и экономически осуществима.

При разработке роботизированной технологии строительного процесса необходимо также изучить проектную документацию зданий и сооружений, где предполагается использование роботов, особенности их конструктивных элементов. Это позволит произвести группировку конструктивных элементов здания по определенным признакам на основе общности конструктивно-технологических особенностей и предоставит возможность точной оценки объемов выполняемых работ. Кроме того, в процессе анализа возможна выработка рекомендаций и предложений по унификации конструктивных элементов здания, повышению их технологичности при роботизации строительных операций. На основе информации, полученной в результате анализов, составляются технические условия на роботизацию технологической операции или процесса. При разработке роботизированного технологического процесса анализируются все особенности и приемы выполнения операций действующего технологического процесса и выбираются те, которые обеспечивают наибольшую производительность и наилучшее качество. Роботизируемый технологический процесс должен иметь или допускать использование автоматической подачи материалов к рабочему месту, оснащение механизированным и автоматизированным инструментом, приспособлениями и оснасткой.

Анализ трудозатрат показал, что наиболее трудоемкими являются малярные и монтажные работы, которые составляют соответственно 25 и 23,5% от общих трудозатрат по строительству наземной части здания. Операции монтажного процесса делятся на две группы: операции монтажного цикла и вспомогательные операции. Операции монтажного цикла связаны с установкой элементов в проектное положение, а вспомогательные операции связаны с закреплением элементов, герметизацией и бетонированием стыков, антикоррозийной защитой закладных деталей, заделкой швов на фасаде здания. Наиболее трудоемкими из перечисленных операций являются операции монтажного цикла, доля которых

превышает 65% общих монтажных трудозатрат. Вспомогательные операции существенно разнородны, относительно не связаны между собой, существенно зависят от конструктивных решений и используемой технологии. Поэтому наибольший интерес представляют основные операции монтажного цикла, включающие захват панели, ее подъем и транспортирование к месту установки, позиционирование и посадку панели на место, выверка планового положения панели и закрепление панели. Эти операции полностью определяют период цикла и составляют 50% всех монтажных трудозатрат. Кроме того, они характеризуются тяжелыми и опасными условиями труда. Исходя из изложенного следует сделать вывод, что роботизация монтажных работ на строительстве зданий и сооружений является первоочередной. При строительстве объектов из сборного железобетона в первую очередь следует решать вопросы автоматизации и роботизации операций строповки и расстроповки, подачи и установки элемента в проектное положение с заданной точностью. Эти задачи в настоящее время вполне решаемы на основе использования кранов-манипуляторов, позиционирующих роботов и специальной монтажной оснастки.

Другой группой строительных операций, представляющих первоочередной интерес для роботизации являются отделочные работы. В первую очередь это относится к малярным и штукатурным работам. Малярные работы отличаются технологичностью, обеспечивающей использование роботов с традиционной структурной организацией. Однако, выполнение указанных работ в отдельных помещениях различного объема предъявляет ряд дополнительных требований к конструктивному исполнению малярных роботов. Они должны обеспечивать удобное перемещение из одного помещения в другое, быструю подготовку к работе на новом месте. Выполнение малярных работ включает ряд технологических операций: очистка поверхности, ее шпатлевка, грунтовка, нанесение окрасочных составов. Поэтому при роботизации малярных работ необходимо предусматривать возможность смены технологического инструмента и подачи различных материалов. Особенностью выполнения названных операций является то, что каждая из них имеет свою особую технологию выполнения. Так технология очистки предусматривает непосредственное взаимодействие рабочего инструмента с поверхностью. Причем это взаимодействие должно выполняться при определенном его нажатии на поверхность. В тоже время такие операции как грунтовка и окрашивание могут

выполняться без непосредственного взаимодействия с поверхностью и рабочий инструмент может находиться на определенном расстоянии от нее. Особенностью малярных работ является разнообразие используемых способов нанесения грунтовочных и окрасочных составов на рабочие поверхности, а также разнообразие схем окраски. Поэтому при роботизации этих работ необходим тщательный анализ технологических процессов малярной отделки зданий выбор рациональных способов и схем окрашивания. При выборе должны учитываться виды и формы поверхностей, их площади, вид используемых окрасочных материалов, требования к фактуре поверхности и др. Технологическими особенностями малярных работ, выполняемых распылением окрасочных составов, является образование в рабочей зоне мелкодисперсной аэрозольной воздушной среды, которая вредна для обслуживающего персонала, а в случае использования лакокрасочным материалов является взрывоопасной. Эти особенности должны учитываться при проектировании малярных роботов и выборе способа управления им. Технологическими предпосылками роботизации в данном случае является наличие методов и средств подготовки и подачи к рабочему инструменту (например краскопульту) грунтовочных и окрасочных материалов. Анализ технологий и оборудования для малярных работ показал, что данный вид работ является наиболее подготовленным для роботизации. Этот вид работ располагает различными агрегатами с автоматическим и дистанционным управлением для подачи и распыления красок, нанесения грунтовок.

В последние годы интенсивно проводятся исследования и разработки по роботизации штукатурных работ. В отличие от малярных работ они отличаются более сложной технологией и использованием в основном ручных методов работы. Большой объем штукатурных работ и их высокая трудоемкость являются хорошими стимулами их роботизации. В настоящее время строительство располагает новыми технологиями для приготовления, подачи и нанесения штукатурного раствора на рабочую поверхность. Разработаны и выпускаются промышленностью специализированные штукатурные станции, обеспечивающие смешивание компонентов, подачу штукатурного раствора к месту выполнения работ, его перемешивание на месте и подачу и набрызг готового раствора. Однако нанесение раствора и перемещения сопла выполняется вручную. Автоматизированные штукатурные станции являются хорошей предпосылкой роботизации штукатурных работ. В по-

следние годы проводятся интенсивные разработки в области совершенствования технологии штукатурных работ, из которых для роботизации работ интерес представляют готовые сухие смеси и средства их механизированной обработки. В современном технологическом процессе выполнения штукатурных работ выделяется три основных рабочих этапа: нанесение штукатурного раствора на поверхность, грубое разравнивание материала в состоянии набора прочности, выравнивание поверхности с выдержкой допустимых отклонений на неровность поверхности, окончательная обработка нанесенной штукатурки и получение желаемой структуры поверхности. Автоматизация штукатурных работ на основе робототехники должна решаться совместно с разработкой новых технологий и комплексного подхода к автоматизации всех рабочих этапов. Особенностью штукатурных работ является разнородность используемых технологий для выполнения отдельных операций. Если для нанесения растворов применяется технология набрызга, то для разравнивания материала и окончательной обработки нанесенной штукатурки используются методы силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Особенностью штукатурных работ также является необходимость провешивания поверхности и выдерживания ее в процессе выполнения работ.

Бетонные работы в жилищном и гражданском строительстве занимают самый большой объем работ, достигающий почти 22%. Поэтому их роботизация представляет огромный интерес. В настоящее время созданы хорошие технологические и технические предпосылки в решении задач роботизации бетонных работ. Разработана и применяется механизированная технология укладки бетона. Созданы средства для транспортирования и подачи бетона к местам его укладки. Дальнейшее совершенствование технологии бетонных работ должно быть направлено на решение задач комплексной механизации и автоматизации всех операций технологического цикла бетонных работ. Учитывая сложность решаемых задач, следует их роботизацию выполнять поэтапно. Основу роботизируемой технологии должны составить трубопроводный способ доставки бетона к месту укладки и использование манипуляционных стрел для его распределения. При роботизации бетонных работ необходимо учитывать ряд технологических особенностей. Среди них в первую очередь должны выполняться требования равномерного распределения бетона в процессе укладки, его уплотнения, сохранения положения закладных деталей и арматурных из-

делий. Технологией выполнения бетонных работ следует предусматривать обход всевозможных препятствий в виде арматурных стержней, рам опалубок и пр. При решении задач роботизации бетонных работ следует учитывать отличительные особенности укладки бетона в опалубочные формы и при заливке площадок различной протяженности.

Определенный интерес для роботизации представляют земляные и свайные работы. Земляные работы являются наиболее трудоемкими, однако здесь широко используются землеройные машины. Основной технологической особенностью землеройных работ является наличие неконтролируемых изменений нагрузки в процессе работы оборудования. Кроме того, технологией выполнения земляных работ предусматривается контроль положения, направлений, уклонов и неровностей выполняемых траншей, котлованов, площадок и других объектов. Это требует использования специальных средств задания направлений, осевых линий и плоскостей. Внедрение роботизированной технологии на этих работах должно быть связано с совершенствованием манипуляционных механизмов экскаваторов, перевода их на интерактивное и супервизорное управление, использования адаптивных законов управления режимами. При решении задач управления группой механизмов должны решаться вопросы синхронизации работы оборудования. Технология выполнения свайных работ предусматривает подачу свай, их позиционирование, забивку до скального грунта или на заданную глубину. Если забивка свай выполняется специальными сваебойными механизмами, то их подача и установка выполняется с помощью средств малой механизации, не позволяющих полностью механизировать и автоматизировать этот вид работ. Перспективным направлением решения задач автоматизации этих работ является роботизация процессов подачи и установки свай в проектное положение. Технологическими особенностями роботизации этих операций являются большие массы объектов роботизации, необходимость внешнего контроля выполнения установочных операций, неодинаковая твердость грунтов в различных местах свайного поля.

Широкие возможности роботизации технологических операций открываются в строительной индустрии. На предприятиях стройиндустрии роботы могут включаться в состав системы технологического оборудования и рассматриваться как элементы комплексной автоматизации технологических линий. При роботизации



процессов в строительной индустрии возникают условия для использования роботов как на основных, так и вспомогательных операциях производственного процесса и работающих во взаимосвязи с другими видами технологического оборудования.

## 11.2. Роботизированные комплексы для выполнения монтажных работ

В последние годы наблюдается значительное увеличение объема монтажных работ. Монтаж современных зданий и сооружений представляет собой сложный комплексный процесс, включающий целый ряд операций: строповку, транспортировку, прием монтируемых элементов и конструкций на рабочем месте, наведение на принятые ориентиры, установку, временное закрепление, приведение в проектное положение, расстроповку и постоянное их закрепление. Особое внимание при монтажных работах уделяется точности установки конструкций и элементов в проектное положение. Допустимые отклонения монтируемых элементов от проектного положения приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

*Допустимые отклонения конструкций от проектного положения, мм*

Отклонение осей:	
фундаментных блоков относительно разбивочных	±10
нижних граней стен и перегородок от установочных	±4
плоскостей стен и перегородок от вертикали	±5
Отклонение отметок:	
верхних опорных поверхностей фундаментов от проектных	±5
опорных поверхностей стен и перегородок в пределах выверяемого участка	16
двух смежных нижних поверхностей и перекрытий	4
верхних поверхностей двух смежных перекрытий	8

На монтажных работах в настоящее время используются краны, различного рода монтажные механизмы, универсальная и специальная технологическая оснастка. Внедряются новые методы и формы технологии и организации, начинают использоваться средства

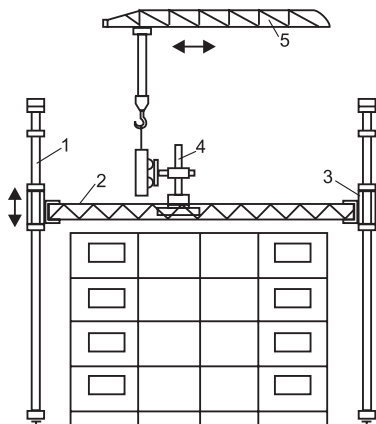
автоматизации как основных, так и вспомогательных операций. Однако, несмотря на это, пятая часть рабочих при монтаже зданий и сооружений выполняет большой объем трудоемкой ручной работы [82]. Больших затрат ручного труда требует проведение таких работ как выверка и установка конструкций в проектное положение, их закрепление, герметизация стыков, замоноличивание швов, перестановка оснастки, вспомогательного оборудования и др.

В результате несовершенства применяемого оборудования и оснастки трудоемкость монтажных операций остается очень высокой. Используемые башенные краны выполняют лишь подъемно-транспортные операции. Окончательная выверка монтируемых конструкций в большинстве случаев выполняется вручную. Монтаж одной стеновой панели жилого крупнопанельного дома занимает в среднем до 15 мин. Процесс монтажа строительных конструкций во многих случаях осложняется ограниченностью обзора машинистом крана монтажного горизонта, что снижает эффективность монтажа. Решение задач комплексной механизации и автоматизации монтажных работ сдерживается из-за их сложности. Она обусловлена большими габаритами и массой монтируемых конструкций, их разнотипностью, большими размерами монтажных зон, влиянием ветровых и других климатических факторов. Кроме того, при производстве монтажных работ должно происходить постоянное перемещение монтажных средств по фронту работ.

Повышение эффективности монтажа зданий и сооружений становится важнейшей задачей сегодняшнего дня. В этом направлении во многих странах ведутся исследования и разработки, позволившие получить положительные результаты. Разработаны и внедрены в строительных организациях новые методы монтажа, проведены значительные работы по повышению монтажной технологичности сборных конструкций. На строительных площадках все шире начинают использоваться строительные краны с дистанционным управлением и повышенным уровнем автоматизации. На монтажных работах промышленных объектов находят применение башенные краны с программным управлением [82]. Разработаны и выпускаются новые конструкции строительных кранов с телескопическими стрелами, выносными гидравлическими опорами, перемещающейся вдоль башни стрелой, со стабилизационными платформами и др. Большое внимание уделяется созданию и внедрению автоматических и полуавтоматических грузозахватных устройств и траверс. В последние годы разработаны траверсы,

обеспечивающие ориентацию монтируемых элементов в пространстве при гибкой системе подвеса, а также захватные устройства с дистанционной и автоматической расстроповкой. Имеется опыт использования специализированных кондукторов и монтажных машин для установки колонн, стеновых панелей и других строительных конструкций.

Анализ методов и средств выполнения монтажных работ показывает, что успешное решение задач их комплексной механизации и автоматизации связано с разработкой и внедрением методов принудительной установки и ориентирования монтируемых элементов в проектное положение, основанных на достижениях робототехники. Использование строительно-монтажных манипуляторов и роботов совместно с внедрением высокотехнологичных сборных элементов зданий и сооружений позволяет создать автоматизированные монтажные комплексы, исключая ручной труд при строповке, ориентировании, установке, фиксации и расстроповке монтируемых элементов. Прототипом монтажных РТК следует рассматривать различного вида автоматизированные кондукторы и монтажные машины. Для автоматической выверки колонн многоэтажных промышленных и гражданских зданий разработан ряд кондукторов, многие из которых представляют собой манипуляционные механизмы, снабженные специальными захватами. Попытки автоматизации монтажа жилых зданий привели к разработке кондукторов, обеспечивающих выверку и временное закрепление стеновых панелей. Эти устройства представляют металлоемкую пространственную конструкцию с установленными на ней захватами. Для решения задач роботизации монтажных операций полезным является опыт создания трафаретных кондукторов (рис. 11.1). Их основу составляет кондукторная рама, которая с помощью гидродомкратов перемещается по вертикальным трубчатым стойкам. В раме устроены проемы для панелей и установлены механизмы с гидротолкателями для фиксации и ориентации панелей. Установка на раме монтажного манипулятора с телескопической штангой, оснащенной захватами, перемещающегося вдоль и поперек рамы, позволяет роботизировать процесс монтажа крупнопанельных жилых зданий. Несмотря на громоздкость и высокую металлоемкость, подобного рода конструкций, они служат хорошей базой для поиска новых принципов роботизации монтажных операций.



*Рис. 11.1. Трафаретный кондуктор с манипулятором для монтажа зданий*

*1 — опорная стойка; 2 — рама кондуктора; 3 — подъемный механизм; 4 — манипулятор; 5 — стрела крана*

Другим направлением роботизации монтажных работ является разработка на базе башенных кранов специализированных кранов-манипуляторов [84]. Интересное конструктивное решение имеют краны, снабженные специальными управляемыми грузозахватными траверсами-манипуляторами с пространственной подвеской, которые обеспечивают стабильность положения монтируемых элементов независимо от ветровых нагрузок и высокую точность их монтажа. Такие краны могут иметь программно-дистанционное управление. Все операции могут выполняться автоматически или оператором в режиме дистанционного управления. Пространственная подвеска манипулятора обеспечивает точную посадку панелей в замки, а поворотный манипулятор — подачу деталей в зону монтажа в нужном для установки положении. Оригинальное техническое решение имеет башенный кран новой конструкции, представленный на рис. 11.2, который позволяет сократить в 1,5 раза продолжительность монтажа крупнопанельных зданий и повысить качество работ. Его отличительной особенностью является наличие манипулятора и поворотно-передаточного устройства. Манипулятор установлен на основной стреле. Кран снабжен вспомогательной неподвижной стрелой (подстрелкой) с перемещающейся по ней кареткой. Поворотно-передаточное устройство выполняет функции магазинного устройства и представляет собой

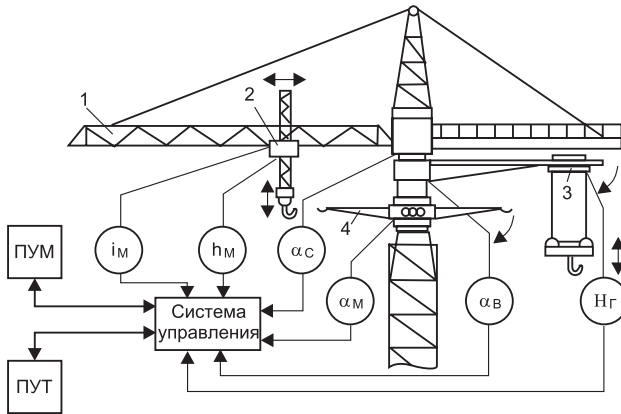


Рис. 11.2. Монтажный кран с манипулятором  
 1 — основная стрела; 2 — манипулятор; 3 — вспомогательная стрела; 4 — поворотно-передаточное устройство

кольцевую раму с шестью парами кронштейнов для подвешивания к ним специальных траверс с элементами. Конструкция этого крана позволяет выполнять одновременно операции по подъему одних элементов и установке в проектное положение других. Элементы, поступившие на строительную площадку, разгружают с помощью вспомогательной стрелы и подают ее в магазинное устройство, где их навешивают на кронштейны.

Манипулятор берет из магазинного устройства необходимый для монтажа элемент, транспортирует его вдоль основной стрелы к месту установки, затем ориентирует его в заданное положение и производит установку на место. Управление таким монтажным краном осуществляется с выносных пультов управления, один из которых находится у монтажника, а другой у такелажника. Для обеспечения автоматического или полуавтоматического режима работы на кране устанавливается группа датчиков положения, измеряющих линейные перемещения монтажного манипулятора  $l_m$ ,  $h_m$ , угловые перемещения основной и вспомогательной стрелы  $\alpha_c$ ,  $\alpha_b$ , магазинного устройства  $\alpha_m$  и положение груза по высоте на крюке вспомогательной стрелы  $h_g$ . Выходные сигналы датчиков подаются в систему управления краном, которая управляет работой механизмов в соответствии с заложенной программой и поступающими командами с пультов управления ПУМ и ПУТ. Громоздкость конструкции, высокая подвижность крана, невысокая точ-

ность монтажа ограничили практическое использование таких кранов.

Перспективным направлением автоматизации монтажных операций следует считать создание автоматических монтажных механизмов с оучувствлением. В этом направлении накоплен определенный опыт. В частности были предприняты попытки создания монтажного крана с автоматическим управлением и органами оучувствления, которые позволяют устанавливать монтируемый элемент в зависимости от положения ранее установленной конструкции. Однако такая конструкция не нашла практического использования в виду накопления погрешностей монтажа из-за неточности установки предыдущих элементов. При монтажных работах находят применение краны-манипуляторы с шарнирно-рычажными телескопическими стрелами (рис. 11.3) [108]. Многозвенное телескопическое оборудование с вращательными парами и набором рабочих самозахватывающих органов дает возможность выполнять целый комплекс монтажных операций. Для роботизации строительно-монтажных работ представляет интерес предложенный метод двухстадийного монтажа элементов. На первой стадии строительные конструкции подаются краном в расширенную зону допусков, а на второй их выверяют путем самоустановки и самофиксации. При этом требуемая точность подачи элементов не превышает 30 мм. Однако такая схема монтажа требует повышенной точности изготовления монтируемых конструкций.

Для механизации процесса возведения стен из асбестоцементных экструзионных панелей институтом ЦНИИОМТП предложен мобильный манипулятор, установленный на самоходном шасси (рис. 11.4). Для обеспечения необходимой устойчивости манипулятора в процессе монтажа его ходовая часть снабжена выносными гидроопорами с дистанционным управлением. Манипулятор снаб-

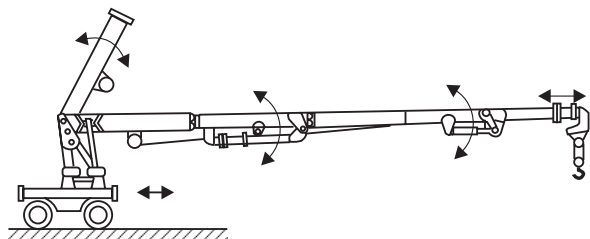


Рис. 11.3. Кран-манипулятор с шарнирно-телескопической стрелой

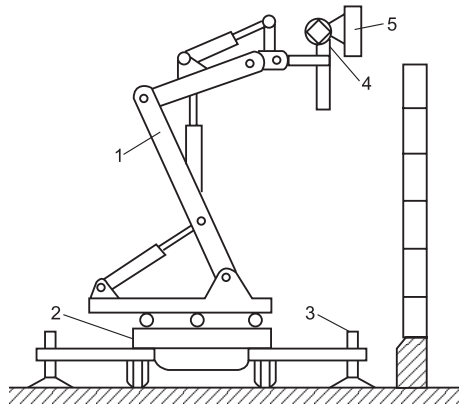


Рис. 11.4. Схема монтажа стен горизонтальной разрезки из ПАЗ с использованием манипулятора

1 — трехзвенный манипулятор; 2 — самоходное шасси;  
3 — гидроопоры; 4 — рабочий орган; 5 — панель

жен сменными захватами в виде вакуумных присосок и механических зажимов. Процесс установки панели включает несколько операций: ориентацию захватного устройства относительно панели, фиксацию панели в захватном устройстве, перемещение ее к месту установки, закрепление панели в проектном положении. Применение манипулятора для монтажа панелей ПАЗ позволяет повысить производительность труда в 1,5 раза, исключить тяжелые ручные операции.

Определенный опыт использования манипуляторов и роботов на строительно-монтажных работах накоплен в зарубежных странах. В Японии, Германии, США и других странах созданы манипуляторы, предназначенные для монтажа навесных элементов, колонн, инженерных коммуникаций. В Японии разработана роботизированная система для подъема и спуска элементов при монтаже высотных строительных объектов [95]. Подъемные устройства оснащены гидроприводами, а управление ими осуществляется от микроЭВМ. Использование роботов на монтажных работах позволяет значительно сократить трудозатраты и время выполнения операций. В Германии для транспортировки и монтажа ограждающих конструкций разработан грузоподъемный манипулятор на базе мостового крана с двумя грузовыми тележками. На тросовой подвеске тележек закреплена балка с двумя управляемыми захватами [91]. Манипулятор захватывает ограждающие конструкции за

монтажные петли. Все операции выполняются в полуавтоматическом режиме.

При монтаже тяжелых и крупногабаритных элементов целесообразно применять роботы, работающие совместно с краном (рис. 11.5). При этом монтажный робот должен иметь согласованное с краном управление, которое выполняется одним оператором с портативного пульта. При этом для обмена информацией между системой управления и пультом оператора может использоваться инфракрасный или радиоканал связи. Аппаратура управления роботом и станция управления краном объединяются модулем синхронизации, обеспечивающим прием команд управления и синхронизацию работы оборудования при их исполнении

Анализ достижения в области технологии, механизации и автоматизации строительно-монтажных работ и прогнозов развития строительной робототехники позволяет определить наиболее перспективные для роботизации виды строительно-монтажных работ и операций. К ним следует отнести монтаж перегородок из различ-

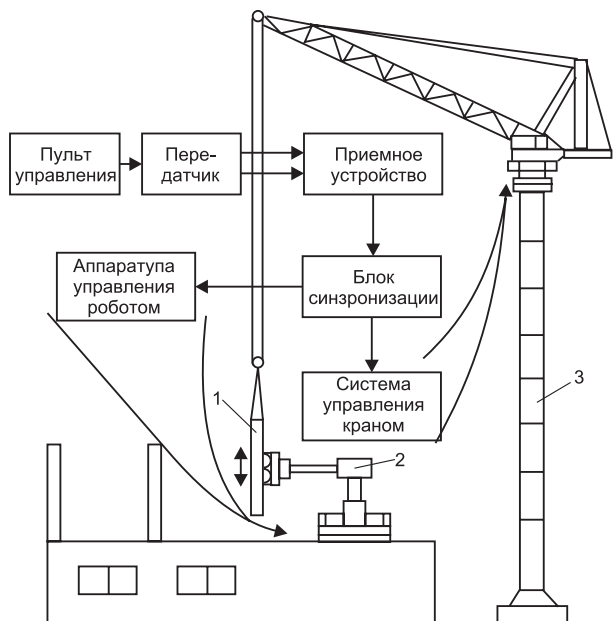


Рис. 11.5. Установка железобетонных колонн с помощью робота  
1 — колонна; 2 — робот; 3 — башенный кран



ных материалов, монтаж каркасов зданий, укладку лестничных маршей и перекрытий, разборку конструкций зданий при реконструкции, монтаж и демонтаж строительных лесов, монтаж инженерного оборудования зданий и сооружений. Для монтажа перегородок внутри здания из блочных и листовых материалов экономически оправдано применение передвижных манипуляторов с дистанционным и интерактивным управлением. В качестве основания таких манипуляторов целесообразно использовать мини-шасси на пневмоколесном и гусеничном ходу или применять платформы на воздушной пленке.

Перспективным направлением является решение задач автоматизации монтажа крупнопанельных зданий на основе создания роботизированных монтажных комплексов с программным и адаптивным управлением. На рис. 11.6 приведена схема роботизированного комплекса для монтажа панелей наружных и внутренних стен и перекрытий жилых зданий. В состав комплекса входит башенный кран, специализированный монтажный робот и растворная станция. Такой комплекс обеспечит автоматизацию всех основных операций: подъем и подачу панелей к месту монтажа, устройство растворной постели, выверку и установку панелей, герметизацию швов. При разработке таких комплексов одновре-

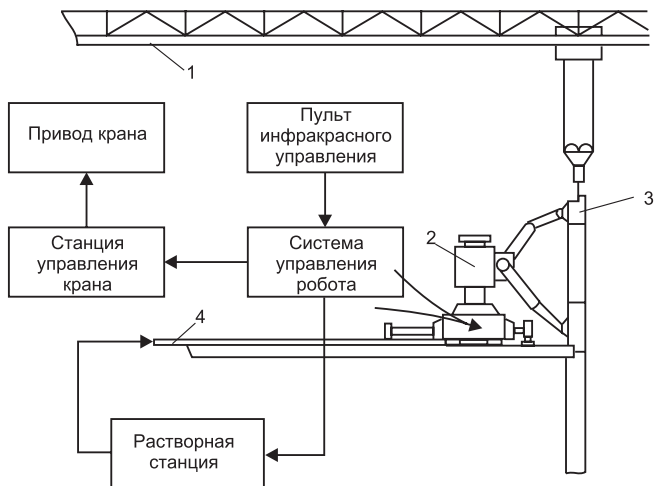
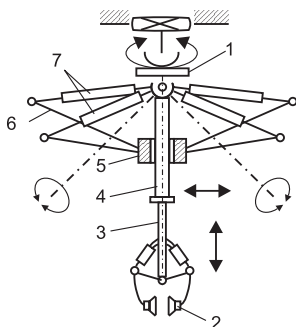


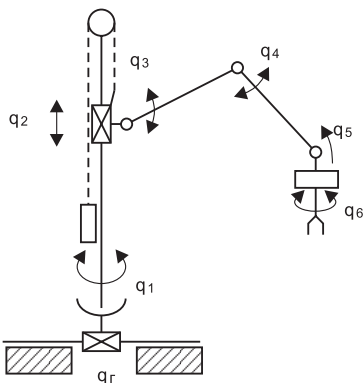
Рис. 11.6. Роботизированный комплекс для монтажа зданий  
1 — стрела башенного крана; 2 — монтажный робот; 3 — стенная панель; 4 — растворопровод

менно должны совершенствоваться способы фиксации панелей, а также конструкция и технология герметизации швов. Монтажный робот размещается на подвижной платформе с выдвижными опорными консолями. Один из манипуляторов комплекса служит для ориентации и установки монтируемых конструкций, второй обеспечивает подготовку поверхности и герметизацию швов. Управление работой всех механизмов комплекса, в том числе и башенного крана, осуществляется с пульта дистанционного управления и от микроЭВМ системы управления робота.

Рядом российских исследовательских центров (МГСУ, ВНИИСтройдормаш, ЦНИИОМТП) ведутся работы по разработке кранов-манипуляторов с различными типами связей для монтажа строительных элементов зданий. В зависимости от конкретного назначения в них использованы жесткие, гибкие и комбинированные связи. Некоторые конструкции, с целью обеспечения необходимой точности позиционирования, снабжены устройством для временного опирания ориентирующего органа на перекрытия рабочего горизонта [73]. Особенностью этих конструкций является использование специальных грузозахватных приспособлений с несколькими степенями подвижности, обеспечивающих точную ориентацию монтируемых элементов (рис. 11.7). Эти устройства обеспечивают корректировку угловых положений монтируемой конструкции в двух плоскостях, разворот относительно вертикальной оси и ее вертикальную посадку. Из предложенных схем кранов-манипуляторов выделим наиболее перспективный вариант, который представлен на рис. 11.8.



*Рис. 11.7. Грузозахватное ориентирующее устройство  
1 — ориентирующий орган; 2 — схват; 3 — шток; 4 — силовой цилиндр; 5 — ползун; 6 — тяги; 7 — гидроцилиндры*



*Рис. 11.8. Перспективный вариант крана-манипулятора для монтажных работ*

Такая схема, благодаря жестким связям между звеньями, имеет меньшую погрешность позиционирования. Тросовая подвеска противовеса не влияет на точность манипулятора, а его использование позволяет снизить мощность привода. Кроме того, данная схема с вращательными кинематическими парами обладает большей маневренностью и может использоваться для монтажа различных строительных конструкций. Приведенный кран-манипулятор имеет шесть региональных степеней подвижности, отвечающие непосредственно за доставку монтируемого элемента в зону монтажа и установку в проектное положение и одну глобальную. Глобальная степень подвижности представляет собой рельсовый ход. Эта степень подвижности участвует только при межоперационных перемещениях, например при смене места монтажа. Для нее задаются несколько точек позиционирования, в которых будет находиться манипулятор во время монтажа. Обычно этих точек столько же, сколько захваток в строящемся здании. Пятая и шестая степени подвижности отвечают за локальную установку панели в зоне монтажа. Пятая степень подвижности обеспечивает совмещение вертикальной оси панели с вертикалью в плоскости панели, а шестая служит для совмещения горизонтальной оси панели с горизонтальной осью. Требуется еще выставить вертикальную ось панели в плоскости перпендикулярной плоскости панели и выставить горизонтальную ось панели в плоскости панели. Но при точном изготовлении панели, она сама принимает желаемое положение под действием собственного веса.

Для построения монтажных РТК представляют интерес краны-манипуляторы с ориентирующим устройством, связанным со стрелой пространственной канатной подвеской. Применение пространственной канатной подвески позволяет избавиться от крутильных колебаний, возникающих в обычной системе (рис. 11.9). Пространственная подвеска с канатами, натянутыми силой веса подвешенных масс, воспринимает полную пространственную систему нагрузок как жесткая связь. Несмотря на несовершенство, сложность и громоздкость предлагаемых устройств, отдельные их решения безусловно заслуживают внимания и могут быть использованы при разработке современных монтажных роботов и РТК с адаптивным управлением.

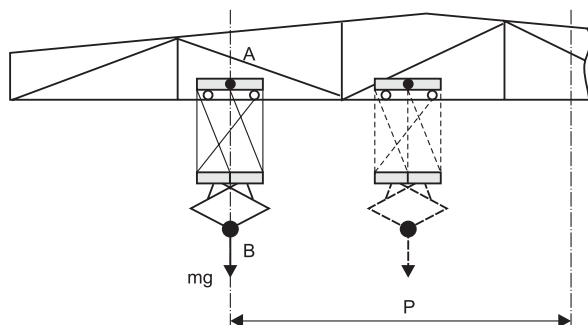


Рис. 11.9. Ориентирующее устройство с пространственной подвеской

В ходе выполнения монтажных операций требуется задание разбивочных осей и постоянный контроль положения строительных элементов и конструкций. Одним из наиболее перспективных методов задания в пространстве базовых осей при выполнении монтажных работ является использование коллимированного лазерного луча. Применение лазерных приборов позволяет не только обеспечить непрерывный визуальный контроль при установке строительных конструкций, но и автоматизировать их ориентирование. Лазерный прибор и системы контроля могут эффективно использоваться при монтаже ленточных фундаментов, стеновых панелей, перегородок, подвесных потолков, колонн, подкрановых путей. Основу этих приборов и систем составляет лазер, излучающий монохроматический, узконаправленный световой луч. Для автоматического контроля используются специальные фотоприемные измерительные устройства, позволяющие определять направ-

ление и величину отклонения монтируемых элементов от проектной оси, задаваемой лазерным лучом [100]. Принцип действия автоматических устройств для измерения отклонений строительных конструкций относительно лазерного луча представлен на рис. 11.10. Фотоприемное устройство, закрепленное на монтируемом элементе, состоит из оптической матрицы с фотодиодами. Матрица составлена из собирающих линз, которые разделяют световой поток на соответствующие фотодиоды. Последние преобразуют световой поток в электрические сигналы, которые попарно сравниваются относительно вертикальной и горизонтальной осей.

Перспективным направлением автоматизации процесса контроля выполнения монтажных операций является использование матричных фотодиодных панелей, которые в сочетании с микроэлектронными устройствами обработки информации позволяют с высокой точностью регистрировать положение строительных конструкций и выдавать управляющие сигналы исполнительным механизмам.

При монтаже фундаментов, установке колонн и панелей лазерными приборами задаются разбивочные оси основных конструк-

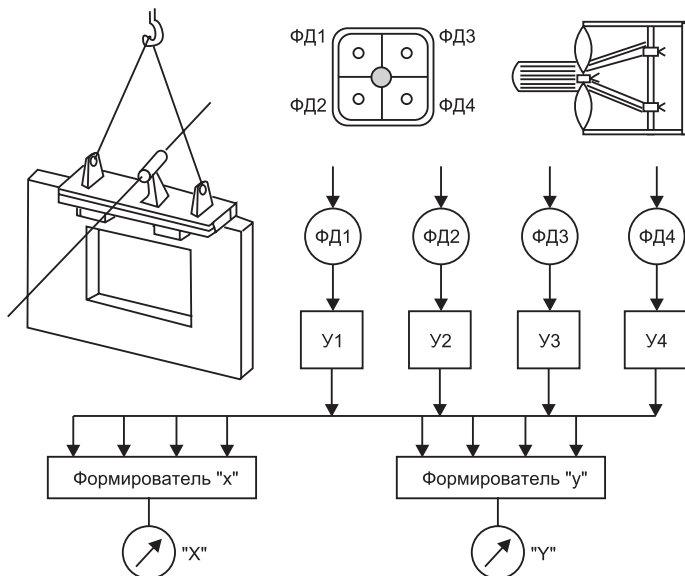


Рис. 11.10. Фотоэлектрическое устройство контроля положения монтируемых строительных конструкций

тивных частей здания. Используя отклоняющие устройства, эти оси в процессе работы переносятся на монтажные горизонты. Монтажные краны в этом случае снабжаются специальными траверсами с жестким захватом строительных конструкций. На траверсы устанавливаются фотоприемные устройства, регистрирующие положение монтируемых элементов относительно проектных осей, задаваемых лазерным лучом. При автоматизации установки панелей в проектное положение сигналы с фотодетекторов, пропорциональные величине отклонения, передаются в систему управления монтажным оборудованием.

### **11.3. Роботизация производства бетонных работ**

Современное строительство характеризуется большими объемами выполнения бетонных работ. Объемы использования монолитного бетона и железобетона составляют свыше 130 млн. м<sup>3</sup> и продолжают увеличиваться. Около 80% объема монолитного бетона используются в промышленном строительстве в первую очередь для возведения конструкции подземных частей зданий и сооружений и фундаментов под технологическое оборудование. Монолитный бетон и железобетон широко применяют для возведения дымовых труб, градирен, силосов, тяжелых колонн, различных резервуаров, энергетических объектов, подпорных стенок, сложных арочных и сводчатых покрытий. Монолитный бетон и железобетон используется для устройства полов, подъездных дорог. Возрастает интерес к монолитным бетонным и железобетонным конструкциям в гражданском строительстве. Монолитные конструкции применяют для строительства высотных зданий общественного назначения и жилых многоэтажных домов. Из монолитного железобетона возводят здания повышенной этажности, характеризующиеся сложными, выразительными по форме планами и сочетаниями объемов. Эффективен монолитный бетон при строительстве в районах с повышенной сейсмичностью.

Главным направлением повышения эффективности бетонных работ является индустриализация заготовительных процессов, широкомасштабное внедрение комплексной механизации и автоматизации на основе использования достижений робототехники и микропроцессорной техники.

Возведение конструкций из монолитного бетона и железобетона включает комплекс работ, который состоит из заготовительных, транспортных и монтажно-укладочных операций. Направления развития технологии бетонных работ предусматривают первоочередное решение задач комплексной механизации подачи, распределения и укладки бетонной смеси. На строительных площадках требуются машины и оборудование, которые бы выполняли непрерывную подачу и укладку бетонной смеси в конструкции и обеспечивали бы заданный темп бетонирования. Причем места укладки бетона могут располагаться как ниже нулевой отметки, так и на значительной высоте от нее. Они могут иметь значительные габариты и объемы. Сократить трудоемкость подачи и укладки бетонной смеси, устранить тяжелый ручной труд и повысить производительность труда позволяет использование бетононасосов, трубопроводного транспорта, специальных бетоноукладчиков, бетоноукладочных стрел-манипуляторов и роботов. Особенно они эффективны при бетонировании больших площадей и возведении монолитных железобетонных зданий. Шарнирно-распределительные стрелы представляют собой манипуляторы с бетонопроводами, имеющие ручное, дистанционное или программное управление. Они монтируются на автобетононасосах, поворотных платформах, временных и стационарных опорах, башенных кранах.

Наибольшее применение на строительных площадках находит автобетононасос с шарнирно-распределительной стрелой. На рис. 11.11 показан автобетононасос, оборудованный стрелой-манипулятором с гидравлическим управлением [132]. Стрела автобетононасоса состоит из шарнирно-сочленяемых секций, по которым проходит бетонопровод, оканчивающийся гибким рукавом. Стрела-манипулятор имеет от 3 до 5 секций. Такой манипулятор позво-

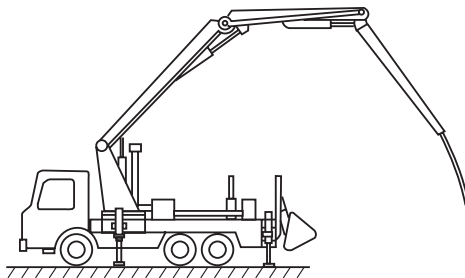


Рис. 11.11. Автобетононасос с шарнирно-распределенной стрелой

ляет с одной стоянки машины подавать бетонную смесь на высоту до 22 м в любую точку бетонируемой конструкции в радиусе до 20 м.

Управление положением стрелы ведется машинистом с пульта, расположенного на машине. Некоторые автобетононасосы с шарнирно-распределенной стрелой оснащены системой радиуправления, позволяющее оператору управлять перемещением стрелы с места укладки бетона. Перевод манипулятора из рабочего в транспортное положение занимает 20—30 мин. Это дает возможность рационально использовать установку на многих объектах. Практика применения автобетононасосов со стрелами-манипуляторами показала их высокую эффективность. Внедрение этого оборудования на объектах с рассредоточенными объемами бетонных работ позволяет устранить трудоемкие операции по укладке бетонной смеси, избавить рабочих от больших затрат физического труда, грязной и вредной работы.

Высокие экономические показатели дает использование стрел-манипуляторов при возведении высотных монолитных зданий и сооружений с помощью переставных и скользящих опалубок. В этом случае на рабочем полу опалубки устанавливается опорная башня с поворотной платформой, на которой монтируется стрела-манипулятор с бетонопроводом (рис. 11.9) [75]. Бетонопровод стрелы через вертикальный трубопровод соединяется с

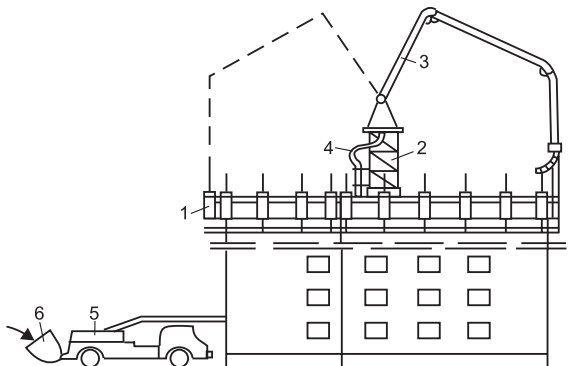


Рис. 11.12. Подача бетонной смеси манипулятором при возведении монолитных зданий

- 1 — скользящая опалубка; 2 — опорная башня;  
3 — стрела-манипулятор; 4 — бетонопровод; 5 — автобетононасос;  
6 — приемный бункер

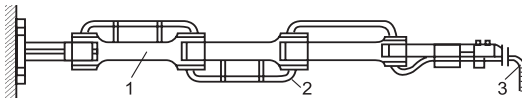


автобетононасосом, располагаемым у основания сооружения. Применение манипуляторов для укладки бетонной смеси в монолитном строительстве позволяет исключить ручной труд и автоматизировать этот процесс. Особенно перспективны манипуляторы при бетонировании в скользящей опалубке.

В этом случае можно создать роботизированные скользящие комплексы, обеспечивающие автоматизированную укладку бетонной смеси, ее уплотнение, установку арматуры и управление подъемом опалубки. Создание таких комплексов дело ближайшего будущего. Они дадут возможность значительно расширить объем монолитного строительства и снизить его себестоимость.

Шарнирно распределительные стрелы нашли широкое распространение за рубежом [95]. Они имеют до пяти секций общей длиной до 32 м и выпускаются в комплекте с бетононасосами в стационарном или в съемном вариантах. Ведущими производителями такого оборудования являются Германия и Япония. В Японии разработан робот для горизонтального распределения бетонной смеси в опалубки [127]. Он укрепляется с помощью держателей на временной или постоянной опоре (рис. 11.13). Манипулятор робота состоит из четырех звеньев коробчатой формы. В местах сочленений звеньев установлены пластмассовые подшипники. Каждое звено поворачивается с помощью гидравлических двигателей. Для улучшения операций укладки бетонной смеси центры вращения звеньев расположены немного эксцентрично по отношению к осям. На переднем звене манипулятора установлен привод для перемещения гибкого рукава в вертикальной плоскости (вверх-вниз), что позволяет легко избегать в процессе бетонирования торчащей арматуры и других препятствий. Для транспортировки бетонной смеси на звеньях манипулятора укреплены трубы диаметром 125 мм, имеющие разъемные соединения. На последнем звене установлен гибкий рукав, соединенный с бетонопроводом. Пульт управления выполнен подвижным и установлен на четвертом звене. Предусмотрено также дистанционное управление роботом. Гидравлический привод обычно размещается на первом звене и обеспечивает плавное перемещение звеньев. Манипулятор снабжается вибраторами для уплотнения бетонной смеси или инструментом для отделочных работ. Масса дополнительной оснастки может достигать 100 кг. В целях безопасности работ на каждом звене манипулятора установлены мигающие сигнальные лампы и звуковые зуммеры, которые начинают работать при включении

работа. Четырехсекционная распределительная стрела манипулятора обеспечивает охват рабочей площади до 990 м<sup>2</sup>. Максимальная скорость движения рабочего органа при вращении любого звена не превышает 1 м/с. Время монтажа робота на объекте составляет около 1 ч. Робот может работать с производительностью подачи бетонной смеси до 170 м<sup>3</sup>/ч. Применение описанного робота на строительстве ряда административных зданий и промышленных объектов с большим объемом бетонных работ позволило исключить тяжелую работу по укладке и уплотнению бетонной смеси, уменьшить число рабочих, занятых на этих операциях, и повысить качество получаемых железобетонных конструкций.



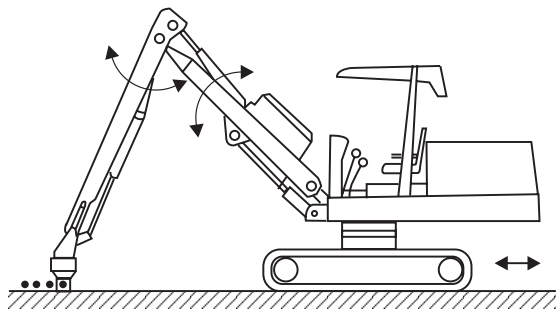
*Рис. 11.13. Манипулятор для горизонтальной укладки бетона  
1 — звенья манипулятора; 2 — бетонопровод; 3 — гибкий рукав*

Представляет интерес предложенная в Японии система подачи и распределения бетона, состоящая из башенного крана и манипулятора, управляемого одним оператором. Схема исполнительного устройства крана-манипулятора обеспечивает управляемое пространственно ориентирование и позиционирование с заданной точностью. Для этого исполнительное устройство в отличие от традиционных строительных кранов построено по жесткой кинематической схеме.

При производстве бетонных работ на строительных площадках приходится выполнять большой объем ручных операций, связанных с установкой арматуры. Несмотря на применение унифицированных арматурных изделий, их установка характеризуется большой трудоемкостью. Повысить производительность труда и исключить тяжелый ручной труд позволяет применение манипуляторов и робототехнических устройств с комплектом сменных рабочих органов для установки и сварки арматурных сеток.

Автоматизированную укладку тяжелых стержней арматуры обеспечивает робот, разработанный и внедренный в Японии (рис. 11.14). Он выполнен на базе гидравлического экскаватора и снабжен бортовой микроЭВМ. Его эффективно использовать в промышленном строительстве при укладке большого числа стержней арматуры массой до 100 кг. Применение робота в данном слу-

чае значительно сокращает сроки ведения работ, улучшает условия труда и сокращает число рабочих. Система управления машиной предусматривает три режима работы: непосредственное управление из кабины, дистанционное управление с выносного пульта и автоматизированное. Программа управления роботом позволяет автоматически раскладывать крупноразмерные стержни арматуры с фиксированным шагом, устанавливаемым оператором.



*Рис. 11.14. Робот для укладки сварки арматурных стержней*

В Японии на строительных площадках нашла применение робототехническая система для чистовой затирки и шлифовки бетонных полов (рис. 11.15). Она является многофункциональным устройством, которое выполняет движение по незастывшему бетону, производит выравнивание уложенного бетона, нанесение настилки, а также выполняет циклевку и окончательную отделку полов. Система представляет собой мобильный строительный робот, имеющий колесное шасси, двухзвенную руку с рабочим инструментом для обработки пола. Диаметр актуатора 102 см. Система работает в автоматическом режиме по программе, в которой задаются требования к геометрическим параметрам обрабатываемой поверхности пола, а также маршрут и скорость перемещений. Для управления движением применяют гидрокомпас, путеизмерительное устройство с сенсорными датчиками обнаружения проема и касания боковой поверхности. Система управления на базе микроЭВМ обеспечивает автономное движение при управлении от бортовой навигационной системы по данным гидрокомпаса и локатора. Скорость перемещения машины изменяется от 0 до 12 м/мин, а ее производительность составляет 200—300 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности в 1 ч.

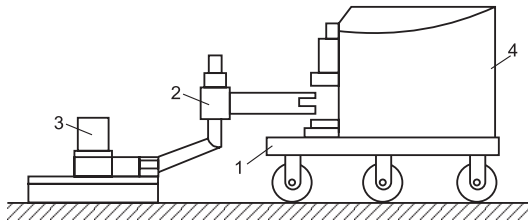


Рис. 11.15. Робототехническая система для чистовой обработки полов

1 — шасси; 2 — манипулятор; 3 — рабочий инструмент;

Перспективным направлением использования средств робототехники является набрызг-бетонирование. В Норвегии распространение получил роботизированный комплекс для набрызга бетонирования обводненными бетонными смесями. Исполнительное оборудование, управляемое роботами, обеспечивает производительность до  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при этом осыпь составляет 5—10%. Насосное и распределительное оборудование монтируется на шасси или на самоходных тележках, а бетонная смесь поступает из автобетоносмесителя. Процессом набрызг-бетонирования управляет оператор.

Анализ отечественного и зарубежного опыта роботизации бетонных работ показывает, что в первую очередь необходимо обеспечить широкое внедрение на строительных объектах манипуляторов и РТК, обеспечивающих подачу, распределение и укладку бетонной смеси. Эти комплексы должны быть мобильны, иметь программное и дистанционное управление. Целесообразно создать 3—4 типоразмерных группы такого оборудования, отличающихся производительностью, высотой подачи, зоной обслуживания. Это оборудование обеспечит комплексную механизацию и автоматизированное управление укладкой и уплотнением бетонных смесей при устройстве фундаментов, бетонных полов, монолитных перекрытий, стен и колонн. Кроме того, необходимо создать комплекс оборудования в стационарном, исполнении для установки на перекрытиях возводимых объектов и на рабочих площадках опалубок. Перспективными следует считать работы по созданию роботизированных скользящих комплексов для строительства монолитных железобетонных зданий и сооружений. Целесообразно внедрять манипуляторы для установки арматурных каркасов, сборки и разборки опалубок.

## 11.4. Роботы и роботизированные комплексы для штукатурных работ

Штукатурные работы относятся к числу наиболее трудоемких строительных процессов. Несмотря на развитие средств механизации, объем ручных операций на штукатурных работах остается значительным и превышает 60%. Кроме того, выполнения этих работ связано с повышенной влажностью, распылением раствора, вибрацией, что делает этот вид работ мало привлекательным и вредным для здоровья. В связи с этим во многих странах проводятся работы по механизации и автоматизации штукатурных операций, связанных с нанесением штукатурных растворов на поверхность, их разравниванием и затиркой. Одним из перспективных направлений решения этих задач является использования средств робототехники.

Одним из первых применений манипулятора для штукатурных работ является создание в Белоруссии специального многофункционального манипулятора для штукатурных работ (рис. 11.16). Манипулятор выполнен на трехколесном шасси, на котором смонтированы несущая стойка, привод и блок управления [136]. Вдоль стойки перемещается щит, закрепленный на ползуне, передвигаемом электроприводом. В рабочем положении манипулятор раскрепляется в распор между полом и потолком. При выполнении штукатурных работ у стены монтируют инвентарные маяки, по которым устанавливают плоскость щита манипулятора. Между щитом и стеной образуется полость, куда закачивается раствор. После его схватывания щит отводится от стены и электроприводом поднимается вдоль вертикальной стойки на шаг, равный высоте щита, и вновь прижимается к маякам. После оштукатуривания первой захватки устройство передвигают вдоль стены на ширину щита и процесс повторяется. Манипулятор снабжен цикловой системой управления, которая обеспечивает дистанционное и автоматическое управление в зоне рабочей захватки. Система управления позволяет обеспечить автоматический скользящий режим работы, при котором щит непрерывно перемещается по маякам и непрерывно подается раствор. Несмотря на невысокое качество оштукатуренных поверхностей, испытания показали принципиальную возможность автоматизации штукатурных операций на основе использования достижений робототехники. Они позволили определить основные направления роботизации штукатурных работ.

В первую очередь это относится к технологии разравнивания и затирки штукатурного слоя. Рабочая оснастка на этих операциях должна обеспечивать сложные поступательно-вращательные движения. Японской фирмой «Симидзу кэнцэцу» разрабатывается технология штукатурных работ с помощью роботизированной установки. Она включает ходовой агрегат, который обеспечивает передвижение в пределах перемещения с автоматическим обходом простенков, колонн и препятствий. Использование этой установки на затирке цементной стяжки показало достаточно высокое качество обработанной поверхности и хорошую производительность. Роботизированной установкой было обработано около 10 тыс. м<sup>2</sup> поверхностей. С середины 80-х годов прошлого века разработки в области роботизации штукатурных работ ведутся рядом научных центров России: ЦНИИОМТП, ВНИИСтройдормаш, Новочеркасский политехнический институт (ныне Южно-Российский государственный технический университет) и др. Этими организациями проведена большая работа по разработке требований к штукатурным роботам и манипуляторам, технологических схем производства работ и проработке конструктивных решений.

Анализ технологии штукатурных работ, средств их механизации, а также выполненные технические и экспериментальные ра-

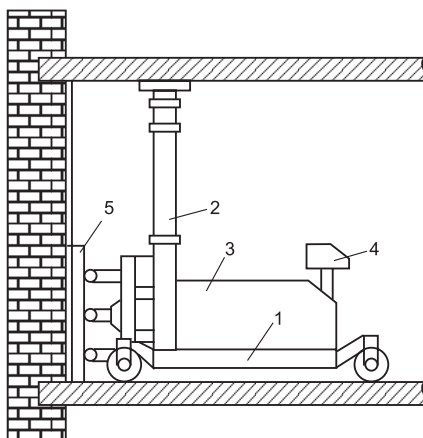


Рис. 11.16. Манипулятор для штукатурных работ на подвижной платформе

1 — шасси; 2 — стойка телескопическая; 3 — привод; 4 — пульт управления; 5 — щит

боты по роботизации процессов нанесения растворов и затирки поверхности позволяет сделать вывод о целесообразности создания для штукатурных работ передвижных РТК. В состав такого комплекса должны входить: установка для приема, перемешивания и транспортировки раствора и известкового молока, растворонасосные установки для подачи материала к рабочему инструменту, автоматические манипуляторы, снабженные рабочими органами для нанесения и разравнивания слоев раствора и затирки поверхности. Такие комплексы позволят выполнять набрызг, уплотнение и разравнивание обрызга, грунтовок и накрывки поверхности. В них должны быть предусмотрены регулировка усилия прижатия уплотняющих и затирочных механизмов, контроль качества поверхности и выверка ее горизонтальности и вертикальности. Комплексы должны иметь дистанционное и программное управление, обеспечивающее выполнение заданной схемы оштукатуривания.

Компоновочная схема автоматического манипулятора для штукатурных работ, входящего в составе роботизированного комплекса, приведена на рис. 11.17. Такой робот может использоваться при отделочных работах в жилых и общественных зданиях. Он представляет собой мобильную конструкцию на мини — шасси. Основой манипулятора является телескопическая штанга, которая в процессе работы распирается между полом и потолком. Манипулятор, установленный на штанге, имеет два звена и может передвигаться вдоль штанги. Рабочий орган может занимать горизонтальное и вертикальное положения. Это позволяет вести оштукатуривание стен и потолков. Рабочий орган снабжается сменным набором рабочего инструмента. Подача команд и корректировка программы робота осуществляются с местного пульта ПУ или пульта инфракрасного дистанционного управления ПДУ. Эти команды поступают в устройство управления УУ, которое на их основе формирует управляющие воздействия для звеньев манипулятора и рабочего органа РО. Положение звеньев манипулятора контролируется датчиками положения ДП. Для контроля качества поверхности используются устройство контроля УКК и акустические датчики ДА. Мобильные платформы штукатурных роботов могут использовать шагающие, гусеничные, колесные или гибридные механизмы передвижения. Такие роботы позволяют решать задачу комплексной автоматизации штукатурных работ в жилищном и гражданском строительстве.

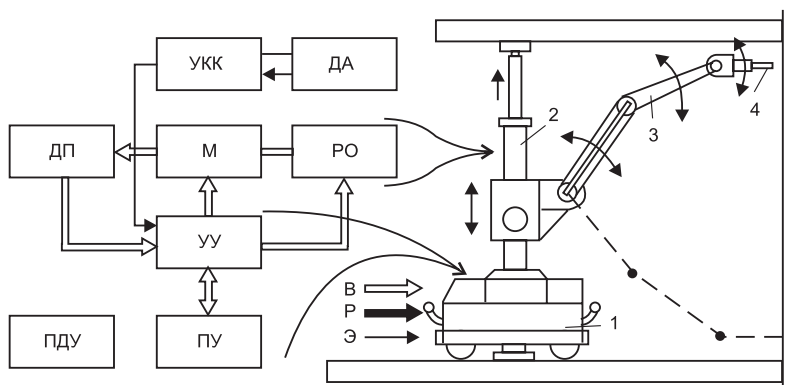


Рис. 11.17. Строительный робот для штукатурных работ  
 1 — мини-шасси, 2 — телескопическая штанга, 3 — манипулятор,  
 4 — рабочий орган, М — манипулятор, РО — рабочий орган с соплом,  
 УУ — устройство управления, ДП — датчики положения,  
 ДА — датчик акустический, УКК — устройство контроля качества  
 поверхности, ПУ — пульт управления, ПДУ — пульт дистанционного  
 управления, В — воздух, Р — раствор, Э — электроэнергия

Роботизированный комплекс, включающий группу рассмотренных роботов, дает возможность вести работы поточно-расчлененным методом (рис. 11.18). Раствор к манипуляторам подается растворомасосом из бункера-смесителя штукатурной станции, устанавливаемого у подъезда здания. Здесь же размещается установка для приема и перекачки известкового молока. На лестничной площадке размещают растворопровод, к которому подсоединяют рабочие органы манипуляторов. Сжатый воздух подают от компрессорного агрегата, находящегося на лестничных площадках. В качестве рабочих органов манипуляторов, входящих в состав этих комплексов, используются приспособления для механизированного нанесения растворов. Однако для робототехнических систем необходимы форсунки, которые могут работать с растворами любой консистенции, выполнять обрызг, грунтование поверхности и наносить накрывки. При этом они должны снабжаться электромагнитными или электромеханическими вентилями для регулирования подачи воздуха, а также иметь устройства для автоматического регулирования размера факела. Таким образом, форсунка как рабочий орган строительного робота снабжается регулировочными элементами, обеспечивающими в процессе работы автома-





жит контролю и управлению. Качество нанесения слоя раствора определяется расстоянием между выходным отверстием форсунки и поверхностью, а также зависит от угла наклона сопла. Поэтому при роботизации необходимо предусматривать стабилизацию угла наклона сопла и автоматическое регулирование расстояния его до поверхности.

Для разглаживания и затирки лицевого штукатурного слоя манипуляторы снабжают штукатурно-затирочными органами. На первой стадии роботизации могут быть использоваться пневматические и электрические затирочные машинки. При создании специализированных роботов для штукатурных работ нужны специальные органы, выполняющие затирочные операции, которые должны иметь встроенный привод и комплект съемного затирочного инструмента. Робот, снабженный такими рабочими органами, должен выполнять механизированную затирку накрывочного слоя, затирку цементно-песчаного раствора на поверхности железобетонных панелей, шлифовку прошпаклеванных вертикальных и горизонтальных поверхностей. При создании затирочного инструмента должна предусматриваться автоматическая стабилизация удельного давления затирочного диска на обрабатываемую поверхность и регулирование его величины в зависимости от состава раствора и времени его нанесения, а также регулирование скорости вращения дисков. Затирочная плоскость дисков может иметь увеличенную по сравнению с ручными затирочными машинками площадь. Так как процесс затирки происходит при смачивании поверхности, то к рабочему органу робота предусматривается подвод воды с регулированием ее подачи.

Наряду с рассмотренным вариантом штукатурного инструмента, обеспечивающего набрызг материала соплом со сжатым воздухом, предлагалось использование и других вариантов. Идея одного из них состоит в подачи штукатурного раствора посредством вращающегося вала из погружной ванны и равномерное прижатие его с определенным усилием к стене. Такая технология позволяет достичь строго определенного прижатия раствора к поверхности и совместить операции нанесения раствора с разравниванием штукатурки. Однако при такой технологии остаются переходы в местах сопряжения стен с потолком и полом. Интересным представляется вариант штукатурного инструмента в виде замкнутой камеры с уплотнительными элементами. В этом случае образуется ровная поверхность и сглаживаются все неровности исходной по-

верхности, при этом за одну операцию выполняется нанесение и разравнивание штукатурки. Однако это не позволяет гибко настраиваться на обработку ниш и выступов. Очень простым по конструкции является штукатурный инструмент с открытой камерой и встроенной затирочной рейкой. Он состоит из простой плиты с несколькими отверстиями для подачи материала и примыкающей к ней по периметру затирочной рейки. Простота конструкции, совмещение операций нанесения материала и его разравнивания одним инструментом. Однако требуются дополнительные исследования оптимальной степени заполнения инструмента, а также выяснения достаточности схватывания штукатурного слоя с поверхностью стены.

При роботизации штукатурных работ одновременно рассматриваются и решаются вопросы автоматизации приготовления и транспортировки раствора. Оборудование передвижных растворных узлов, входящих в состав РТК, снабжается средствами контроля, защиты, автоматического и дистанционного управления. На трубопроводе, подающем растворы, на этажи здания, устанавливаются электромагнитные клапаны для управления подачей, а также датчики давления для регулирования режима работы насосных агрегатов. В составе роботизированных штукатурных комплексов включаются автоматизированные штукатурно-смесительные агрегаты с дистанционным управлением. Для подачи растворов в комплекте с манипуляторами используются плунжерные одноступенчатые горизонтальные насосы, входящие в состав штукатурных агрегатов и станций. При выполнении большого объема штукатурных работ наиболее эффективным является использование штукатурной машины, располагаемой на рабочем этаже, в которую компрессором подается сухая штукатурка из силоса размещенного на нулевой отметке здания. Длина подводимого к роботу растворовода для подачи готового штукатурного раствора может составлять 10–15 м.

При автоматическом управлении процессом оштукатуривания система управления снабжается группой алгоритмов, выполняющих следующие операции. В состав алгоритмического обеспечения штукатурного робота включаются алгоритмы компенсации ошибок, возникающих вследствие неровности пола, выверки инструмента на заданную толщину слоя, измерения расстояния до стены и поддержания требуемой ориентации инструмента. Кроме того, система управления должна иметь алгоритмы обработки из-

мерительной информации обеспечивающие оценку поверхности стены в рабочей зоне и отслеживающую наличие и габариты имеющихся проемов и границы обрабатываемых поверхностей. Для управления штукатурным роботом используются также алгоритмы, обеспечивающие выполнения инструментом меандрового движения при нанесении раствора на стену и его разравнивании и алгоритмы производящие автоматическую смену рабочей позиции при достижении конца рабочего участка стены.

## **11.5. Малярные роботы и роботизированные комплексы**

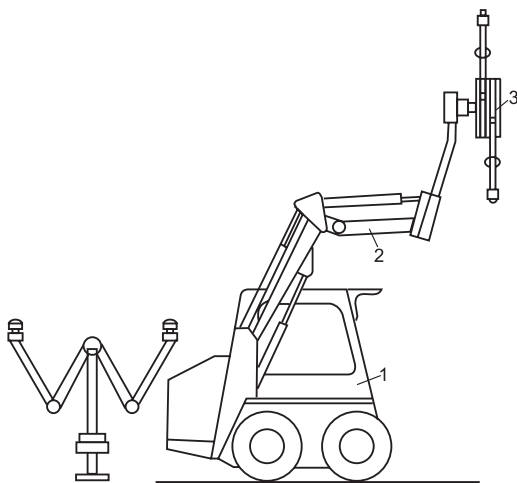
Малярные работы являются завершающей стадией всего технологического процесса строительства и по трудозатратам составляют около 16%, а сметная стоимость достигает 8—10% [95]. Перед нанесением окрасочных составов проводится большой объем подготовительных операций. После окрашивания может выполняться декоративная обработка поверхности, нанесение рисунков и фактурного слоя. Кардинальный путь изменения вредных условий труда отделочников, повышения производительности и качества работ связан с комплексной механизацией и автоматизацией этого вида работ при широком использовании средств робототехники. Основным направлением роботизации малярных работ является применение роботов с программным и адаптивным управлением, которые должны заменить человека на операциях, связанных с подготовкой поверхностей, нанесением шпаклевочных, грунтовочных и окрасочных составов.

Анализ технологических операций подготовки и окрашивания поверхностей стен и потолков показывает, что с помощью манипуляторов с дистанционным или программным управлением можно очистить поверхность от пыли сжатым воздухом, снять старые покрытия, произвести сплошное шпаклевание, нанести грунтовые, лакокрасочные, теплозащитные, клеевые и вододисперсионные покрытия. Роботы, выполняющие операции, связанные с применением взрыво- и пожароопасных веществ, должны иметь взрывобезопасное исполнение. Предпринимались многочисленные попытки использования для нанесения окрасочных покрытий на поверхности стен и потолков промышленных роботов, используемых в автомобильной, машиностроительной и других отраслях. Однако усло-

вия стройплощадки требуют создания специальных конструкций манипуляторов и построения на их основе РТК для малярных работ. Работы в этом направлении ведутся во многих странах.

Одной из первых отечественных разработок является покрасочно-малярный манипулятор для нанесения меловых и водоэмульсионных растворов на плоские поверхности, приведенный на рис. 11.19 [130]. Несмотря на неудачные эксперименты с этими манипуляторами, заложенный в них ряд структурных и конструктивных решений заслуживает внимания при дальнейших разработках средств роботизации для малярных работ. Манипулятор МО-01 выполнен на базе малогабаритной машины с двухзвенной стрелой и представляет собой две качающиеся телескопические штанги с выдвигными штоками, движущиеся в противоположные стороны. Штанги приводятся в движение одним приводом. На концах штанг установлены покрасочные форсунки. При движении штанг форсунки перемещаются по прямой линии вдоль обрабатываемой поверхности. Манипулятор с помощью стрелы поднимается на заданную высоту и посредством вертикальных перемещений форсунок и горизонтального движения машины окрашивает поверхность стены. Данная конструкция может использоваться и при окрашивании потолка, при этом стрела манипулятора поднимается на необходимую высоту и манипулятор разворачивается на 90°. Манипулятор МО-01 рассчитан на производительность 500 м<sup>2</sup>/ч. Дистанционное управление манипулятором позволяет вывести оператора из зоны распыления окрасочных материалов. Другой вариант покрасочного манипулятора МО-03 имеет две двухзвенных шарнирно связанных руки, на концах которых установлены покрасочные форсунки. Данная конструкция имеет более простое исполнение механической части и отличается меньшим габаритом при складывании звеньев. Шарнирные штанги перемещаются в противоположных направлениях и обеспечивают движение форсунок параллельно обрабатываемой поверхности и плавное изменение ширины полосы захвата. Наибольший вылет звеньев 2 м. Обе конструкции отличаются оригинальным кинематическим решением, позволившим снизить динамические нагрузки, осуществить все движения от одного привода, обеспечить постоянную скорость движения форсунок и простоту управление манипулятором.

Рассмотрим еще одну конструкцию отечественного манипулятора, выполненную на базе многофункционального экскаватора

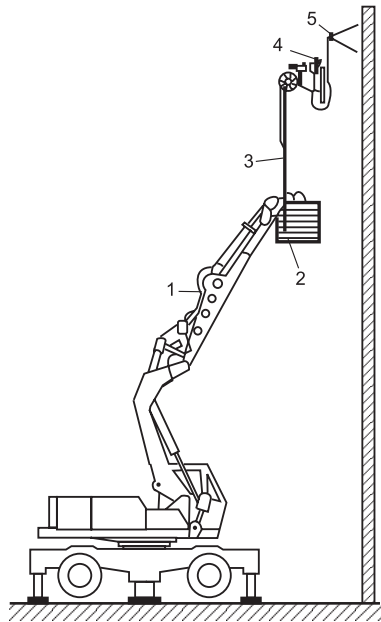


*Рис. 11.19. Покрасочно-малярный манипулятор МО-01 с качающимися штангами*

*1 — машина ТО-31; 2 — двухзвенная стрела; 3 — телескопические штанги с форсунками*

МО-3341 и предназначенную для окраски наружных стен зданий (рис. 11.20). Многофункциональный манипулятор снабжен подвесной люлькой, в которой установлено сменное окрасочное оборудование. Оно снабжено вертикальной штангой с двухкоординатным механизмом для перемещения форсунки. Форсунка перемещается горизонтально и вертикально вдоль стены, выполняя сканирование окрашиваемой поверхности. Для управления окрасочным оборудованием использовано релейно-контактное устройство и герконовые датчики положения. Использование многофункциональных манипуляторов со сменным окрасочным оборудованием подтвердило экономическую целесообразность роботизация малярных работ в строительных организациях.

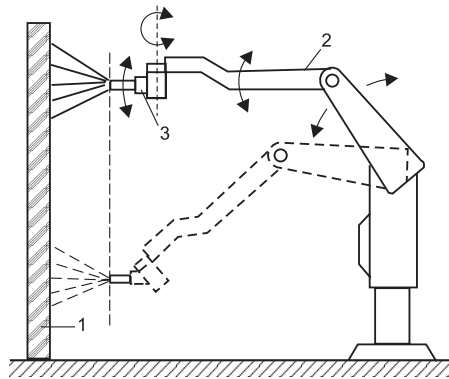
Из зарубежных разработок наибольшего внимания заслуживают окрасочные роботы с программным и адаптивным управлением, созданные в Японии. На рис. 11.21 показана компоновочная схема одного из первых таких роботов, предназначенного для нанесения окрасочных покрытий на вертикальные поверхности. На колонне установлен двухзвенный манипулятор с ориентирующим органом, обеспечивающим перпендикулярность форсунки относительно окрашиваемой поверхности в ходе перемещения звеньев



*Рис. 11.20. Многофункциональный манипулятор со сменным окрасочным оборудованием  
1 — манипулятор; 2 — подвесная люлька; 3 — двухкоординатный механизм; 4, 5 — форсунка*

манипулятора и его поворота вокруг колонны. Управление манипулятором осуществлялось от микроЭВМ. При перемещении форсунки в процессе работы система управления обеспечивала поддержание постоянного расстояния до стены. В дальнейшем японскими специалистами были разработаны самоходные роботы для окраски помещений, наружных поверхностей балконов и лоджий высотных зданий и ряд др. Испытания этих разработок показало хорошее качество поверхности, которое не уступает уровню квалифицированного рабочего.

Робот включает механизм перемещения и станцию управления, оборудование для подачи окрасочных составов и автоматический пульверизатор. Устройство перемещения рабочего органа имеет горизонтальные и вертикальные штанги и привод. Аналогичные разработки выполнены в ряде других стран: Германии, Болгарии, США, Польше. Выполненные разработки показали перспективность роботизации малярных работ. Применение роботов позво-



*Рис. 11.21. Компоновочная схема окрасочного робота  
1 — колонна; 2 — двухпозиционный манипулятор;  
3 — ориентирующий орган с форсункой*

ляет снизить трудоемкость, увеличить производительность работы и повысить технику безопасности при выполнении окрасочных работ. Перспективными являются манипуляторы для малярных работ при отделке жилых домов. Анализ выполненных разработок и технологии нанесения окрасочных составов показывает, что для роботизации этих процессов целесообразно создать универсальный манипулятор для подготовки поверхностей и их окраски. При этом необходимо использовать блочно-модульную конструкцию. На рис. 11.22 показана компоновка отделочного робота для выполнения отделочных работ в жилых помещениях, предложенная Паршиным Д. Я. в 1990 г. Он состоит из базового блока, на котором установлено два двухзвенных манипулятора. Базовый блок снабжен колесным движителем для перемещения робота из одного помещения в другое. В рабочем состоянии робот с помощью телескопической опорной штанги раскрепляется между полом и потолком помещения. Базовый блок с манипулятором может перемещаться вдоль штанги. После окончания работ штанга складывается и робот опускается на колеса. Звенья манипулятора в процессе передвижения робота также складываются. Робот работает в цилиндрической системе координат и снабжается бортовкой микроЭВМ, обеспечивающей программное или адаптивное управление. При адаптивном управлении робот снабжается ультразвуковым сканером. Кроме того, такой робот должен иметь дистанционное управление, для которого лучше использовать радиоканал



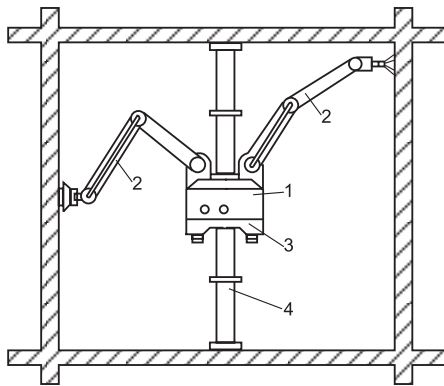


Рис. 11.22. Двуручкий робот для отделочных работ в жилых помещениях

1 — базовый блок; 2 — манипуляторы; 3 — колесный движитель; 4 — колонна

связи. Снабжение робота комплектом сменного инструмента позволит автоматизировать основные процессы отделки жилых помещений.

На базе малярных роботов целесообразно создавать РТК, в состав которых кроме манипуляторов должны включаться шпаклевочные и малярные агрегаты. Управление оборудованием осуществляется системой управления комплекса, построенной на микроЭВМ. Шпаклевка наносится специальными шпателями с автоматической подачей материала или с помощью форсунок с воздушным распылением. Для нанесения окрасочных составов следует использовать специальные форсунки с электромагнитными клапанами. Можно также рекомендовать пневматические валики с внутренней подачей краски через отверстия. Управление подачей окрасочных составов на валики осуществляется с помощью электромагнитных клапанов, устанавливаемых на подающих шлангах.

## 11.6. Роботизация земляных и свайных работ

В строительстве для выполнения большой группы земляных работ, таких как возведение насыпи, рытье котлованов и выемок, профилирование земляного полотна, планировка площадок и др.,

применяют многоцелевые землеройно-транспортные машины. Среди них выделяются одноковшовые экскаваторы, которые по кинематической структуре представляют манипулятор, снабженный прямой или обратной лопатой. Эти машины могут составить основу для разработки роботизированной технологии производства земляных работ на строительных площадках. На их базе возможно применение эффективных механизмов с автоматизированным и автоматическим управлением для отрывки котлованов и траншей под фундаменты, зачистки неровностей в малообъемных выемках, подготовки траншей для укладки инженерных коммуникаций и других работ.

Создание на базе экскаваторов землеройных роботов связано с автоматизацией режимов работы и управления перемещением рабочего органа, обеспечением требуемого качества обрабатываемой поверхности и защитой машин при возникновении аварийных моментов во время эксплуатации. При автоматизации режимов копания обеспечивается полное использование мощности двигателя и наибольшая производительность. В основу построения САР режимов копания положен принцип стабилизации нагрузки приводного двигателя от сил сопротивления резанию путем изменения толщины срезаемого слоя. Регулируемым параметром в этих системах является нагрузка на двигатель, а регулирующим — положение рабочего органа. Величина нагрузки контролируется косвенными методами путем измерения крутящего момента, тягового усилия, угловой скорости вала двигателя или степени буксования ведущих колес. Создание на базе экскаваторов землеройных роботов связано с решением проблемы перевода отдельных операций цикла на программное управление и решением задачи планирования движений рабочего органа. В настоящее время задачи программного управления решаются на базе использования бортовой управляющей микроЭВМ. При этом необходимо оснастить машину информационно-измерительной системой контроля основных параметров состояния. На первых этапах создания землеройных роботов следует использовать интерактивное и супервизорное управление. Процесс обучения выполняется в ручном режиме, в ходе которого запоминается последовательность и основные показатели выполнения отдельных операций. Затем эти действия могут многократно повторяться в автоматическом режиме.

Создание на базе экскаваторов землеройных роботов в первую очередь связано с разработкой более совершенных рукоятей-мани-

пуляторов. Значительно больший эффект достигается в сочетании с телескопической рукоятью экскаватора (рис. 11.243). Ее применение обеспечивает прямолинейное движение рабочего органа. В результате решается проблема устранения волнообразного профиля основания (дна) котлованов и траншей.

Для решение проблемы отрывки выемок вблизи стен, фундаментов, а также с наклонной осью в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси движения машины и различной конфигурации в плане, разработан манипулятор с цепным рабочим органом (рис. 11.24).

Работа землеройной машины заключается в следующем. При отрывке линейно-протяженных выемок и траншей, землеройная машина работает, как существующие экскаваторы с цепным рабочим органом. Для отрывки круглых в плане выемок с помощью гидропривода приводится во вращение стол и цепной рабочий орган. Одновременно с этим рабочий орган перемещается относительно стрелы вниз. В результате этого отрывается выемка цилиндрической формы. Аналогично с помощью этого манипулятора осуществляется отрывка выемок овальной в плане и другой формы.

Задание уклонов и плоскостей обрабатываемых котлованов и траншей выполняется с помощью лазерных систем. Она состоит (рис. 11.25) из лазерного излучателя ЛИ, устанавливаемого на штативе 4, и фотоприемного устройства ФПУ с механизмом перемещения МП (электродвигатель с редуктором), размещаемых на машине. Лазерный излучатель ЛИ содержит лазер 1 с коллиматором, вращающуюся призму 2, электродвигатель с редуктором 3. Излучатель формирует луч с малым углом расходимости, с помощью которого задается опорная линия или плоскость. Угол наклона луча устанавливается вручную с помощью микрометрических винтов и уровней. При роботизации земляных работ необходимо

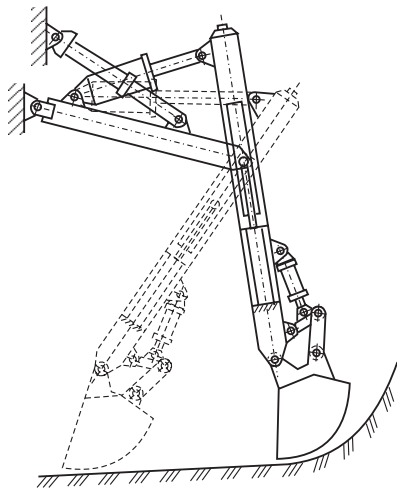
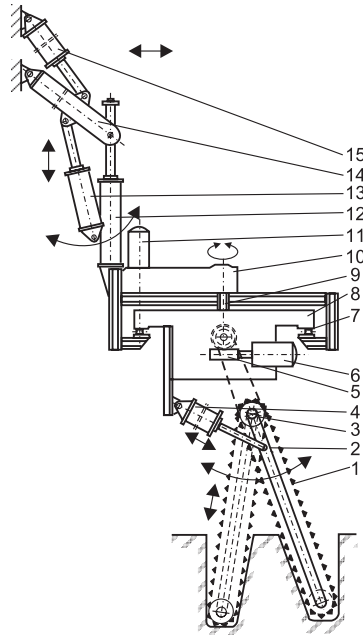


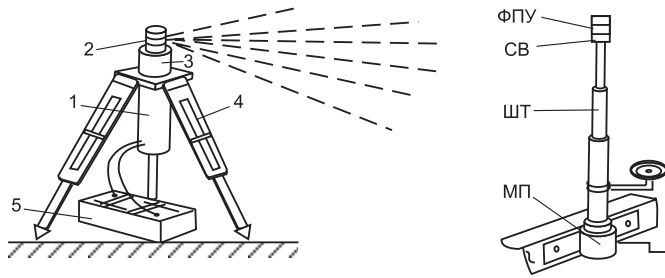
Рис. 11.23. Рукоять-манипулятор гидравлического одноковшового экскаватора

использовать лазерные излучатели с автоматическим заданием и установкой направления луча. Для сканирования плоскости используется вращающаяся призма 2, которая преломляет луч на  $90^\circ$  и сканирует плоскость. Питается лазерный излучатель от аккумулятора 5. Фотоприемное устройство состоит из трех световодов, расположенных один над другим и разделенных между собой экранами. Каждый световод оканчивается фотодиодом ФД, подключенным на вход усилителя. Световоды имеют возможность принимать сигнал (луч) из любой точки горизонта в диапазоне  $360^\circ$ . Световоды вырабатывают сигнал отклонения координаты рабочего органа машины от заданной, который после усиления подается на управление положением рабочего органа машины. Верный луч или плоскость могут быть расположены горизонтально или под заданным углом к горизонту. Бортовое оборудование включает фотоприемное устройство (фотодетектор) и устройство обработки данных. Фотодетектор имеет круговой обзор и устанавливается на штанге. Точность управления относительно опорной лазерной плоскости зависит от стабильности направления лазерного луча и точности регистрации положения фотоприемника относительно луча. При автоматическом управлении положением рабочих органов выходной сигнал фотоприемного устройства подается в управляющую микроЭВМ.

На основе экскаваторов создаются различного рода многофункциональные роботы, предназначенные для монтажа инженерных коммуникаций, уплотнения грунта, установки опалубки. На рис. 11.23 представлен многофункциональный робот для монтажа



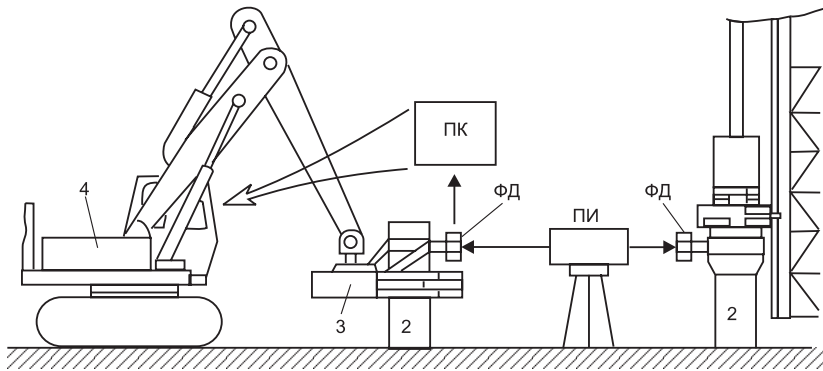
*Рис. 11.24. Манипулятор с цепным рабочим органом для отрывки земляных сооружений заданного профиля*



*Рис. 11.25. Лазерная система задания осей и плоскостей  
ЛИ — лазерный излучатель; ФПУ — фотоприемное устройство;  
1 — лазер; 2 — вращающаяся призма; 3 — привод; 4 — штатив;  
5 — аккумулятор СВ — световоды; ШТ — штанга телескопическая;  
МП — механизм подъема*

инженерных коммуникаций, выполненный на базе экскаватора ЭО третьей размерной группы.

Еще одно перспективное направление использования промышленных роботов связано с выполнением свайных работ. Применение роботов и создания на основе сваебойных агрегатов РТК, оснащенных лазерными системами контроля, позволяет автоматизировать процесс забивки свай, их подрезки. В состав комплекса включается сваебойная установка, робот для подачи свай и их подрезки со сменным рабочим органом. На рис. 11.26 приведен пример такого комплекса, оснащенного лазерной системой контроля. Аппаратура контроля состоит из лазерного излучателя ЛИ, фотодатчика ФД и панели контроля ПК. Для задания проектной оси забивки свай вдоль нее направляется лазерный луч. На мачте 1 сваебойной установки монтируется фотодатчик, фиксирующий положение луча в горизонтальной плоскости. Установка мачт выполняется в створе луча. При забивке свай до заданной отметки фотодатчик размещается на наголовнике и фиксирует положение луча в вертикальной плоскости. Если лазерный луч используется только для задания горизонтального уровня погружения свай, то в этом случае его удобно разворачивать в плоскость, располагая лазерный прибор за пределами рабочей площадки. Контроль срезы свай под проектную отметку также целесообразно проводить при помощи лазерного прибора, задающего горизонтальную плоскость. Относительно этой плоскости и выполняется контроль за положением рабочего органа 3 установки. Фотодатчик ФД размещается на рабочем органе. Информация с фотодатчика поступает



*Рис. 11.26. Роботизированный комплекс для свайных работ  
1 — сваебойная установка; 2 — свая; 3 — рабочий орган; 4 — робот  
для подачи, установки и подрезки свай; 5 — лазерная система  
контроля*

в систему управления комплексом и используется для установки свай и рабочего инструмента в заданное положение. С помощью лазерного луча задаются разбивочные оси и высотные отметки при забивке и подрезке свай. Кроме того, лазерный луч, развернутый в вертикальную плоскость, позволяет контролировать вертикальность погружения свай и положение направляющей-мачты копра. При сооружении свайных фундаментов лазерное визирование в сочетании с линейными измерениями в направлении разбивочных осей позволяет автоматизировать процесс установки свай в заданное место и их погружения до заданной отметки. Использование лазерной системы в составе РТК позволяет автоматизировать процесс разбивки свайного поля, передвижение оборудования и его ориентирование в новой точке по створу разбивочных осей. Автоматизация процесса погружения свай на основе роботов и лазерных систем позволяет значительно улучшить качество возведения фундаментов, повысить производительность труда и сократить сроки выполнения работ.

## Заключение

Дальнейшее развитие строительных технологических процессов во многом связано с широким внедрением и применением средств и систем автоматизации и робототехники на строительной площадке. Это становится возможным по мере совершенствования строительной техники, обусловленного использованием новейших достижений в области электроники. Интеллектуализация строительных машин направлена на повышение точности выполнения рабочих операций, улучшение управляемости, повышение рентабельности и безопасности, снижению доли трудоемких процессов. Наблюдается заметный прогресс в области совершенствования датчиков и устройств обработки информации, в первую очередь микропроцессоров и микро-ЭВМ, так что стала возможной автоматизация различных видов работ.

Известные зарубежные фирмы, выпускающие строительную технику, все чаще оснащают свои машины различными автоматическими контрольными устройствами, позволяющими предотвращать повреждения двигателя, коробки передач и гидравлики, устранение которых обходится дорого и требует больших затрат времени. Кроме того, мощность машины используется более эффективно и тем самым снижается расход топлива. Работы, целесообразность проведения которых у многих вызывала сомнения, привели к созданию эффективных и надежных электронных систем, устройств, объединяемых бортовыми микро-ЭВМ.

Успешное применение электроники в строительных машинах сопряжено с серьезными проблемами, особенно для завода-изготовителя. Прежде чем запрограммировать работу того или иного электронного устройства и сделать его пригодным для практического применения, необходимо тщательно проанализировать все возможные ситуации в ходе технологического процесса. При разработке конструкции того или иного устройства важно определить, какую степень свободы принятия решений сохранить за оператором, несмотря на возможность автоматизации выполнения операций. При выборе элементов систем автоматизации и роботов следует учитывать и экстремальные условия эксплуатации машин, такие как сильная вибрация, пыль, масляные пары, сажа, влажность, ударная нагрузка, близость проведения сварочных работ и т. д. К таким воздействиям особенно чувствительны технические

устройства, которые собирают и анализируют информацию. Защита датчиков и компьютеров от грязи, воды, резких температурных колебаний и вибрации — одна из основных проблем, с которыми сталкиваются разработчики.

После отладки системы электронного контроля ощутимо снижаются эксплуатационные расходы и повышается эффективность использования машин. Срок службы возрастает, а производительность их часто выше по сравнению с аналогичными, не оснащенными электроникой, так как обеспечиваются оптимальная нагрузка на рабочие органы и надежный контроль технологических параметров. Также можно регулировать работу сменных исполнительных органов, например, фрез, посредством пропорциональных клапанов с электронным управлением, что в сочетании с датчиками частоты вращения ротора фрезы, скорости подачи и глубины захвата может обеспечить оптимальную производительность строительной машины при выполнении работ.

Любая система, использующая микропроцессор, может отображать состояние самой машины или же окружающей ее среды на мониторе. В основном мониторы представляют собой системы индикации на электронной или цифровой панели, на которой состояние машины представляется в виде различных величин символов и знаков. Существуют мониторы, отображающие состояние машины на дисплее с жидкими кристаллами и при необходимости делающие сообщения с помощью синтезатора речи. Например, разработан электронный ограничитель грузового момента, который предупреждает оператора об опасности при превышении допустимых предельных величин у самоходных кранов. Другое электронное устройство может автоматически подсчитывать выработку экскаватора [1]. При помощи мониторов удобно контролировать положение машин (траншеекопателя, проходческого щита и т. д.), состояние объектов и передавать информацию о них в виде видеосигналов.

Автоматизация позволяет неопытному водителю управлять сложной машиной. Дальнейшее развитие автоматизации идет по пути создания машин, работающих в оптимальном режиме и приспособляющихся к рельефу местности и погодным условиям, как это делает опытный оператор, и чтобы режимы эксплуатации не ограничивались бы одной моделью управления. Машиной с полной автоматизацией может считаться такая, которая при нажатии кнопки пуска оператором выполняла бы операции по решению, принятым ею самой, и работала бы по заданной программе.



Однако, строительных машин, в управлении которых не принимал бы участия человек, пока нет. В числе машин с самообучающейся системой считывания, подобных множеству промышленных роботов, когда они вводятся для заданного перемещения и повторения этого перемещения, на практике применяются такие устройства, как буровая каретка, роботы для нанесения штукатурных защитных покрытий, отделки полов и другие. Для подачи команд перемещения вначале использовался способ, при котором оператор задавал воздействия с помощью обычного переключения рычагов. В связи с большими размерами машин и сложными командами, для ввода которых требовалось много времени, в последнее время получила распространение система ввода данных в виде числовых значений по осям координат. Данные вводятся с помощью моделирования работы машины по графам, отображенным на дисплее специальной персональной ЭВМ (система с числовым программным управлением).

В заключение следует отметить, что настоящая монография, рассматривающая вопросы автоматизации и роботизации технологических процессов на строительной площадке, является первой частью публикаций авторов по проблемам применения промышленной робототехники в строительстве. Продолжение работ включено в план исследований Российской инженерной академии, результаты которых будут также опубликованы. Авторы надеются на заинтересованный отклик специалистов, фирм и организаций.

## Список литературы

1. Биттеев Ш. Б., Воробьев В. А., Дегтярев В. С., Мажибаев О. М. Методы и средства автоматизации строительного-дорожных работ и машин. — Алматы: Тьлым, 1996. — 262 с.
2. Булгаков А. Г., Гернер И., Каден Р. Исследования и практические примеры организации производства и использования роботов в стройиндустрии // Машины, механизмы, оборудование и инструмент — М.: ВНИИТПИ, 1990, вып. 1. — 48 с.
3. Булгаков А. Г., Гернер И., Каден Р. Микропроцессоры в системах автоматизации строительной техники // Технология строительного-монтажных работ — М.: ВНИИТПИ, 1991, вып. 3. — 52 с.
4. Булгаков А. Г., Сухомлинов А. Д. Применение лазерных информационно-измерительных систем в строительстве. // Технология строительного-монтажных работ. — М.: ВНИИИС, 1989, вып. 3. — 53 с.
5. Булгаков А. Г., Шиндлер И. Средства и системы автоматизации в строительной технике. Технология и автоматизация строительства. — М.: ВНИИТПИ, 1994, вып. 4. — 56 с.
6. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1986. — 264 с.
7. Вильман Ю. А. Основы роботизации в строительстве: Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 271 с.
8. Виглеб Г. Датчики: устройство и применение. — М.: Мир, 1989. — 196 с.
9. Воробьев В. А., Френкель Г. Ю., Юков А. Я. Анализ состояния и тенденция развития робототехники в строительстве // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1984. — № 10. — С. 81-87.
10. Воробьев Е. И., Козырев Ю. Г., Царенко В. И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Под. общ. ред. Е. П. Попова. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
11. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под общ. ред. Е. П. Попова. — М.: Машиностроение, 1986. — 328 с.
12. Домрачев В. Т., Матвеевский В. Р., Смирнов Ю. С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справочное пособие. — М.: Энергоиздат, 1987. — 392 с.

13. Жуковский В. Г. Управление в технических системах: Учеб. пособие / РИСХМ. — Ростов н/Д, 1990. — 77 с.
14. Загороднюк В. Т., Паршин Д. Я. Направления развития строительной робототехники // Опыт применения манипуляторов и роботов в строительстве. — М.: МДНТП, 1988. — С. 28—32.
15. Загороднюк В. Т., Паршин Д. Я. Строительная робототехника. — М.: Стройиздат, 1990. — 269 с.
16. Зенкевич С. Л., Дмитриев А. А. Логическое управление адаптивным робото-техническим комплексом // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1986. — № 3. — 113—126.
17. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 400 с.
18. Игнатъев М. Б., Кулаков Ф. М., Покровский А. М. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами. — Л.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
19. Козлов Ю. М. Адаптация и обучение в робототехнике. — М.: Наука, 1990 — 248 с.
20. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1983. — 376 с.
21. Красников В. Ф. Промышленные роботы и манипуляторы: Учеб. пособие / РИСХМ. — Ростов н/Д, 1981. — 110 с.
22. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов. — М.: Наука, 1991. — 336 с.
23. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой.— М.: Мир, 1985. — 285 с.
24. Кулаков Ф. М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. — М.: Наука, 1980. — 448 с.
25. Кулешов В. С., Лакота Н. А. Динамика систем управления манипуляторами. — М.: Энергия, 1971. — 304 с.
26. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов / Под ред. Е. П. Попова. — М.: Наука, 1978. — 416 с.
27. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3 кн. / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика / Е. И. Воробьев, С. А. Попов, Г. И. Шевелева. — М.: Высш. шк., 1998.— 304 с.
28. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3 кн. / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 2: Рас-

- чет и проектирование механизмов / Е. И. Воробьев, О. Д. Егоров, С. А. Попов. — М.: Высш. шк., 1998. — 367 с.
29. Михайлов О. П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.
  30. Паршин Д. Я., Булгаков А. Г. Автоматизация и роботизация строительного-монтажных работ: Учеб. пособие / НПИ. — Новочеркасск, 1988. — 88 с.
  31. Писменский Г. В., Солнцев В. И., Воротников С. А. Системы силомоментного очувствления роботов. — М.: Машиностроение, 1990. — 298 с.
  32. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика, алгоритмы. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
  33. Программное обеспечение промышленных роботов / Отв. Ред. А. К. Платонов. — М.: Наука, 1986. — 279 с.
  34. Проектирование и разработка промышленных роботов / Под общ. ред. Я. А. Шифрина, П. Н. Белянина. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
  35. Промышленные роботы для миниатюризации изделий / Под ред. В. Ф. Шаньгина. — М.: Машиностроение, 1985. — 264 с.
  36. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 кн. Кн. 2. Приводы робототехнических систем: Учеб. пособие для вузов / Под. ред. И. М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986. — 175 с.
  37. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 кн. Кн. 3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: Учеб. пособие для вузов / Под. ред. И. М. Макарова. — М.: Высш. шк., 1986. — 159 с.
  38. Системы очувствления и адаптивные промышленные роботы / Под общ. ред. Е. П. Попова, В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
  39. Справочник по промышленной робототехники: В 2 кн. / Под ред. Ш Нофа. — М.: Машиностроение, 1990. — 960 с.
  40. Спыну Г. А. Промышленные роботы: Конструирование и применение. — Киев: Вища шк., 1985. — 176 с.
  41. Тимофеев А. В. Управление роботами: Учеб. пособие. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. — 240 с.
  42. Фу. К., Гонсалес Р., Ли К., Робототехника.— М.: Мир 1989.—349 с.

43. Френкель Г. Ю. Роботизация процессов в строительстве. — М.: Стройиздат, 1987. 173 с.
44. Шахинпур М. Курс робототехники: — М.: Мир, 1990. — 527 с.
45. Bock T., Bulgakow A., Parshin D. Automation and robotization of mounting operations in building. Proceedings of the 18 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC-2001 (10-12 Sept., 2001, Krakow, Poland). — Krakow, 2001. — P. 13—17.
46. Cohrs H.H. Richtig platt durch Elektronik // Baumaschinendienst — 1995.— № 6, P. 592—600.
47. Craigie N.S.: Technischer Bericht 1/88, Ultraschallwandler in Luft: Firmenschrift Pepperl+Fuchs GmbH. 1989.
48. Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices // J. Appl. Mech., Vol. 77. — 1955. — P. 215—221.
49. Handbook of industrial robotics / Edited by S.Y. Nof. — NewYork: John Wiley & Sons, Inc., 1999. — 1349 pp.
50. Hasegawa J. Robotization of Construction Work // Robot. — 1983. — №38. — pp. — 41—46.
51. Hesse, R. Grundlagen der Sensortechnik. — Hoppenstedt, 1991. — 126 S.
52. Kindermann Th., Cruse H., Dautenhahn K. A fast, three-layer neural network for path finding // Network: Computation in Neural Systems, Vol. 7. — 1996. — pp. 423—436.
53. Kinsley L.E., Frey, A.R.: Fundamentals of Acoustics. — Wiley, 1982. — 412 pp.
54. Kulushev F.A., Bogdanov A.A. Neural Algorithms Of Path Planning for Mobile Robots in Transport Systems // Proceedings of the IEEE Int. Joint Conf. on Neural / Networks, 1999. — pp. 126—131.
55. Laser fur Hoch,- Tief- und Innenausbau, Mechanisierung, Vermessungsgerate. Prospekt der Firma Geo-Feinmechanik GmbH. — Muhlheim an der Ruhr, 1998. — S. 6
56. Maschinensteuerungen. Prospekt der Firma Siller (BRD). — Weiden, 2000. — S. 8.
57. Mikropaver paver control system. Prospekt der Firma Mikrofyn A/S (Denmark). — Odense, 2000. — S. 6.
58. Mitani K. Robotization of Construction Work // Kowan Niyaku, Vol. 61. — 1984. — №6. — pp. 23—28.

59. Muller G. Moglichkeiten der Steuerung von Baumaschinen. // Vermessungs-technik. — 198. — № 8. — S. 269—272.
60. Proceedings of the 18 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC-2001 (10-12 Sept., 2001, Krakow, Poland). — Krakow, 2001. — 984 pp.
61. Proceedings of the 19 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC-2002 (9-11 Sept., 2002, Washington, USA). — Washington, 2002. — 896 pp.
62. Saam W. Hohe Prazision mit Licht // Baugewerbe. — 1993. — № 13—14. — S. 25—35.
63. Schnell, G. Sensoren in der Automatisierungstechnik / 2. Aufl. Vieweg-Verlag. — Wiesbaden, 1993. — 321 S.
64. Szafranek B. Automatyizacja maszyn budowlanych. // Przegląd budowlany. — 1977. — №. 4. — P. 186—187.
65. Тиба Д. Применение электроники в строительных машинах. // Кэсэцу кикай. — 1980. — № 10. — С. 64—75
66. Warszawski A. Robots in the Construction Industry // Robotica, V. 4. — 1986. — №3. — P. 181-188.
67. Wirth B. Lenkautomat bei mobilen Baumaschinen mit elektronischem Leit-system. — Tiefbau. — 1996. — № 11. — S. 731—732.
68. Yoshida T. Possibilities of Industrial Robotics in Construction // Semento Konkurito. — 1982. — №424. — P. 34—40.
69. Заявка РСТ WO 81/01195 Великобритания. МКИ G 01 C 15/00. Оpubл. 30.04.81.
70. Баранников В. Ф., Влас А. П. Задачи автоматизации рабочих процессов землеройных машин. Сб. научн. тр. «Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины». — К.: Техника, 1989. — Вып. 42. — с. 8—13.
71. Chors H.-H. Elektronische Uberwachungssystemen in Baumaschinen // Baumaschinendienst. — 1987. — № 2. — S. 52—54.
72. Chors H.-H. Geratefuhrer oder Programmierer // Fordern und Heben. — 1989. — № 12. — S. 014—1016.
73. Fortschritte durch Mikroelektronik und Automatisierung // Tagung Baden-Baden. — Dusseldorf, VDI-Verlag. — S. 16—32, 67—69, 185—210.
74. Morgenwerk G. Mikroelektronik in Baumaschinen // Baugewerbe. — 1987. — № 7. — S. 19—21.
75. Kuhn G. Die Automatisierung der «mobilen» Baumaschinen — eine Zukunftsperspektive // Baumaschinentchnik. — 1984. — № 8. — S. 1299—308.

76. «Mechatronics» — emerging high-technology for earthmoving equipment? // Pit and Quarry. — 1984. — vol. 77. — № 3. — p. 60—62.
77. Патент США 4516117. МКИ 08 В 21/00. Опубл. 07.05.1985.
78. Итияма С. и др. Одноковшовый экскаватор УН-16, управляющий с помощью мини-ЭВМ // Санче кикай. — 1984. — № 405. — с. 15—18.
79. Ваума-86: Computer AGE Triumph // World construction. — 1986. — № 5. — p. 18—20, 24.
80. Computer cut equipment down time // World construction. — 1984. — vol. 57. — № 10. — p. 25—27.
81. Verwendung Mikroprozessoren in Baumaschinen // Baumaschinendienst. — 1985. — № 9. — S. 528—532.
82. Арутюнов С. Г. Основные тенденции развития конструкции бульдозеров / Экспресс-информация. — М.: ВНИИИС, 1986. — Сер. 17. — Вып. 2. — с. 2—4.
83. Aufsatzbohranlage FLY DRILL // Produktinformation der Firma BAUER, 2001.
84. BM Series Hydraulic Crane + BAUER BFD 1500 // Prospekt der Firma KOBELCO, 2001.
85. Construction Robot System Catalog in Japan. — Tokyo: Japan Robot Association, 1999. — 329 pp.
86. Bock T. Moglichkeiten und Beispiele fur Robotereinsatze im Bauwesen // VDI Berichte № 800, 1990, S. 137—158.
87. Theiner B. Rohrpost fur Beton . // Baumaschinendienst, 1991, № 7/8, S. 594—597.
88. Mobiles Informationssystem «Daisy» optimiert die Disposition von Beton-pumpe. // Tief- und Stra?enbau, 1993, № 1, S. 34—36.
89. Handhaben von Mauersteinen. Merkblatt, Bau-Berufsgenossenschaft. 1991.
90. Prospekt der Firma H.Steinweg. 1995.
91. Wessing, J. KS-Maurerfibel, Beton-Verlag Dusseldorf 1992.
92. Schoppen M. Die Auswahl von Handhabungsagregaten auf Grund der charakteristischen Merkmale ihrer kinematischen Strukturen. — VDI Verlag, Dusseldorf, 1987.
93. Pahl G. Beitz W. Konstruktionslehre. — Berlin, Heidelberg, New-York. Springer, 1977.
94. Elektronik im Turmdrehkran. Mikroprozessor fur mehr Sicherheit und Zuverlassigkeit // Baumaschinendienst. — 1990. — № 4. — S. 321—325.

95. Устройство предотвращения столкновения башенных кранов // Кэнсэцуно кикайка. — 1984. — Т. 8, № 414. — с. 41—42.
96. Карамышев М. И. Система дистанционного управления кранов с подачей команд голосом / Реф. информ. — М.: ВНИИ-ИС, 1987. — № 4. — 43 с.
97. Родинко О. Н. Автокран с автоматизированным управлением / Реф. информ. — М.: ВНИИИС, 1987. — № 2. — с. 60.
98. Fortschritte durch Mikroelektronik und Automatisierung // Tagung Baden-Baden. — Dusseldorf, VDI-Verlag. — 1990. — S. 16—32, 67, 185—210.
99. Gebhardt, F. Mauerroboter fur die Baustelle. Forum Zukunft Bauen, Dresden, 1996.
100. Bock, T., Stricker, D., Fliedner, J., Huyhn, T. Automatic generation of the controllingsystem for a wall construction robot.- Automation in Construction, 1996, № 5, p. 15—21.
101. Бок Т., Булгаков А. Г. Роботизация строительных процессов // // Обзорная информ. — М.: ВНИИТПИ. Серия «Техн. и мех. строительства». Вып. 1, 1999. — 69 с.
102. Pritschow G., Kurz J., Fessele Th., Scheuer F. Robotic on-site construction of masonry. 15<sup>th</sup> International symposium on automation and robotics in construction // Munich, 1998. — pp. 55—64.
103. Spee D. Mobile Robots — A New Generation of Production Taks for Robots. «Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robots in Construction, 6-8 June». p. 356—363. — San Francisco, California, 1989.
104. Pritschow, G., Dalacker, M, Kurz, J., Zeiher, J.: A Mobile Robot for On-Site Construction of Masonry / International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Munich, Germany, 1994, pp. 1701—1707.
105. Wardecki N. Entwicklungsperspektiven fur die Baumaschinentechnik, insbesondere Erdbaumaschinen // Baumaschinen und Bautechnik. — Wiesbaden 32 (1985) 3. — S. 87—90.
106. Trend in der Betonmischertechnik // Baugewerbe. — 1984. — № 21. — S. 51—54.
107. Мориясу К. Разработка прогрессивной системы строительных технологий с использованием электроники / Пер. 06894012892 ВЦЦ // Добоку гаккай ромбунсю. — 1987. — т. 385. — с. 29.37.



108. Митани К. Роботизация строительных работ / пер. 86/21079 ВЦЦ. — Кован, 1984. — № 6. — с. 23—28.
109. Wanner M.-K., Baumeister K., Koler G.-W., Walze H. Roboter in Bauindustrie / Robotersysteme. — 1985. — № 4. — S. 227—331.
110. AMC-System PM. MT1067. Datenblatt der Fa. Putzmeister. — 1991.
111. Geschäftsbereich Deimler-Benz, Unternehmensbereich AEG. — 1988. — S. 36.
112. Wei?ert, M. Technologische Grundlagen und Maschinenkonzepte für einen Verputzroboter zum teilautomatisierten Auftrag von Innenputz. Fraunhofer IRB Verlag, 1998, 60 S.
113. Endo, G., Hirose, S. Study on Roller-Walker. // Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, Vol.18, No. 2, pp. 112—119.
114. Endo, G., Hirose, S. Study on Roller-Walker. // Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, Vol.18, No. 8, pp. 105—111.
115. Булгаков А. Г., Шиндлер Й. Автоматизация в подземном строительстве. — М.: ВНИИТПИ, сер. «Технология, механизация и управление в строительстве», вып. 3. — 62 с.
116. Poppy W. Roboter- und Comuteranwendung im Tunnelbau. // Strassen- und Tiefbau 43 (1989), Nr. 11, S. 8—12.
117. Haack A. Tunnelbau in der Bundesrepublik Deutschland. // Tiefbau, Ingenieurbau, Stra?enbau 29 (1987), Nr. 11, S. 648—653.
118. Hadke D. Verminderung der Staubentwicklung bei Spritzarbeiten im Tunnelbau. // Tunnel 8 (1988), Nr. 1, S. 5—9.
119. Maidl B., Guthoff K. Industrierobotereinsatz in der Spritzbetonforschung. // BMT 36 (1989) Nr. 1, S. 5—9.
120. Stolzka G. Schildvortriebskontrolle im U-Bahnbau. // «VI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessungen hoher Präzision». — Darmstadt, 1976.
121. Koch F. Einsatz des Steuerleitsystems TG 260 «Zollmann beim Schragsschacht in Val d'Isere. // Zeitschrift «Vermessungsingenieur», 1988, S. 105.
122. Marx H.-J. Das automatische Tunnelbau-Führungssystem TUMA. VDI-Schriftreihe, 1988.
123. Bulgakow A. Bauautomatisierung. — Dresden, TU Dresden, 2002. — 98 S.
124. Poppy W. Automatisierung und Roboter im Bauwesen. // 8. Internat. Symposium Automatisierung und Roboter im Bauwesen. — Stuttgart, 1991. — 35—42.

125. Beim Tunnel — Auffahren bewahrt. // Baumaschinen und Bautechnik, 1989, Nr. 1, S. 39.
126. Maeda, J., Miyatake, Y. Improvement of a Computer Integrated and Automated Construction System for High-rise Building and its Application for RC (Rail City) Yokohama Building, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISARC), Pittsburgh PY, 1997.
127. Tanaka Y. Automatic Segment Assembly Robot for Shield Tunneling Machine. // Microcomputers in civil engineering, 1995 (10), p. 325—327.
128. Tanaka Y., Mori Y., Sonoda T., Kagaya H. Development of an automatic segment assembly robot for shield Engineers Annual Conference on Robotics and Mechtronics 94 (in Japanese), 1994, pp. 439—444.
129. Brux G. Automation und Roboter im Tunnelbau. // Tiefbau-BG, 1992, Nr. 2, S. 80—86.
130. Computergesteuerte Tuebbling-Hinterfullanlagen am Eurotunnel. // Tiefbau-BG, 1991, Nr. 3, S. 167.
131. Micro tunnelling systems; Prospekt der Firma LOVAT, 2001.
132. Pipe Jacking mit Microtunneltechnologie. // Prospekt der Firma HERRENKNECHT, 2001.
133. Eckardstein K.-E. Prinzipien des Nassspritzverfahren. // Baumaschinen und Bautechnik, 1993, Nr. 1, S. 13—16.
134. Maidl B. Spritzbetonroboter im Tunnelbau. — VDI-Berichte, Nr. 800, 1990, S. 207—220.
135. Maidl B., Gipperich C. Spritzbetonroboter im Tunnelbau. // Baumaschinen und Bautechnik, 1993, Nr. 6, S. 343—347.
136. Maidl B. Spritzbetonroboter können die Arbeitsbedingungen, die Qualität und die Wirtschaftlichkeit im Tief- und Tunnelbau verbessern. 14<sup>th</sup> International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISARC), Pittsburgh PY, 1997.
137. Frankenberger A. Lieber nass als trocken? // Baugewerbe, 1993, Nr. 19, S. 32—34.

# Содержание

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. Особенности и эффективность роботизации в строительстве.....</b>	<b>5</b>
1.1. Технологические особенности строительных процессов и задачи их роботизации .....	5
1.2. Требования к роботизации строительных процессов.....	11
1.3. Структурная организация роботов и РТК для автоматизации строительных процессов.....	16
1.4. Эффективность роботизации в строительстве .....	21
<b>Глава 2. Манипуляционные системы строительных роботов.....</b>	<b>26</b>
2.1. Принципы построения кинематических схем строительных роботов.....	26
2.2. Кинематические структуры строительных роботов и их специализация.....	33
2.3. Кинематические модели строительных роботов.....	41
2.4. Динамические модели строительных роботов .....	57
2.5. Приводы строительных роботов и их динамические свойства .....	63
<b>Глава 3. Информационно-измерительные системы строительных роботов.....</b>	<b>78</b>
3.1. Измерительные преобразователи параметров манипуляционной системы.....	78
3.2. Сенсорные устройства контроля положения строительных роботов.....	88
3.3. Лазерные информационно-измерительные системы строительно-монтажных роботов .....	97
3.4. Ультразвуковые системы контроля роботов.....	113
3.5. Системы технического зрения строительных роботов .....	118
<b>Глава 4. Планирование траекторий движения робота при выполнении операций.....</b>	<b>127</b>
4.1. Постановка задачи планирования движения строительных роботов.....	127
4.2. Построение каркаса траектории движения робота.....	132

---

4.3. Планирование движений манипулятора на основе аппроксимации сплайнами.....	146
4.4. Аппроксимирование планируемых траекторий движения .....	154
4.5. Построение прогнозирующих и адаптивных алгоритмов планирования движений .....	160
4.6. Планирование движений манипулятора при работе с системой технического зрения .....	170
<b>Глава 5. Управление строительными роботами.....</b>	<b>176</b>
5.1. Многоуровневый характер управления строительными роботами.....	176
5.2. Дистанционное и интерактивное управление роботами ..	183
5.3. Системы программного управления роботами .....	193
5.4. Адаптивное управление роботами .....	202
5.5. Логическое управление робототехническими комплексами .....	208
5.6. Программное обеспечение и языки программирования роботов .....	212
<b>Глава 6. Роботизация и автоматизация земляных работ .....</b>	<b>227</b>
6.1. Технологические предпосылки и особенности применения средств роботизации в строительстве .....	227
6.2. Бортовые информационные системы землеройных машин.....	233
6.3. Автоматизация выемки и перемещения грунта .....	237
6.3.1. Автоматизация экскаваторов.....	237
6.3.2. Автоматизация бульдозеров.....	245
6.3.3. Автоматизация погрузчиков .....	247
6.4. Роботизированные комплексы для выполнения свайных работ .....	249
<b>Глава 7. Роботизация установки и монтажа строительных блоков и элементов .....</b>	<b>257</b>
7.1. Краны-манипуляторы.....	257
7.2. Мини-краны.....	271
7.3. Кинематические решения строительных роботов для каменной кладки .....	274
7.4. Интеллектуальное управление в системах автоматизации строительных кранов .....	279
7.5. Роботизация процесса каменной кладки.....	284

<b>Глава 8. Автоматизации и роботизация бетонных работ .....</b>	<b>300</b>
8.1. Системы автоматизации приготовления бетонной смеси.....	300
8.2. Роботы для подачи и укладки бетона .....	304
8.3. Принципы управления мехатронным скользящим комплексом .....	313
8.4. Планирование движений мехатронного комплекса .....	318
<b>Глава 9. Роботы и роботизированные комплексы для отделочных работ.....</b>	<b>325</b>
9.1. Характеристика штукатурных работ и их технологические особенности .....	325
9.2. Основные направления роботизации штукатурных работ и требования к штукатурным роботам.....	330
9.3. Технология автоматизированного выполнения штукатурных работ .....	334
9.4. Принципы построения штукатурных роботов .....	343
9.5. Конструктивное исполнение штукатурных роботов.....	355
9.6. Роботизированные штукатурные комплексы .....	361
<b>Глава 10. Автоматизация и роботизация работ в подземном строительстве.....</b>	<b>368</b>
10.1. Требования к проведению подземных строительных работ .....	368
10.2. Автоматизированное управление тоннелепроходческими щитами .....	369
10.3. Управление мобильными установками для бурения шпуров .....	382
10.4. Роботизированные комплексы для укладки тубингов ..	388
10.5. Автоматизация строительства мини-тоннелей .....	403
10.6. Роботы для торкретирования сводов тоннелей .....	410
<b>Глава 11. Роботизация строительных операций.....</b>	<b>426</b>
11.1. Технологические предпосылки и особенности применения средств роботизации в строительстве .....	426
11.2. Роботизированные комплексы для выполнения монтажных работ .....	432
11.3. Роботизация производства бетонных работ.....	445
11.4. Роботы и роботизированные комплексы для штукатурных работ .....	452
11.5. Малярные роботы и роботизированные комплексы.....	459

11.6. Роботизация земляных и свайных работ.....	464
<b>Заключение .....</b>	<b>470</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>473</b>

*Серия «Библиотека инженера»*

**Булгаков Алексей Григорьевич, Воробьев Владимир Александрович,  
Попов Валерий Петрович**

# **Промышленные роботы**

## ***Кинематика, динамика, контроль и управление***

Ответственный за выпуск

**В. Митин**

Технический редактор

**Д. Соснин**

Макет и верстка

**А. Иванова**

Обложка

**Е. Холмский**

*ООО «СОЛОН-ПРЕСС»*

*123242, г. Москва, а/я 20*

*Телефоны: (495) 254-44-10, (495) 252-36-96, (495) 252-25-21*

*E-mail: solon-avtor@coba.ru*

По вопросам приобретения обращаться:

**ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»**

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, [www.abook.ru](http://www.abook.ru)

**ООО «СОЛОН-ПРЕСС»**

103050, г. Москва, Дегтярный пер., д. 5, стр. 2

Формат 60×88/16. Объем 30,5 п. л. Тираж 1000 экз.

**Отпечатано в ООО «Арт-диал»**

143983, МО, г. Железнодорожный, ул. Керамическая, д. 3  
Заказ №