

#### 4.6. Рекуперация энергии в приводах

Приводы роботов работают в основном в переходных циклических режимах типа разгон-торможение. Поэтому одним из важных способов экономии энергии у них может служить использование идеи рекуперации энергии. Это наиболее важно для мобильных роботов с автономным энергопитанием. Кроме того, при этом часто повышается и быстродействие. Рекуперация энергии основана на ее запасании в процессе торможения и отдачи при последующем разгоне. Существуют два основных способа такого запасаения энергии: запасаение механической энергии с помощью маховиков, пружин и т. п. и электрической — в аккумуляторах, конденсаторах, индуктивных катушках и т. п.

Принцип рекуперации механической энергии с помощью пружин получил применение в отечественных цикловых промышленных роботах, которые благодаря этому не имеют аналогов в мире по своим энергетическим характеристикам. В цикловой привод, который совершает запрограммированное движение из одного крайнего положения в другое, введена пружина. Она растягивается при движении привода из среднего положения в одном направлении и сжимается при движении в другом. При этом привод совершает циклическое движение в режиме резонансных незатухающих колебаний с нулевой скоростью в крайних точках. Двигатель привода осуществляет только подпитку энергией пружины в середине пути при максимальной скорости движения, восполняя потери энергии на выполняемую приводом работу. При этом в конечной точке движения не происходит удара об упор с бесполезным рассеянием накопленной приводом кинетической энергии. В результате в 3-4 раза снижается энергопотребление и соответственно может быть уменьшена мощность двигателя в приводе [7]. Аналогичный эффект можно получить в приводах захватных устройств манипуляторов [8].

На рис. 4.15 приведена схема электрического привода с рекуперацией электрической энергии [9]. Энергия, которая возвращается в источники в режиме рекуперативного торможения, запасается в индуктивности  $L$ . Ключи  $K_2$ ,  $K_4$  предназначены для реверсного управления двигателем от двухполюсного источника  $E_1$ ,  $E_2$ , а ключи  $K_1$ ,  $K_3$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  — для осуществления режима рекуперации. В режиме движения под действием двигателя  $D$  ключи  $K_1$  и  $K_4$  замкнуты, а ключи  $K_3$  и  $K_5$  разомкнуты. Режим рекуперации включается при торможении, когда знаки производной от заданной скорости и скорости двигателя разные. Для этого устройство управления размыкает ключи  $K_1$  и  $K_6$ , замыкает  $K_3$ ,  $K_5$  и инвертирует  $K_2$  и  $K_4$ . Аналогичные схемы разработаны с использованием в качестве накопителей энергии конденсаторов.

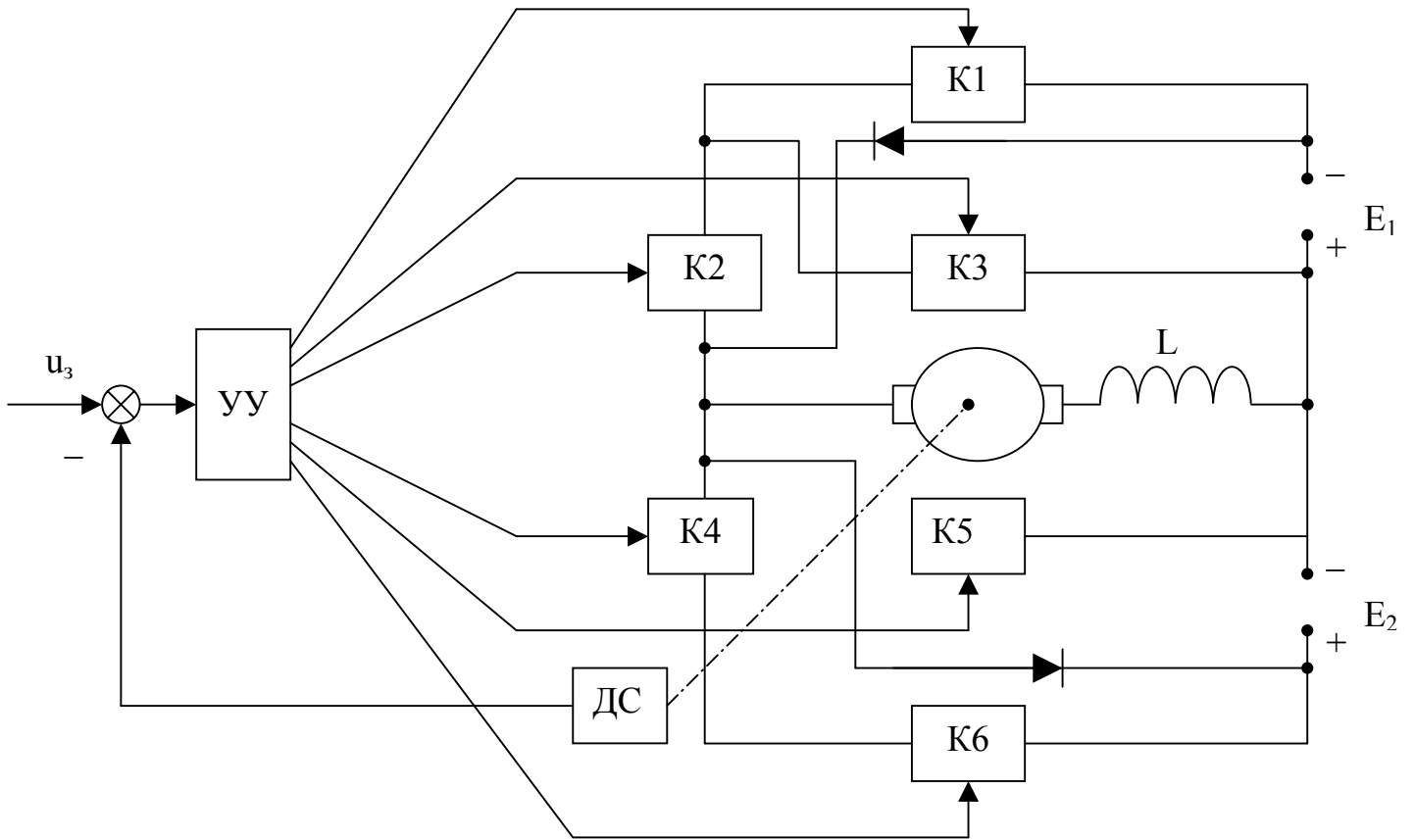


Рис. 4.15. Схема системы управления приводом мобильного робота с рекуперацией энергии: Д — двигатель;  $E_1$ ,  $E_2$  — источники напряжения постоянного тока; УУ — устройство управления; ДС — датчик скорости; К — ключи; L — индуктивность

#### 4.7. Искусственные мышцы

Важным бионическим направлением в робототехнике является создание приводов типа искусственная (техническая) мышца. Современные приводы, применяемые в робототехнике, по своим массогабаритным параметрам на порядок уступают поперечно-полосатым мышцам животных и человека (см. главу 2). Учитывая, что параметры приводов в значительной степени определяют массогабаритные и энергетические характеристики роботов в целом, это определяет интерес к проблеме создания технических аналогов таких мышц.

Одна из очевидных причин неудовлетворительных массовых параметров современных приводов по сравнению с мышцами – это применение в них металлов, особенно ферромагнитных в электрических двигателях. Поэтому первыми разработками приводов, получивших название искусственная мышца, были пневматические приводы, в которых цилиндр с поршнем заменялся эластичной трубкой (резина, полимеры) в оплетке крест-накрест (нейлон). При подаче в трубку воздуха под давлением оплетка заставляет трубку раздуваясь сокращаться на величину до одной трети длины, имитируя работу мышцы. Такие приводы имеют в 3-4 раза меньшую массу, чем пневматические цилиндры на ту же мощность, и поэтому они получили применение, в частности, при протезировании конечностей. Источником сжатого газа при этом служат обычно одноразовые баллончики.

На рис. 4.16 показано устройство реверсивного привода такого типа, примененно-

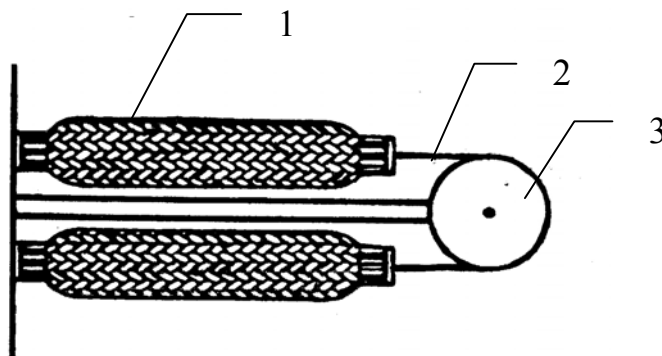


Рис.4.16. Реверсивный гибкий пневматический привод фирмы «Бриджестоун»:  
1 – гибкий пневматический привод; 2 – трос; 3 – блок.

го в промышленном роботе «Софтартм» фирмы «Бриджестоун» (Япония). Устройство состоит из двух пневматических приводов одностороннего действия. При повышении давления в одном из них и одновременном понижении на ту же величину в другом первый привод сокращается, а второй удлиняется. В результате через трос происходит поворот блока, который связан со звеном манипулятора. Угол поворота блока практически прямо пропорционален разности давлений в приводах. Грузоподъемность шарнирного манипулятора с пятью степенями подвижности робота «Софтартм» – 3 кг при массе 5,5 кг. Погрешность позиционирования – 1.5 мм.

На рис.4.17 показан вариант пневматической искусственной мышцы, в которой газ под давлением получается непосредственно в самой трубке в результате нагрева электрическим током [10]. При прохождении электрического тока по термоэлементу 3 наполнитель 4 нагревается и выделяет газ. В результате внутри трубки повышается давление и она раздуваясь сокращается по длине. После отключения тока наполнитель охлаждается, вновь поглощая выделившийся газ, и мышца приходит в исходное состояние.

Длина мышцы – 150-300 мм, диаметр 3-5 мм. Величина сокращения – 10-15 %.

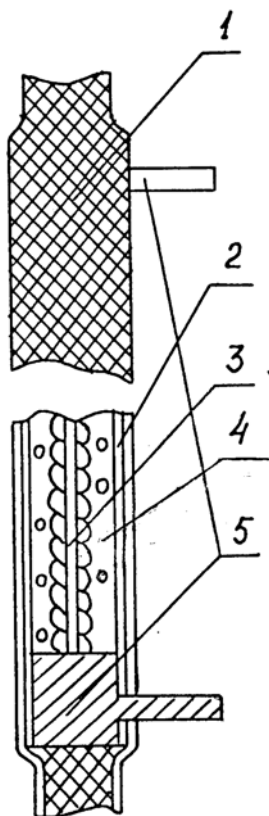


Рис.4.17. Сорбиционная искусственная мышца:

1 – хордовая оболочка; 2 – эластичная трубка; 3 – термоэлемент; 4 – наполнитель; 5 – электрические выводы.

Развиваемое усилие – 100-300 гр., при массе мышцы – единицы грамм. Главный недостаток этой мышцы – очень низкое быстродействие: время сжатия больше 30 с, а обратного расслабления еще в 2-3 раза больше. Другой вариант подобной пневматической мышцы с тепловым воздействием – заполнение трубки легкокипящей жидкостью с воздействием на нее внешним источником тепла.

Разновидностью пневматических искусственных мышц являются аналогичные устройства с заменой оплетки продольными тяговыми нитями. Такие конструкции имеют лучшие тяговые характеристики и развивают большие усилия. Еще большие тяговые усилия можно получить при замене газа жидкостью под давлением, т.е. при переходе к гидравлическим искусственным мышцам. Кроме того, такие гидравлические искусственные мышцы обладают более

высокой точностью позиционирования и лучшей динамикой как все гидравлические приводы по сравнению с пневматическими.

Наряду с описанными пневматическими и гидравлическими приводами типа искусственная мышца существуют близкие им эластичные приводы, в которых работа совершается за счет изгибных деформаций эластичных полостей. Пример такого привода типа «хобот» был приведен на рис.3.10,б. Однако поскольку в этом случае используется деформация не сжатия как у мышц, а изгиба эти приводы формально не относятся к искусственным мышцам. В среднем описанные пневматические и гидравлические искусственные мышцы по сравнению с аналогичными традиционными приводами (цилиндрами) в 3 раза легче, в два раза меньше по габаритам и развивают в десятки раз большее усилие на единицу веса.

Наряду с рассмотренными реализованными в конкретных конструкциях типами пневматических и гидравлических искусственных мышц в мире ведутся интенсивные исследования и разработки искусственных мышц, основанных на других физических принципах. Наиболее близки к рассмотренным устройствам разработки электромагнитных и электростатических искусственных мышц.

Электромагнитная искусственная мышца состоит из многовитковой обмотки, сжатой в жгут, в котором проводники с электрическим током противоположного направления прижаты друг к другу. При пропускании по ним тока они вследствие электромагнитного силового взаимодействия расходятся в поперечном направлении. В результате длина жгута сокращается подобно описанному выше сокращению пневматических и гидравлических мышц.

Электростатическая искусственная мышца имеет форму цилиндра, по оси которого расположен центральный электрод, а по образующим цилиндра соединенные друг с другом гибкие периферийные электроды. При подаче на центральный и периферийный электроды электрического потенциала возникает электрическая сила, которая отталкивает периферийные электроды от центрального. В результате периферийные электроды изгибаются, вызывая сокращение мышцы. Другой вариант электростатической мышцы представляет собой столбик, составленный из тонких металлических дисков (пленок), разделенных упругими изолирующими прокладками. Все нечетные и все четные диски соединены друг с другом. При подаче на них электрического напряжения разной полярности диски сближаются, сжимая изолирующие прокладки, и мышца сокращается. Вместо изолирующих прокладок может быть использован газ.

Следующий тип искусственных мышц – это мышцы на ионизированных полимерных гелях и ионных полимерно-металлических композитных материалах. В электрическом поле молекулы этих материалов ионизируются и испытывают механические силы, которые вызывают деформацию (изгиб) материала в направлении перпендикулярном градиенту электрического поля. На этом принципе был создан, в частности, пятипальцевый хват для манипуляторов[11].

Разрабатываются также искусственные мышцы на базе различных искусственных волокон, деформируемых под действием химических реагентов. Для всех их характерным является низкое быстродействие (секунды) и величины хода

(деформации) порядка 10-15 %. Общим достоинством всех предложенных приводов типа искусственная мышца является в несколько раз лучшие массогабаритные параметры по сравнению с традиционными приводами.

## **ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ.**

### **5.1. Классификация систем управления.**

Управление роботами осуществляет его устройство управления (см.рис.В.1). В совокупности с сенсорной и исполнительными системами оно образует систему автоматического управления робота. Кроме того, через устройство управления роботом может управлять человек-оператор.

Согласно данной ранее классификации в роботах применяются три способа управления – программное, адаптивное и интеллектуальное. Практически только программное управление нашло применение в чистом виде, да и то часто и к нему добавляют элементы адаптации. В целом же все эти три способа управления применяются комплексно. Адаптивное управление обычно строится на базе программного как следующий уровень управления. Интеллектуальное управление в свою очередь реализуется как надстройка над первыми двумя уровнями. Названия систем управления конкретных роботов обычно определяется основным использованным в ней способом управления.

По степени участия человека-оператора в процессе управления различают системы

- автоматического,
- автоматизированного и
- ручного управления.

По типу движения исполнительных систем существуют системы управления

- непрерывные (контурные),
- дискретные позиционные (шагами «от точки к точке») и
- дискретные цикловые (по упорам, как правило, с одним шагом по каждой координате).

По управляемым переменным различают системы управления

- положением (позицией),
- скоростью,
- силой (моментом).

Часто эти способы управления применяют в комбинации либо разные способы по разным координатам, либо с последовательным переходом от одного к другому, либо, наконец, в виде функциональной зависимости управляемой переменной от другой (например, управление по силе, величина которой задается как функция от положения).

## 5.2. Системы программного управления.

### 5.2.1. Системы дискретного циклового управления.

Такое управление, как уже упоминалось, имеют практически все пневматические роботы (см. параграф 4.2). Процесс управления отдельными приводами сводится к однократному разгону, движению с постоянной скоростью и торможению при достижении упора. Программирование робота заключается в установке на каждом приводе этих упоров, которые определяют величину перемещения по соответствующей степени подвижности (см., например, на рис.4.5), скорости этих перемещений, последовательности включений приводов и возможных задержек времени между этими включениями. Все эти операции кроме установки упоров проводятся с помощью переключателей (см. рис.4.7) или других органов на пульте устройства управления. Вследствие простоты циклового управления для роботов с таким управлением, как правило, применяют устройства группового управления. На рис.5.1. показано одно из таких отечественных устройств, которое имеет 512 управляющих выходов на приводы с возможностью организации локальной сети.

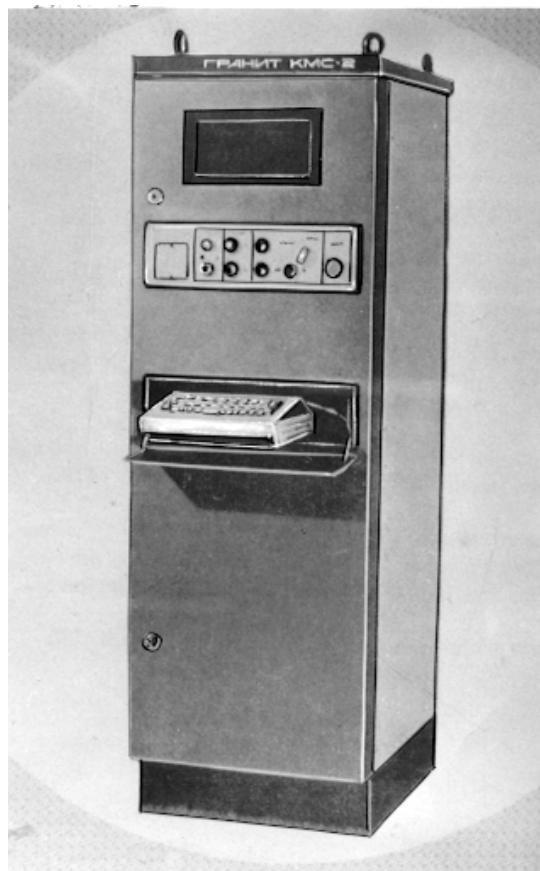


Рис.5.1. Унифицированное устройство группового циклового программного управления “Гранит КМС-2”.



### 5.2.2. Системы дискретного позиционного управления.

Типичные роботы с таким управлением – это промышленные роботы для точечной сварки, сборки и обслуживания различного технологического оборудования. К таким роботам относятся роботы, показанные на рис.1.5, 1.6, 3.6, 3.8.

Эти роботы имеют большое число (десятки) точек позиционирования рабочего органа манипулятора. В отличие от систем циклового управления здесь точность позиционирования обеспечивается не упорами, а точностью отработки приводами с обратной связью по положению заданных управляющей программой точек позиционирования. (Исключение составляют разомкнутые системы на шаговых приводах.)

Системы программного управления роботом первоначально были заимствованы из систем ЧПУ технологического оборудования, но они существенно сложнее последних, прежде всего из-за большего числа степеней подвижности и их взаимосвязанности. Процесс дискретного позиционного программного управления манипулятором выглядит следующим образом. В устройстве управления обычно на магнитном носителе хранится управляющая программа, которая состоит из занесенных на отдельные параллельные дорожки программ для отдельных приводов. Эти программы представляют собой последовательность численных значений шагов позиционирования привода данной степени подвижности. Отработка управляющей программы заключается в одновременной подаче на все приводы значений очередного шага и отработке приводами этого задания. После того как все приводы остановятся, рабочий орган манипулятора займет соответствующую очередную позицию в пространстве и ориентацию. После этого управляющая программа выдаст команду на выполнение приводами следующего шага и т.д. В результате рабочий орган манипулятора будет перемещаться шагами по запланированной дискретной траектории, останавливаясь после каждого шага.

Программирование, т.е. синтез управляющей программы, осуществляется методом обучения на самом роботе или аналитически на ЭВМ. Первый способ программирования, так же в свое время заимствованный у систем ЧПУ технологического оборудования, применительно к манипуляторам имеет два варианта. В первом варианте оператор в режиме ручного управления отдельными приводами последовательно устанавливает рабочий орган манипулятора в заранее выбранные точки заданной программной траектории. При этом в каждой такой точке в память устройства управления заносятся значения сигналов с датчиков положения всех приводов. В результате прохождения таким образом всей траектории в устройстве управления оказывается записанной соответствующая ей управляющая программа. После пробного ее воспроизведения и при необходимости корректировки в отдельных точках программа готова к работе.

Развитием этого способа программирования методом обучения стало использование системы технического зрения и персонального компьютера. На время программирования на рабочем органе манипулятора крепится передающая телевизионная камера, которая передает изображение объектов внешней среды, с которыми манипулятору предстоит работать, на экран персонального компьютера. Управление манипулятором осуществляется при этом с помощи мыши или других аналогичных средств путем одновременного скоординированного воздействия на приводы манипулятора. Последние вычисляются компьютером в соответствии с заданием от оператора. Достоинство этого варианта программирования в существенном ускорении этого процесса.

Второй вариант программирования методом обучения заключается в перемещении рабочего органа манипулятора рукой оператора и записи при этом показаний датчиков положения приводов как в предыдущем варианте. Для выполнения такой операции на рабочем органе предусматриваются специальные ручки, а в конструкции самого манипулятора – возможность отсоединения приводов от его механической части, чтобы дать возможность оператору беспрепятственно ее перемещать. Таким образом этот вариант программирования требует соответствующего изменения конструкции манипулятора. Примером такого манипулятора, правда, с рассматриваемым ниже непрерывным управлением, является манипулятор робота «Коат-а-Матик», описанного в главе 4 (см.рис.4.9,4.10).

Развитием этого варианта программирования обучением стало применение съемной многостепенной задающей рукоятки, которая укрепляется на время этой операции на рабочем органе манипулятора. Оператор, смещая рукоятку с нейтрали в нужном направлении, осуществляет перемещение рабочего органа путем управления приводами манипулятора через его устройство управления с помощью контактов задающей рукоятки. Этот вариант программирования, таким образом, применим ко всем манипуляторам, не требуя отсоединения приводов как в исходном варианте.

Аналитический способ программирования позволяет синтезировать управляющие программы на ЭВМ, не задействуя робот. По существу, в этом случае вместо робота используется его математическая модель, с помощью которой и осуществляется процесс программирования подобно тому, как это делается на реальном роботе. При этом для получения математической модели требуемой точности с робота необходимо регулярно снимать соответствующие характеристики. Такой способ программирования не требует отключения робота на время программирования от технологического процесса, в котором он задействован. Поэтому будущее за аналитическим способом программирования.

### **5.2.3. Системы непрерывного управления.**

Типичные роботы с непрерывным (контурным) управлением – это промышленные роботы для дуговой сварки и резки, для нанесения покрытий. Пример такого робота показан на рис.4.10. Главное отличие этих роботов от роботов с рассмотренным выше дискретным позиционным управлением состоит в том, что движение по программной траектории осуществляется без остановок. Это требует от приводов большего быстродействия и приводит к принципиальному различию их программирования. Если, например, записать управляющую программу для манипулятора с непрерывным управлением методом обучения, перемещая его рабочий орган по требуемой программной траектории на небольшой скорости, а затем воспроизвести эту программу на существенно большей скорости, какая требуется по технологии, то из-за неизбежного динамического запаздывания рабочий орган на всех изгибах траектории будет сходить с нее. Это динамическая ошибка будет возрастать с увеличением скорости движения. Поэтому управляющие программы при таком методе программирования обучением необходимо корректировать и отрабатывать на заданной реальной скорости, с которой программная траектория должна воспроизводиться. То же относится, разумеется, и к аналитическому программированию: здесь необходима динамическая математическая модель робота, в то время как при дискретном позиционном управлении требуется кинематическая модель.

При программировании систем непрерывного управления методом обучения помимо запоминания непрерывного перемещения приводов нашел применение существенно более простой способ, когда запоминаются только ряд дискретных позиций на программной траектории, а участки траектории между ними формируются при воспроизведении программы с помощью интерполятора в виде стандартных математических функций. Выбор точек на программной траектории производится с учетом кривизны траектории: чем она больше, тем меньше берется расстояние между точками. Достоинство такого способа программирования в резком сокращении требуемого объема памяти устройства управления, а недостаток – в меньшей точности воспроизведения программной траектории. Аппаратно соответствующее устройство управления представляет собой устройство дискретного позиционного управления, дополненное интерполятором, т.е. оно пригодно для роботов с любым из этих способов управления.

### **5.2.4. Системы управления по силе.**

Наряду с управлением перемещением в манипуляторах часто требуется управление силой, с которой рабочий орган манипулятора воздействует на объекты внешней среды. Это необходимо при выполнении таких

технологических операций как зачистка, шлифовка и полировка поверхностей, механическая сборка и т.п. Для осуществления управления силой рабочий орган манипулятора снабжается сенсорным устройством измерения вектора силы (например, тензометрическим), которое обычно устанавливается непосредственно перед рабочим органом. Программа управления величиной силы обычно заключается в поддержании ее постоянного значения или в изменении в функции от перемещения. Возможен и обратный вариант управления перемещением в функции от развиваемой силы воздействия на среду. Последние варианты называются позиционно-силовым управлением.

Строго говоря, управление с использованием информации о силе должно относиться уже к адаптивному управлению, так как эта информация относится к внешней среде, хотя в его основе и лежит программное управление.

### **5.3. Системы адаптивного управления.**

Рассмотренные выше системы программного управления роботами основаны на наиболее простом способе автоматического управления без обратной связи по фактическому состоянию внешней среды, с которой взаимодействует робот. В связи с этим такие системы применимы только при полностью детермированных и неизменных на протяжении всего процесса управления внешних условиях работы, а также целях управления и параметрах самого робота. Адаптивное управление осуществляется в функции от параметров внешней среды и поэтому позволяет обеспечить достижение цели управления при непостоянстве или неполной априорной информации об этих параметрах. Примерами простейших задач, которые могут быть решены с помощью адаптивного управления, являются взятие произвольно расположенных или подвижных предметов путем наведения на них захватного устройства манипулятора, выбор и взятие предметов из ряда других по определенным признакам (форма, цвет и т.д.), обход непредвиденных препятствий и т.п. Для осуществления такого управления робот должен быть снабжен сенсорными устройствами, которые были рассмотрены в параграфе 3.5.

При адаптивном управлении, разумеется, максимально используют и заранее составленные программы для выполнения тех частей задания, которые могут быть реализованы этим простым способом. Таким образом, в общем случае в системах адаптивного управления используются оба способа управления – программное и в функции от текущей информации о внешней среде. Примером системы адаптивного управления является система управления промышленным роботом для дуговой сварки. Сам процесс сварки ведется по программе, однако перед этим автоматически осуществляется поиск места стыка свариваемых деталей, затем движение

вдоль стыка при определенных ориентации и расстоянии электрода относительно стыка. Эти задачи реализуются с помощью различного типа датчиков угла наклона и расстояния (например, индуктивных и контактных), которые размещены на сварочной головке манипулятора. Другим примером робота с адаптивным управлением является окрасочный робот с простейшей системой технического зрения, которая служит для определения контура очередного окрашиваемого изделия.

**Обобщенная структурная схема системы управления оцувствленным роботом.** На рис.5.2 показана обобщенная структура системы управления оцувствленных роботов, к которым относятся и рассматриваемые роботы с адаптивным управлением. Она включает пять уровней управления У1 – У5.

Связь человека-оператора с роботом осуществляется через пульт. Оператор выдает роботу задания, контролирует их выполнение и проводит общий контроль за процессом функционирования робота в целом.

*Пятый (верхний) уровень* автоматического управления У5 анализирует задания, поступающие от человека-оператора, и определяет последовательность действий робота в соответствии с заданием, т.е. планирует действия робота. На этом уровне анализируется информация о внешней среде, получаемая от сенсорной системы, и синтезируются модели, на базе которых выполняется планирование действия робота. В общем случае модели внешней среды образуют иерархическую последовательность от первичной, наиболее конкретной модели, которая описывается с помощью параметров среды, непосредственно определяемых сенсорными устройствами, и далее до все более абстрактных моделей, использующих соответственно более обобщенные понятия для описания внешней среды. В процессе функционирования робота модели внешней среды корректируются и совершенствуются.

Пятый уровень управления отвечает за функционирование робота как единой системы, обеспечивая реализацию не только основных, «профессиональных» функций робота, но и служебных общесистемных задач, которые определяются требованиями к условиям функционирования робота (обеспечение надежности, включая защиту от внешних воздействий и внутренних неполадок, условий безопасности и т.д.). Уровень У5 определяет в целом интеллектуальные возможности робота и круг решаемых им задач.

*Четвертый уровень* управления У4 — это уровень синтеза функционально законченных сложных действий, в результате которых решается конкретная задача, например, сборка какого-либо изделия. В соответствии с планом, выработанным для этого на вышестоящем уровне У5, на уровне У4 производится его разбиение на последовательность элементарных типовых операций, которые реализуются нижними уровнями

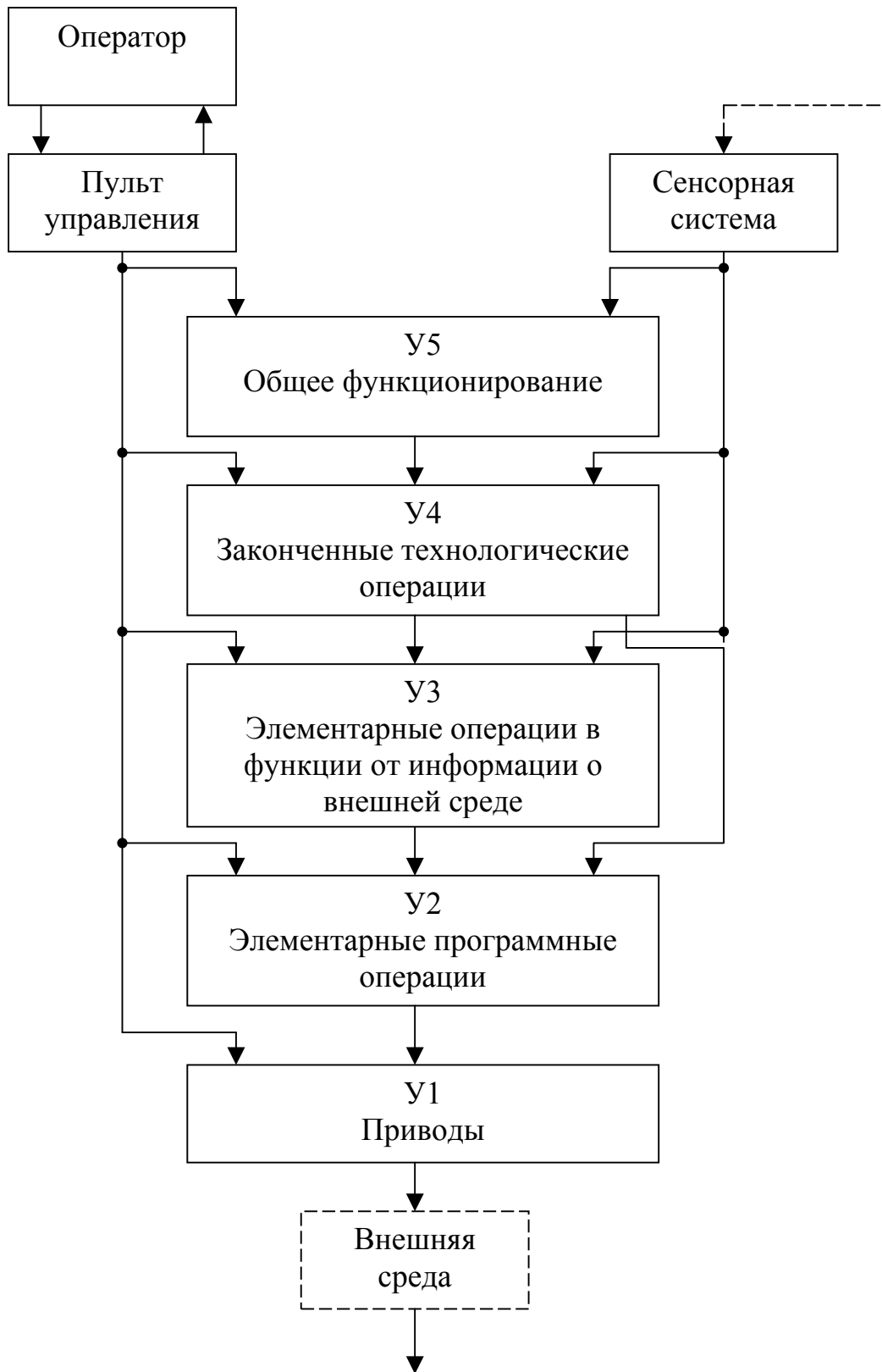


Рис.5.2. Обобщенная структура системы управления оучувствленным роботом.

управления. Так, например, план сборки изделия распадается на последовательность элементарных действий по взятию, ориентированию, соединению и закреплению деталей в узлы, настроечных, контрольно-измерительных и прочих операций. Результатом действия У4 является выдача управлений на последующие уровни У3 и У2. Уровень У4 использует также текущую информацию от сенсорных устройств для оперативной коррекции планов, получаемых с уровня У5.

*Третий и второй уровни* управления У3 и У2 — это уровни выполнения элементарных операций, на которые могут быть разбиты законченные действия робота. Различие между этими уровнями заключается в том, что на уровне У3 синтезируются адаптивные управления в функции от информации о внешней среде, а на уровне У2 — более простые управления по программе. В связи с этим при синтезе управлений на уровне У3 используются наряду с типовыми программами уровня У2 команды на вход уровня У1 параллельно с управляющими воздействиями с выхода уровня У2. В результате поступившее на вход третьего уровня задание реализуется, во-первых, в виде последовательности типовых программ второго уровня, и во-вторых, в виде совокупности управляющих воздействий непосредственно на отдельные приводы уровня У1. Все эти действия в целом задаются и координируются уровнем У3 в зависимости от текущей информации о внешней среде и состоянии самого робота.

На уровне У2 рассчитываются управляющие воздействия, которые затем поступают на уровень У1, реализующий программное управление приводами.

*Нижний уровень* управления У1 реализует управление по отдельным степеням подвижности робота и представляет собой систему управления приводами

Схема системы управления роботом, изображенная на рис.5.2, является упрощенной. На ней не показаны все прямые связи выходов отдельных уровней управления со входами нижних уровней, кроме ближайшего, а также обратные связи выходов нижних уровней со входами верхних (в том числе информация о завершении отдельных заданий, об аварийных ситуациях и т.п.). На схеме не отражены информационные связи отдельных уровней с пультом управления, которые обеспечивают передачу информации о функционировании робота человеку-оператору.

Человек-оператор принципиально может взаимодействовать с роботом на любом уровне иерархии управления. Человек-оператор может выдавать задания роботу непосредственно на уровень У1 путем командного управления каждым приводом отдельно. Такое управление является весьма трудоемким и требует большого навыка. Временное запаздывание в канале связи (например, при управлении космическим манипулятором) еще более усложняет работу в этом режиме. В связи с этим к нему прибегают только в тех случаях, когда по каким-либо причинам другие способы управления

оказываются неприемлемыми.

При управлении роботом через уровни У2 и У3 человек-оператор заменяет уровень У4, задавая на их входы наименования (коды) подлежащих выполнению программно (на У2) или адаптивно (на У3) элементарных операций, после чего следит за их автоматическим выполнением. Такое управление называется супервизорным. Аналогичным образом человек-оператор может управлять и через уровни У4 и У5, задавая уже не элементарные операции, а более сложные законченные технологические процессы.

Развитием супервизорного способа управления является интерактивное управление, которое включает двухсторонний обмен информацией между человеком и роботом в виде диалога. Робот, получив очередное задание от человека, в свою очередь запрашивает его о необходимых уточнениях или информирует о необходимости откорректировать задание, чтобы сделать его выполнимым. Этот режим управления, таким образом, максимально упрощает функции и уровень умения человека-оператора за счет соответствующего алгоритмического усложнения системы управления робота вплоть до наделения его искусственным интеллектом.

Вернемся теперь к системам адаптивного управления роботов. Согласно обобщенной схеме на рис.5.2 такая система должна включать не менее трех уровней управления – У1, У2 и У3. Собственно адаптивное управление реализуется уровнем У3 через уровень программного управления У2 или непосредственно воздействуя на уровень системы приводов У1. В зависимости от степени сложности технологических операций, выполняемых роботом в адаптивном режиме, т.е. с использованием сенсорной информации, система адаптивного управления может включать и остальные верхние уровни управления У4 и У5. Однако обязательной принадлежностью эти уровни являются для системы интеллектуального управления, которая рассматривается в следующем параграфе 5.4.

В качестве примера задачи уровня адаптивного управления У3 рассмотрим элементарную операцию взятия манипулятором произвольно расположенной детали, например, для последующего выполнения операции сборки. Для выполнения этой операции необходимо последовательно произвести следующие действия:

- 1) определить координаты геометрического центра детали и ее ориентацию в пространстве;
- 2) рассчитать траекторию движения схвата к детали в трехмерном пространстве рабочей зоны;
- 3) пересчитать траекторию движения в систему относительных координат приводов робота;
- 4) отработать рассчитанную траекторию;
- 5) произвести взятие детали;





Рис.5.3. Схема алгоритма взятия произвольно расположенного предмета.

- 6) рассчитать траекторию движения схвата манипулятора с деталью в заданное конечное место;
- 7) пересчитать эту траекторию в систему координат робота;
- 8) отработать эту траекторию.

Для установления координат деталей и их ориентации можно использовать различные технические средства, рассмотренные в параграфе 3.5. Например, при транспортировке деталей с помощью конвейера с целью автоматического определения координат деталей можно применить линейку с фотодатчиками, установленную над лентой конвейера. При наличии на обозреваемом поле нескольких деталей необходимо произвести их идентификацию.

Для взятия детали, координаты и ориентация которой уже определены, следует подвести схват робота к детали. При отсутствии ограничений наиболее быстрым является перемещение схвата по прямой, соединяющей исходное и требуемое положения схвата, с равномерным изменением его ориентации. После размещения схвата над деталью робот закрывает схват и опускает его до тех пор, пока не сработает датчик наличия детали в схвате. По его сигналу робот закрывает схват. Далее производится расчет траектории переноса детали в заданную конечную точку рабочей зоны. Схема описанного алгоритма взятия произвольным образом ориентированных деталей и их переноса изображена на рис.5.3.

#### **5.4. Система интеллектуального управления.**

Интеллектуальное управление – это следующий после адаптивного управления наивысший в отношении алгоритмических возможностей тип управления. Робототехника является одной из областей применения такого управления, которое в теории управления в настоящее время находится в стадии становления.

В теории адаптивного управления в результате развития от простого к более сложному стремясь обеспечить автоматическое управление в условиях все большей неопределенности и изменчивости объекта управления и внешней среды сперва был разработан раздел самонастраивающихся систем управления (с автоматической настройкой параметров при неизменной структуре системы), а затем — раздел самоорганизующихся систем управления (с автоматическим изменением структуры систем). В рамках самоорганизующихся систем развивалась теория самообучающихся систем управления, посвященная наиболее совершенной форме управления в современной теории управления, которую можно рассматривать как первый шаг к интеллектуальному управлению, поскольку в ее основе лежат идеи формирования целей управления,

принятия решений и планирования поведения. Как было уже указано в главе 2, при рассмотрении управления движением в живых организмах, эти идеи являются обязательными компонентами интеллектуальной деятельности.

Описанная в предыдущем параграфе обобщенная пятиуровневая система управления оцувствленным роботом, по существу, повторяет структуру системы управления движением человека (см.рис.2.11). Как было показано выше, верхний, пятый уровень этих систем определяет алгоритмические возможности системы в целом, ее интеллектуальный потенциал.

Под интеллектом (см.параграф 2.5) понимается общая, в основном врожденная познавательная способность, включая умение обрабатывать информацию о внешней среде с построением ее моделей и использовать эту информацию для планирования поведения в условиях заведомой неполноты информации и непредсказуемо изменяющейся внешней обстановки.

Принципиальное различие интеллекта искусственного и естественного заключается в том, что первый имитирует естественный интеллект только в части решения определенного типа творческих задач, в то время как естественный интеллект значительно универсальнее и многограннее и включает прежде всего такие аспекты, как социальную обусловленность, мотивацию и эмоциональность.

К типичным таким задачам искусственного интеллекта относятся, например, игровые (шахматы, домино и т.п.) и другие подобные задачи, где невозможен полный перебор вариантов, доказательство теорем, перевод с одного языка на другой. Фундаментальной проблемой искусственного интеллекта является создание модели человеческого мозга и разгадка процесса его мышления.

В создании искусственного интеллекта можно выделить два принципиально различных подхода. Первый подход заключается в разработке общего теоретического решения проблемы на основе адекватного математического аппарата. Работы в этом направлении ведутся, в частности, с использованием лингвистического подхода и теории нечетких множеств. Второй подход близок к эволюционному пути развития естественного интеллекта и заключается в постепенном накоплении частных эвристических находок для решения отдельных конкретных практических задач. Предполагается, что сумма таких частных решений даст по мере их накопления постепенное повышение уровня искусственного интеллекта, а затем откроет качественно новые возможности, прежде всего в результате создания системы самоусовершенствующегося интеллекта. В области робототехники на сегодня наиболее перспективным представляется именно такое последовательное накопление решений конкретных задач.

Естественный интеллект – это способность приобретать и целенаправленно использовать знания. Это значит, что интеллект предполагает наличие хорошо организованной памяти. Человеческие знания

как и сам окружающий мир нечетки и зачастую противоречивы, хотя, конечно, содержат и вполне однозначные четкие фрагменты. Выражаются образно на естественном языке, а их обработка осуществляется параллельно и объемно.

Соответственно программа создания искусственного интеллекта включает два аспекта – программно-алгоритмический и аппаратный. Первый аспект заключается в создании баз знаний на языке высокого уровня близком естественному и алгоритмов работы с ними, основанных на нечетких представлениях и параллельной обработке. Это требует принципиально нового аппаратного обеспечения, которое в отличие от современных «фон-неймановских» компьютеров должно быть подобно нейронным структурам живых организмов.

Сегодня интеллектуальные системы строятся как биотехнические системы, включая системы интеллектуального управления, пока обладают весьма ограниченными интеллектуальными возможностями. В них используют теорию нечетких множеств и нечеткой логики, различные эвристические алгоритмы и технологии экспертных систем, ассоциативной памяти и технических нейронных сетей (обычно в комбинации) [15,16]. Ведутся работы по созданию так называемых нечетких компьютеров, которые оперируют нечеткими данными и выводами. Это требует создания новой нечеткой элементной базы и соответствующего программного обеспечения.

Главная сфера применения интеллектуального управления – это прежде всего сложные и большие объекты и системы, для которых доступно описание только на семиотическом уровне. К ним прежде всего относятся биотехнические системы включающие человека. Поскольку такие системы обладают естественным интеллектом, управление ими может быть так же только интеллектуальным. Вместе с тем интеллектуальное управление может потребоваться и для достаточно простых объектов, если с их помощью решаются интеллектуальные задачи или если сама задача управления ими требует интеллектуального подхода в силу, например, сложности внешних условий. В робототехнике искусственный интеллект может потребоваться прежде всего для решения следующих задач:

- обработка сенсорной информации (фильтрация, сжатие информации, распознавание образов);
- создание моделей внешней среды;
- планирование поведения;
- управление движением;
- создание интеллектуального интерфейса между человеком-оператором и роботом.

Между системами интеллектуального и адаптивного управления нет резкой границы. Интеллектуальные системы являются результатом развития адаптивных систем в направлении расширения возможностей автономного

выполнения все более сложных заданий во все более неопределенной среде и при все большей неполноте информации, требующейся для выполнения этих заданий. В ходе этой эволюции к настоящему времени созданы пока только адаптивные системы с некоторыми элементами искусственного интеллекта в виде способности воспринимать и анализировать достаточно сложную и изменяющуюся внешнюю среду и принимать адекватные решения по поведению. Для качественного скачка в направлении создания полноценных интеллектуальных систем требуется, как сказано выше, прежде всего новое аппаратное обеспечение на принципиально новой элементной базе.

Повышение уровня искусственного интеллекта связано прежде всего с развитием иерархической структуры моделей среды путем формирования все более обобщенных, более абстрактных уровней ее представления. Соответственно будет развиваться и иерархия в системах, решающих перечисленные выше задачи путем перехода от образов внешней среды, непосредственно воспринимаемых сенсорами системы, ко все более абстрактным образам. Следствием этого будет расширение функциональных возможностей робота благодаря возможности автономного решения все более сложных неалгоритмируемых интеллектуальных задач, включая самоусовершенствование в процессе активного взаимодействия с внешней средой при решении конкретных задач.

Одним из наиболее обобщенных типов моделей среды являются логико-лингвистические модели. Они применяются для наиболее сложных объектов с неоднозначной реакцией на одни и те же ситуации, которые не могут быть описаны формально математически и поэтому описывается эвристически на основе экспертных оценок на языке близком естественному. Примеры таких объектов управления – это прежде всего системы, включающие людей. Методы искусственного интеллекта могут применяться в системах управления не только в общесистемном контуре управления, т.е. для формирования управления, но и для решения различных локальных задач отдельных подсистем робота. В этом случае процесс управления роботом, естественно, не становится интеллектуальным, подобно тому, как в системах адаптивного управления наличие внутренней адаптации в отдельных частях системы не делает управление в целом адаптивным. (В этом смысле следует отличать термин «система интеллектуального управления» от более общего термина «интеллектуальная система», который относится к системам, использующим искусственный интеллект для решения любых задач).

На рис.5.4 показана обобщенная схема системы интеллектуального управления роботом, которая представляет собой конкретизацию общей схемы управления оцувствленного робота на рис.5.2 в части применения искусственного интеллекта при решении перечисленных выше пяти задач. В центре схемы находится блок памяти, двусторонне связанный с другими

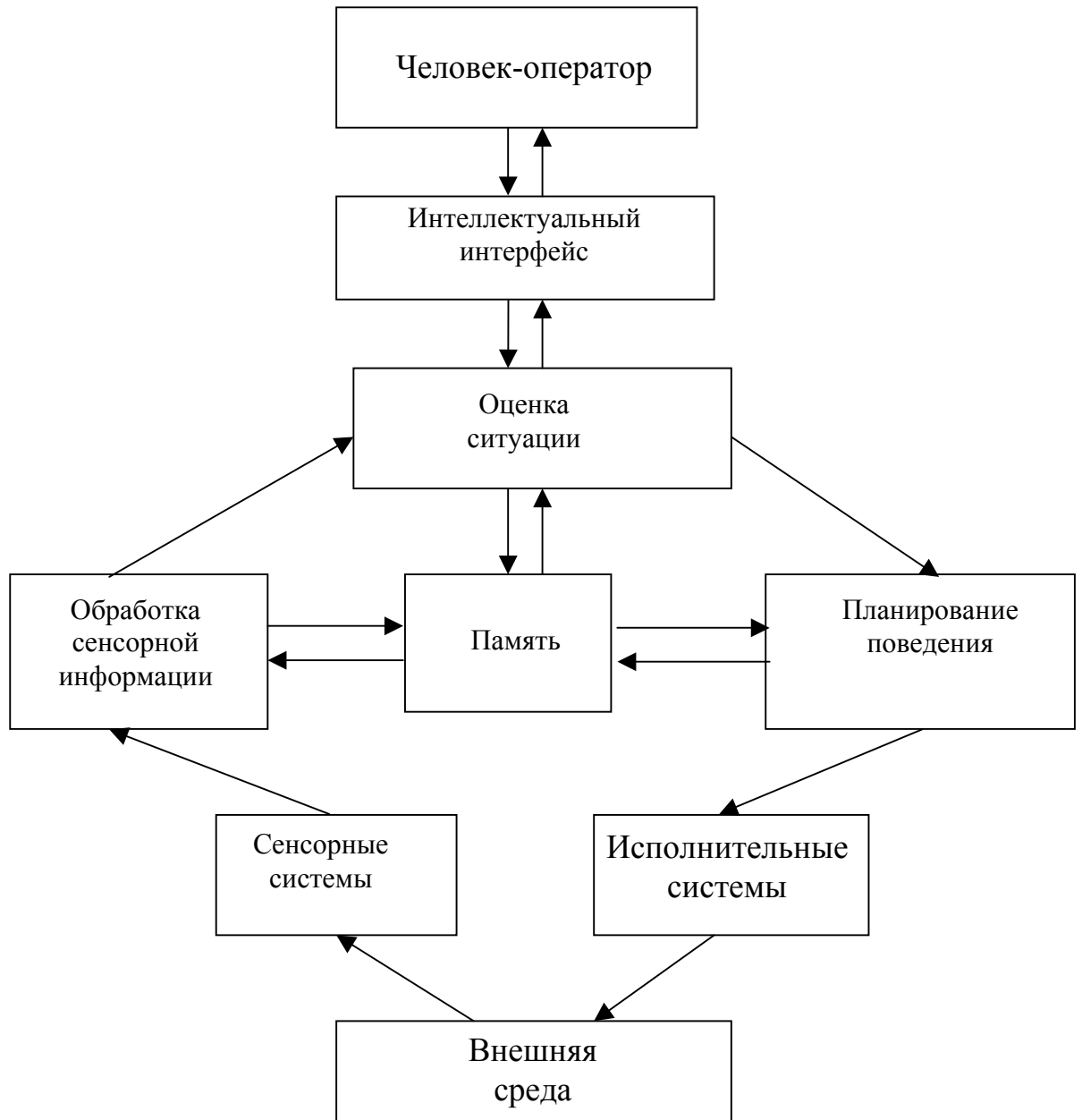


Рис. 5.4. Схема системы интеллектуального управления роботом

системами, перерабатывающими информацию. В этот блок входит база знаний о внешней среде – иерархическая модель внешней среды и база данных как о внешней среде, так и о самом роботе и об операциях, которые он должен выполнять. Кроме того, специализированные оперативные базы знаний и данных, связанные с этой центральной памятью, могут иметься и в отдельных системах робота.

База знаний о внешней среде содержит как априорную информацию, вводимую до начала работы, так и оперативную сенсорную, которая

приобретается в процессе восприятия окружающей среды при выполнении роботом заданных действий, а так же в процессе его специальных познавательных действий для изучения этой среды. Сама информация включает описание геометрических и других физических характеристик объектов среды и их взаимосвязь. Это описание имеет иерархическую структуру. Например, описание рабочей зоны манипулятора включает набор планов всей зоны и ее частей, различающихся как масштабом и соответственно точностью, так и степенью обобщения первичной сенсорной информации (выделение линий, контуров, поверхностей, объектов, групп объектов).

Введение в эти планы (карты) времени как параметра дает картину внешней среды в динамике с учетом взаимодействия ее объектов друг с другом и с роботом. База знаний о внешней среде содержит так же правила, позволяющие моделировать возможные изменения этой среды. Сами знания представляются в виде логических и сетевых моделей среды. Логические модели основаны на аппарате математической логики и прежде всего на исчислении предикатов. Модель строится из системы базовых элементов и системы правил и аксиом. В сетевых моделях вершины сети соответствуют объектам среды, а дуги отношениям между ними. Применяются сети фреймов, описывающих объекты среды, и семантические сети.

Все другие блоки схемы, как уже говорилось, так же имеют иерархическую структуру, уровни которой соединены друг с другом по вертикали снизу вверх. В свою очередь показанные на схеме соединения блоков осуществляются многоканально между одноименными уровнями по горизонтали.

Блок обработки сенсорной информации получает из блока памяти экстраполяцию изменения состояния внешней среды, а передает в него коррекцию этого состояния на уровне непосредственной сенсорной картины среды.

Блок оценки ситуации и блок планирования поведения получают из блока памяти текущую модель внешней среды, а передают в него соответственно ее оценку по определенным критериям и синтезированный план управления движением робота. При синтезе этого плана применяется различные способы решения задач, разработанные в рамках искусственного интеллекта, в том числе

- поиск решения в пространстве состояний (путем нахождения последовательности преобразования исходного состояния в конечное целевое);
- сведением задачи к подзадачам (путем последовательного разбиения задачи на подзадачи вплоть до элементарных, решение которых известно);
- поиск в форме решения теоремы (путем формулирования задачи как теоремы и ее решения (доказательства) на базе системы аксиом).

Блок интеллектуального интерфейса в общем случае должен быть двусторонне связан со всеми перечисленными выше функциональными блоками.

Обратим внимание на ту особенность рассмотренной обобщенной схемы системы интеллектуального управления, как и общей схемы на рис.5.2, что в ней отсутствует в явном виде блок, ответственный за реализацию способа интеллектуального управления, как это имеет место для адаптивного и программного управления. Объясняется это тем, что искусственный интеллект распределен по всем функциональным блокам схемы в соответствии с перечисленными выше функциями, при реализации которых он может требоваться. В конкретных системах он может присутствовать в любом из этих блоков. Именно поэтому вместо термина «системы интеллектуального управления» нашел распространение термин «интеллектуальные системы управления».

В настоящее время применение искусственного интеллекта в системах управления роботами, как уже отмечалось, начинается с введения элементов искусственного интеллекта в системы адаптивного управления на основе применения перечисленных выше интеллектуальных технологий.

### **5.5. Особенности управления средствами передвижения роботов.**

Управление передвижением мобильных роботов - это чисто транспортная задача, которая не имеет принципиальной специфики применительно к робототехнике. Это относится и к самой системе передвижения роботов за исключением маломощных транспортных машин, которые в силу близости их педипуляторов («ног») к манипуляторам традиционно являются специальным разделом робототехники. Однако и этот предмет выходит за рамки настоящего общего курса управления роботами. Поэтому здесь мы остановимся только на особенностях управления передвижением роботов по сравнению с управлением манипуляторами.

Так, рассмотренные в этой главе схемы адаптивного и интеллектуального управления в равной мере относятся к управлению приводами как манипуляторов, так и средств передвижения роботов. Однако последний случай имеет свою специфику, связанную прежде всего с особенностями зоны передвижения по сравнению с рабочей зоной манипулятора, особенно если задача состоит в передвижении по заранее неизвестной, неподготовленной трассе и на значительные расстояния.

Рассмотрим эти особенности применительно к мобильным роботам, передвигающимся по произвольной местности. В этом случае модель этой среды представляет собой карту местности, которая помимо априорных сведений составляется и уточняется в ходе движения на основе сенсорной



информации (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые локаторы, системы технического зрения). Эта модель должна иметь как минимум два уровня по масштабу: один в пределах досягаемости сенсорных систем и второй для местности непосредственно перед роботом. Первая модель местности служит для прокладки маршрута движения в соответствии с заданной целью. Варианты целей: поиск конкретных объектов (по заданным признакам), достижение определенной точки на местности, заданной координатами, движение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (инспекция, нанесения покрытия, очистка и т.д.).

Вторая более подробная модель ближайшего участка местности необходима для уточнения трассы непосредственно перед роботом, включая обход мелких и скрытых препятствий, неотмеченных на общей карте местности первого уровня, и обеспечения безопасности движения.

Однако для гарантированного решения последней задачи этого может оказаться недостаточно и тогда применяется специальная система обеспечения безопасности, которая контролирует углы наклона шасси робота, не допуская превышения их критических значений, определяемых условиями опрокидывания, опасные вертикальные провалы и трещины непосредственно перед роботом, оценивает свойства грунта в отношении его проходимости и, наконец, если возможно появление подвижных препятствий, обеспечивает аварийную остановку робота по сигналу дистанционного или контактного датчика препятствий непосредственно перед роботом.

На рис.5.5 приведена типовая схема системы управления движением мобильного робота. Блок управления движением **БУД** осуществляет управление тяговыми приводами и приводами повтора шасси. Блок построения маршрута синтезирует траекторию движения, оптимизируя ее, обычно, по минимуму расхода энергии, что особенно важно для роботов с автономным энергопитанием, или по минимуму времени выполнения задания, когда в постановку задачи входит условие обеспечения максимального быстродействия. Блок построения карты местности представляет ее в форме, удобной для решения задачи выбора маршрута, в частности, с выделением непреодолимых препятствий и опасных или неясных участков. Если выполнение задачи требует знания большего участка местности, чем дают сенсорные системы в начальном положении робота, т.е. до начала движения, карта местности формируется и передается в блок построения маршрута фрагментами по мере передвижения робота. Такими же участками последовательно осуществляется и синтез траектории движения. В этом случае первое приближение для всей траектории делается по имеющейся априорной информации о местности или, как минимум, определяется только общее направление движения.



Рис. 5.5. Функциональная схема системы управления движением по местности мобильного робота:  
 БУД – блок управления движением

На нижнем общесистемном уровне системы управления находится канал управления движением в ближней зоне, включающий наиболее детальную модель этой зоны и реализующий алгоритмы обеспечения безопасности движения.

Требуемый уровень адаптации и искусственного интеллекта системы определяется степенью неопределенности и сложности местности и характером подлежащих выполнению заданий, т.е. назначением робота. В последнем отношении основное значение имеет минимально необходимая степень автономности управления роботом, определяемая перечнем его действий, которые должны выполняться без участия человека-оператора. При этом учитывается и возможность временной потери связи с оператором, ограниченная пропускная способность каналов связи, неполнота и ограниченная достоверность получаемой оператором от робота информации и ее задержка во времени. Например, если из-за высокого уровня помех в канале передачи оператору не видно изображения панорамы местности перед роботом оператор только эпизодически получает эту информацию, он имеет возможность вмешиваться в автономное движение робота только в порядке контроля и корректировки маршрута движения путем целеуказания отдельных промежуточных точек трассы в моменты ее достоверного наблюдения.

### **5.6. Системы группового управления роботами.**

Робот функционирует, как правило, не изолированно, а совместно с другим оборудованием, в том числе с другими роботами. В связи с этим одной из важных характеристик систем управления роботами является возможность реализации различных вариантов группового управления. Это относится и к управлению несколькими манипуляторами одного робота. Специфика управления манипуляторами одного робота состоит в наличии пространственных и временных ограничений на движения отдельных манипуляторов, которые конструктивно находятся на одном основании и рабочие зоны которых могут пересекаться.

Простейшим вариантом группового управления является управление несколькими автономно действующими манипуляторами. В этом случае каждый манипулятор совершает автономные действия, т.е. не связанные в пространстве и во времени с другими манипуляторами. Примером такого управления может служить управление группой роботов, выполняющих операции по обслуживанию не связанных единиц технологического оборудования.

Следующим вариантом группового управления является такое же управление с наложенными временными взаимными связями на движения манипуляторов. В простейших случаях эти связи сводятся к установлению определенной последовательности выполнения каждым манипулятором

своей индивидуально заданной операции. К более сложному случаю относится полностью синхронизированная параллельная работа манипуляторов.

Следующим вариантом по пути усложнения задачи группового управления является совместное выполнение манипуляторами общей работы, требующей взаимной координации их движений в пространстве общей рабочей зоны. (Например, сборка одного изделия двумя манипуляторами на одном рабочем месте.) Возможны несколько режимов такой совместной работы манипуляторов: квазиавтономное управление, иерархическое подчинение и равноправное взаимодействие. В квазиавтономном режиме общее задание разбивается на операции, которые выполняют отдельными манипуляторами при учете определенных, наложенных на их движения пространственных и временных ограничений, обеспечивающих взаимную развязку движений манипуляторов. Режим управления с иерархическим подчинением манипуляторов друг другу заключается в том, что один из манипуляторов является основным, а другие оперативно координируют с ним свои движения во времени пространстве. К наиболее высокоорганизованному режиму совместной работы манипуляторов относится режим равноправного взаимодействия. В таком режиме при управлении каждым манипулятором в отдельности предполагается – оперативный учет движений других манипуляторов.

Совместная работа манипуляторов и роботов может происходить как без ограничений на относительные положения рабочих органов, так и с наложением таких ограничений. Операцией с наложенными ограничениями является, например, совместный перенос двумя манипуляторами одного предмета. Такая операция может потребоваться, когда грузоподъемность одного робота ниже требуемой для переноса объекта или при переносе крупногабаритных объектов. Ограничения на относительные координаты могут быть либо механическими, либо аналитическими в виде задания допустимых отклонений (рассогласований).

В целом возможны следующие способы группового управления:

- централизованное управление группой роботов от одного устройства управления;
- децентрализованное групповое управление, когда индивидуальные системы управления роботов перекрестно связаны друг с другом;
- комбинированное управление, являющееся объединением двух первых вариантов.

Все эти варианты могут быть реализованы программно. При централизованном управлении в функции общего устройства управления входит согласование работы индивидуальных устройств управления для организации требуемого взаимодействия отдельных роботов друг с другом и с другим совместно работающим оборудованием. При выходе из строя такого центрального устройства будет нарушена работа всех роботов.

Децентрализованное управление, реализованное на индивидуальных устройствах управления, свободно от данного недостатка, так как отказ одного из этих устройств или линии связи между ними вызовет отказ в работе только одного робота или некоторой их части. Однако в этом случае сложнее изменять алгоритмы взаимодействия роботов, поскольку необходимо изменять структуру изменяющихся связей между отдельными устройствами управления.

Наиболее гибкой и надежной является комбинированная система управления, включающая взаимосвязанные центральное и местные устройства управления.

## Глава 6. Динамика роботов

### 6.1. Основные принципы организации движения роботов

Робот и другие средства робототехники — это типичные динамические объекты, при чем работающие в основном в неустановившихся режимах. С точки зрения математического описания и аналитического изучения эти объекты представляют большие трудности в силу значительного числа степеней подвижности, нестационарности, нелинейностей и высокого порядка описывающих их уравнений. Поэтому основными методами изучения роботов являются их компьютерное моделирование и физический эксперимент.

Прежде чем приступить к математическому описанию роботов рассмотрим некоторые качественные положения, которыми следует руководствоваться при оценке и синтезе их динамических характеристик.

1. Свободные движения манипуляторов должны быть максимально согласованы с вынужденными. (Принцип соответствия свободных и вынужденных движений.)

Иными словами, механическую часть и приводы манипуляторов следует выбирать, исходя из типовых движений, которые должен совершать манипулятор, чтобы его управляемые движения реализовывались наиболее экономно и при этом обеспечивалось высокое качество управления. Например, в параграфе 3.2 при описании систем координат манипуляторов было показано, какие типы движений наиболее просто реализуются в каждой системе координат.

2. Управляемое движение в общем случае должно содержать две фазы — грубую и точную. (Принцип последовательного разделения движений.)

Как было указано в главе 2, в движениях человека четко различаются две составляющие: быстрое, но неточное “баллистическое” движение и медленное, более точное и осмысленное движение в завершающей фазе. Такое разделение является компромиссным решением терминальных задач с противоречивыми требованиями по скорости и точности движения. Аналогичным образом необходимо строить и движения роботов: на разных этапах движения оперировать разными критериями качества и соответственно получать разные способы реализации движений, включая разные способы управления.

Например, при приближении рабочего органа манипулятора к объекту, с которым предстоит выполнение какой-то технологической операции, возможен переход от программного к адаптивному управлению по относительным координатам, связанным с этим объектом. Аналогично при управлении передвижением мобильного робота при приближении к месту остановки обычно переходят от управления по скорости к позиционному управлению.

3. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть согласованы исходя из задачи общего движения робота. (Принцип параллельного разделения движений.)

Требуемые движения рабочего органа манипулятора реализуются как совокупность его составляющих по отдельным степеням подвижности. Соответственно этому требования, предъявляемые к результирующему движению (по точности, быстродействию, грузоподъемности и т. д.), должны быть оптимально распределены между этими составляющими, которые реализуются с помощью определенных приводов и кинематических схем, исходя из критериев оптимальности, относящихся к манипулятору в целом (в том числе с учетом его массы, энергопотребления, стоимости, надежности и т. д.).

Например, целесообразно выбирать кинематику манипулятора таким образом, чтобы к степеням подвижности, которые определяют грузоподъемность всего манипулятора, требования по качеству управления были наиболее облегченными, и, наоборот, чтобы были максимально разгружены приводы, обеспечивающие заданную точность позиционирования. Аналогично следует подходить к разделению требования по быстродействию.

4. Различные способы управления движением должны применяться в оптимальном сочетании и при максимальном использовании априорной информации, исходя из общих требований к заданному движению манипулятора. (Принцип сочетания различных способов управления.)

В управлении манипулятором, включая как общие уровни управления, так и управление приводами отдельных степеней подвижности, должны обоснованно сочетаться различные виды автоматического управления — программное, адаптивное, интеллектуальное, а также управление человеком-оператором. Иными словами, это управление как для отдельных составляющих движения по отдельным степеням подвижности, так и по фазам во времени в общем случае должно быть комбинированным. При этом в основе выбора способов управления, как и в предыдущем случае, должна лежать оптимизация по общесистемным критериям качества. Из этого следует, в частности, что для упрощения задачи управления, во-первых, необходимо максимально использовать априорную информацию, как о внешней среде, так и о работе. Для этого надо стремиться максимально детерминировать внешнюю среду, например, при необходимости осуществлять распознавание ее объектов, прибегать к их маркировке и т. д. (см. ниже пункт 8). Во-вторых, необходимо по возможности снизить требования к качеству управления путем применения, в частности, автоматической компенсации влияния возмущающих факторов (нестабильность внешней среды, параметров энергопитания и т. д.).

5. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально распределены по времени. (Принцип оптимальной последовательности движений по степеням подвижности.)

Движения по отдельным степеням подвижности принципиально могут выполняться одновременно, последовательно и в различных промежуточных комбинациях. В первом предельном случае, очевидно, обеспечивается наибольшее быстродействие перемещения рабочего органа манипулятора, а во втором — при последовательном включении степеней подвижности — могут быть максимально упрощены

управление и система приводов (вплоть до применения одного привода для нескольких степеней подвижности). В каждом конкретном случае существует определенная оптимальная последовательность движений по отдельным степеням подвижности.

6. Движения по отдельным степеням подвижности должны быть оптимально взаимосвязаны.

Движения, одновременно совершаемые по отдельным степеням подвижности, могут взаимно влиять друг на друга из-за связей через общую нагрузку, общие приводы или общий источник питания. Часто для упрощения задач управления манипулятором стремятся убрать эти взаимные влияния путем введения специальных перекрестных компенсационных связей по управлению отдельными степенями подвижности или соответствующего усложнения кинематической схемы манипулятора. Однако хотя такое автономное управление, действительно, проще, оно отнюдь не обеспечивает заведомо наилучшего качества управления движением манипулятора в целом. Поэтому для каждого конкретного манипулятора и, более того, для различных типов движения одного и того же манипулятора существует оптимальный алгоритм связанного управления приводами манипулятора, который должен быть определен и по возможности реализован. Примерами типовых алгоритмов такого связанного управления являются упомянутое в главе 2 управление по принципу ведущего звена и параллельное централизованное управление всеми приводами, рассчитанное с учетом их возможных взаимных влияний и дополненное системой коррекции отклонений движений относительно заданных из центра.

7. Управление движением в общем случае должно быть многоуровневым. (Принцип иерархического управления.)

Речь идет о необходимости оптимального разделения задачи управления роботом на несколько уровней управления (см. параграф 5.3). При этом для разных задач общее число используемых уровней будет различным: от прямого управления с верхнего уровня отдельными приводами до использования ранее отработанных типовых алгоритмов и программ, комбинируемых с верхних уровней.

8. Требования к движениям робота должны быть дополнены требованиями к работающему совместно с ним другому оборудованию, а также и к объектам манипулирования. (Принцип взаимного согласования робота и совместно работающего оборудования.)

При формировании требований к движениям робота при его работе с другим оборудованием необходимо учитывать, что эти требования могут быть существенно облегчены за счет часто несущественных изменений конструкции и режима работы этого оборудования. То же относится и к конструкции изделий, которыми должен манипулировать робот. Сюда относится, например, устройство различных технологических направляющих, упоров и фасок для облегчения захвата и позиционирования перемещаемых предметов, сочленения их друг с другом при сборке и т. п.



## 6.2. Математические модели роботов

На рис. 6.1 показана функциональная схема робота. Начнем его математическое

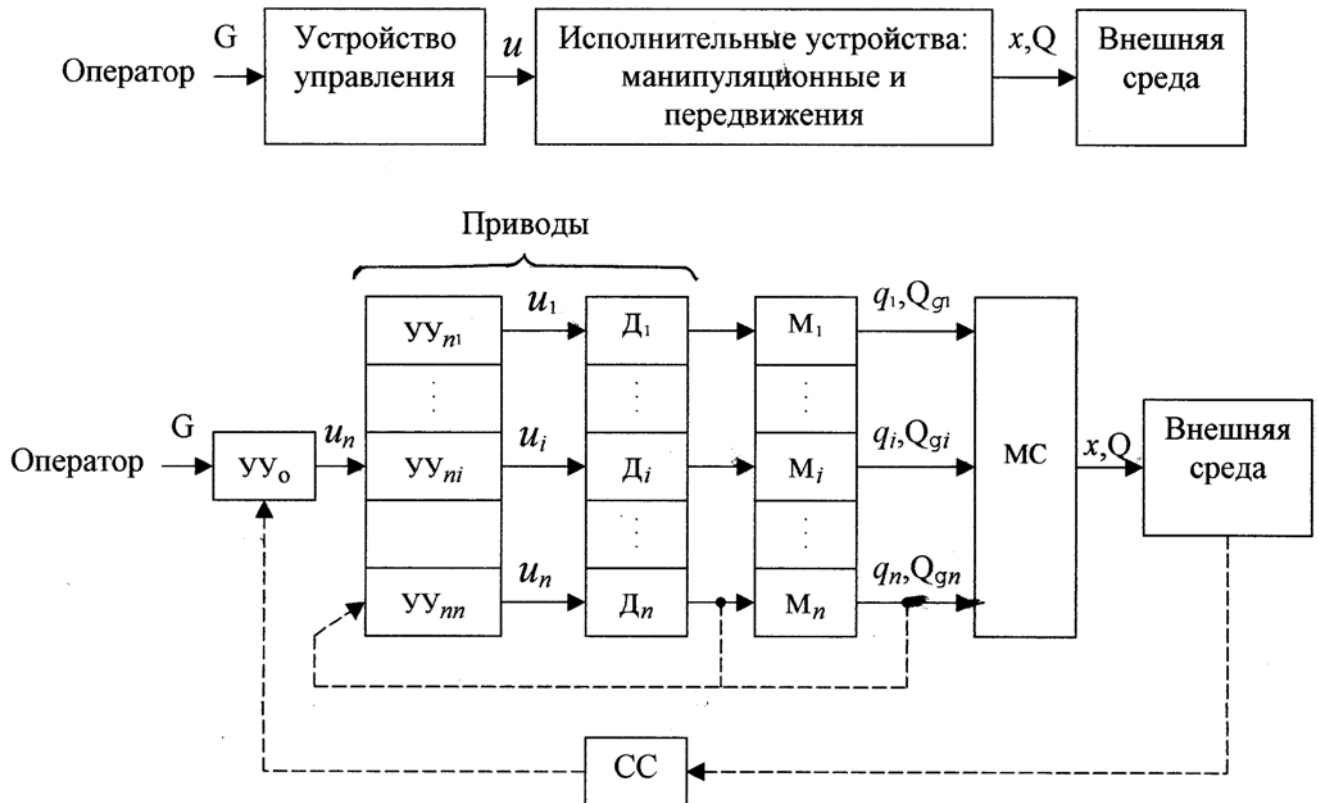


Рис. 6.1. Функциональная схема робота:  $УУ_0$  — общее (центральное) устройство управления,  $УУ_n$  —  $УУ$  привода,  $Д$  — двигатель,  $М$  — механизм,  $МС$  — механические системы — манипуляционная и передвижения,  $СС$  — сенсорные системы

описание с манипуляторов. На рис. 6.2. приведена кинематическая схема шарнирного манипулятора, на которой даны нужные для этого обозначения. Входные переменные механической системы манипулятора — это усилия  $Q_g (Q_{g1}, Q_{g2}, \dots, Q_{gn})$  от двигателей  $Д$ , действующие по  $n$  степеням подвижности, а выходные —  $x$  — координаты, т. е. перемещение и ориентация рабочего органа, а также усилие, с которым он действует на объекты внешней среды. Наибольшее число степеней подвижности рабочего органа  $m$  равно шести: три координаты, определяющие положение его центра и три угла ориентации. Кроме рабочего органа могут представлять интерес и координаты  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  промежуточных звеньев, определяющие его текущую конфигурацию.

Координаты  $x$  определяются в системе координат, неподвижной относительно его основания (рис. 6.2), и называются абсолютными (опорными, инерциальными). Относительное положение соседних звеньев манипулятора соответственно определяется их относительными (обобщенными) координатами  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , где  $n$  — число степеней подвижности манипулятора.

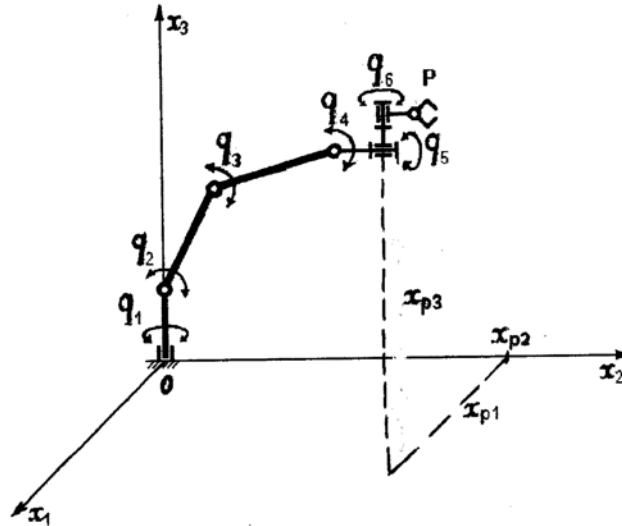


Рис. 6.2. Кинематическая схема трехзвенного шарнирного манипулятора:  $P$  — рабочий орган,  $q_1, q_2, q_3$  — переносные степени подвижности,  $q_4, q_5, q_6$  — ориентирующие степени подвижности

Математическое описание механической системы манипулятора связывает указанные выше его выходные переменные  $x_i, Q_i$  со входными  $Q_{gi}$ . В свою очередь абсолютные координаты  $x_i$  определяются относительным положением всех звеньев манипулятора, т.е. относительными координатами  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ .

В целом механическая система манипулятора описывается системой двух следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_M(Q_G, Q_B). \end{aligned} \right\} (6.1)$$

Здесь первое уравнение — уравнение кинематики манипулятора, выражающее абсолютные координаты его звеньев  $x$  через относительные координаты  $q$ , а второе — уравнение динамики для  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , где  $Q_G(Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{Gn})$  — усилия двигателей, действующие по соответствующим координатам звеньев манипулятора  $q$ , а  $Q_B(Q_{B1}, Q_{B2}, \dots, Q_{Bn})$  — возмущающие и противодействующие усилия,  $A_M$ -оператор механической системы манипулятора. Уравнения для усилий, с которыми

манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды будут рассмотрены ниже в конце этого пункта.

Рассмотрим уравнения (6.1) последовательно. Уравнение  $x = f(q)$  представляет собой выражение для пересчета координат, которое выводится по правилам аналитической геометрии. Пусть требуется найти это выражение для конца манипулятора, т. е. для абсолютных координат его рабочего органа  $(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$ . Введем на каждом звене свою систему прямоугольных координат, в которой происходит перемещение последующего звена при изменении его относительной координаты  $q_i$ . Если вывести выражение для координат рабочего органа в такой системе координат предыдущего звена, затем аналогично выразить координаты рабочего органа, пересчитанные в систему координат предыдущего  $(n-1)$  звена через координаты предшествующего ему  $(n-2)$  звена, то действуя таким образом, дойдем до основания манипулятора, с которым связана система абсолютных координат  $x$ . В результате получим искомое выражение для абсолютных координат рабочего органа  $(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$  через относительные координаты всех звеньев  $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ .

Напомним методику такого пересчета с применением матричного исчисления (рис. 6.3).

Пересчет координат точки Р из системы  $(O', x'_1, x'_2, x'_3)$  в систему  $(O, x_1, x_2, x_3)$  описывается векторно-матричным уравнением

$$r = Ar' + n \quad (6.2)$$

или

$$r' = A^{-1}(r - n), \quad (6.3)$$

где

$$r = r(x_1, x_2, x_3);$$

$$r' = r'(x'_1, x'_2, x'_3);$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ — матрица поворота;}$$

$$a_{sk} = \cos(i_s, i'_k); \quad s, k = 1, 2, 3;$$

$i_s, i_k$  — орты двух рассматриваемых систем координат.

Для матрицы  $A$  справедливы равенства

$$|A| = 1; \quad A^{-1} = A^T, \quad (6.4)$$

где индекс  $T$  означает операцию транспонирования матрицы. Если звенья манипулятора имеют одну степень подвижности друг относительно друга, например поворот на угол  $\varphi$ , то

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$A^1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Если осуществляется только параллельное смещение в случае поступательного движения звена, уравнение (6.2) принимает вид

$$r = r' + n. \quad (6.6)$$

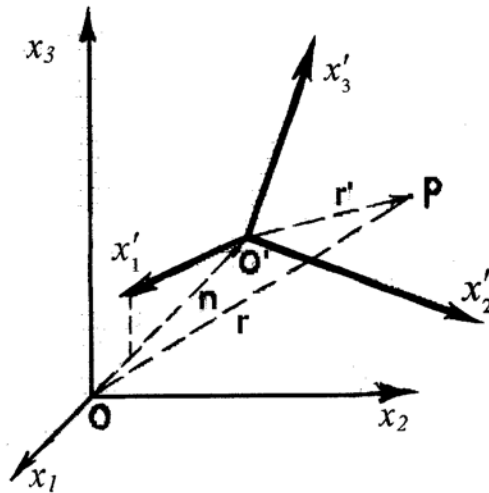


Рис.6.3. Схема пересчета координат

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ — матрица поворота;}$$

$$a_{sk} = \cos(i_s, i'_k); \quad s, k = 1, 2, 3;$$

$i_s, i_k$  - орты двух рассматриваемых систем координат.

Для матрицы  $A$  справедливы равенства

$$|A| = 1; \quad A^{-1} = A^T, \tag{6.4}$$

где индекс  $T$  означает операцию транспонирования матрицы. Если звено манипулятора имеют одну степень подвижности друг относительно друга, например поворот на угол  $\varphi$ , то

$$\left. \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A^{-1} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \tag{6.5}$$

Если осуществляется только параллельное смещение в случае поступательной движения звена, уравнение (6.2) принимает вид

$$r = r' + n. \tag{6.6}$$

Система уравнений (6.2), составленных для всех подвижных звеньев манипулятора, дает искомое уравнение кинематики.

В заключение рассмотрения уравнения кинематики необходимо отметить, что при его решении должны быть учтены различные конструктивные и прочие ограничения относительных перемещений звеньев  $q_i$ .

Перейдем теперь к рассмотрению второго уравнения системы (6.1) - уравнения динамики  $q=A_m(Q_g, Q_e)$ , которое связывает относительные координаты звеньев  $q_i$  с действующими на систему движущими  $Q_{gi}$  и противодействующими  $Q_{ei}$  силами. В зависимости от решаемых задач это уравнение может быть выведено в различной форме из числа известных в теоретической механике - в форме уравнений Ньютона, Гаусса, Даламбера, Лагранжа и их модификаций. Рассмотрим вывод уравнения динамики механической системы манипулятора с помощью уравнения Лагранжа второго рода, поскольку оно наиболее удобно при исследовании динамики манипуляторов.

Для  $i$  – звена манипулятора уравнение Лагранжа второго рода в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6.7)$$

где  $L=K - \Pi$  – функция Лагранжа, а  $K$  и  $\Pi$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергии звена;  $Q_i=Q_{gi} - Q_{ei}$  – результирующая сила, приведенная к выходу привода звена.

Уравнение (6.7) можно представить в следующей форме:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} q_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} q_k \dot{q}_j + c_i = M_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.8)$$

Первый член уравнения (6.8) описывает силы, зависящие от ускорения (соответственно коэффициенты при  $\dot{q}_j$  характеризуют инерцию звена); второй – скоростные силы (центробежные, кореолисовы, вязкого трения и т.п.), третий – гравитационные, статические.

Систему уравнений звеньев (6.8) можно более кратко записать в матрично-векторной форме:

$$A(\ddot{q})q + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q, \quad (6.9)$$

где  $A(q)$  - симметричная матрица размерности  $n \times n$ , описывающая инерционные свойства системы;  $b(\dot{q}, q)$ - вектор скоростных сил размерности  $n$ ;  $c(q)$  - вектор статических сил размерности  $n$ . Физический смысл членов уравнения (6.9) очевиден и структура уравнения не зависит от метода, которым оно выведено.

Рассмотрим в качестве примера уравнение динамики трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат (см. рис.3.2).

Кинетическая и потенциальная энергии манипулятора соответственно равны:

$$K = \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r\dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_r \left[ \dot{r}^2 + \left( r - \frac{\ell}{2} \right)^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2 \right] + \\ + m_r \frac{\ell^2 \dot{\varphi}^2}{24} + \frac{1}{2} m_z \dot{z}^2 + \frac{1}{2} (J_\varphi + J'_\varphi) \dot{\varphi}^2, \\ \Pi = (m + m_r + m_z) z g,$$

где  $m$  – масса рабочего органа с полезным грузом;  $m_z$  – масса вертикальной колонны, движущаяся по координате  $z$ ;  $m_r$  – масса горизонтальной стрелы, движущаяся по координате  $r$ ;  $\ell$  – длина стрелы;  $J_\varphi$  – момент инерции массы колонны  $m_z$ , приведенный к оси  $\varphi$ ;  $J'_\varphi$  – момент инерции частей колонны, участвующих только в угловом движении, приведенный к оси  $\varphi$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Выражение для кинетической энергии соответствует компоновке манипулятора, при которой при среднем положении стрелы она выступает на одинаковую величину, равную  $\ell/2$  в обе стороны от вертикальной оси колонны.

Обозначив  $q_1 = \varphi$ ,  $q_2 = z$ ,  $q_3 = r$  и подставив приведенные выше выражения для  $K$  и  $\Pi$  в (6.7), получим уравнение в векторно - матричной форме

$$\begin{bmatrix} a_\varphi(z) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} b_\varphi(\varphi, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\dot{\varphi}, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}. \quad (6.10)$$

Здесь

$$a_\varphi(r) = J_\varphi + J'_\varphi + (m_r + m)r^2 - m_r \ell r + m_r \frac{\ell^2}{3};$$

$$a_z = m_z + m_r + m;$$

$$a_r = m_r + m;$$

$$b_\varphi(\varphi, r, r) = 2 \left[ (m_r + m)r + m_r \frac{\ell}{2} \right] r \dot{\varphi};$$

$$b_r(\varphi, r) = \left[ m_r \frac{\ell}{2} - (m_r + m)r \right] \dot{\varphi};$$

$$c_z = (m_z + m_r + m)g;$$

$M_\varphi$  – момент, действующий по координате  $\varphi$ ;  $F_z$ ,  $F_r$  – усилия, действующие соответственно по координатам  $z$  и  $r$ . (В скобках указаны координаты, которые входят в выражения для данного коэффициента).

Соответственно для уравнения (6.9):

$$A = \begin{bmatrix} a_\varphi(r) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_\varphi(\varphi, r, r) \\ 0 \\ b_r(\varphi, r) \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_z + m_r + m) \\ 0 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}.$$

Вектор  $b_\varphi$  описывает кореолисову силу, вектор  $b_r$  – центробежную, а вектор  $c$  – силу тяжести.

Уравнение (6.10) можно представить системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_\varphi(r)\dot{\varphi} + b_\varphi(\dot{\varphi}, \dot{r}, r) &= M_\varphi, \\ a_z\ddot{z} + c_z &= F_z, \\ a_r\ddot{r} + b_r(\dot{\varphi}, r) &= F_r. \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

На рис.6.4 показана соответствующая структурная схема, где, в частности, наглядно показаны взаимовлияния движений по отдельным степеням подвижности.

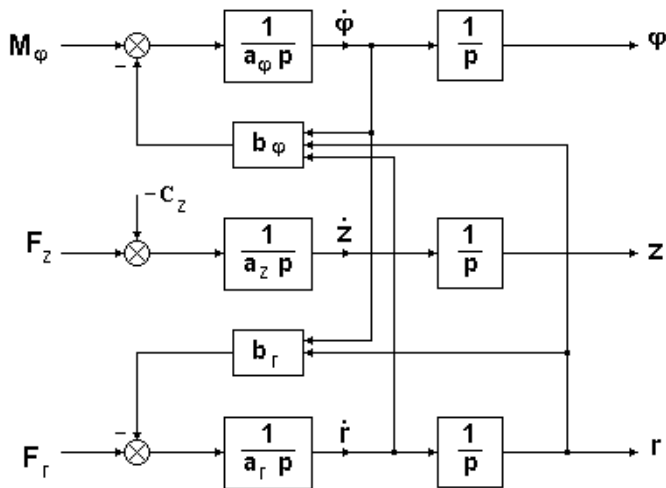


Рис. 6.4. Структурная схема механической системы трехзвенного манипулятора

Эти нелинейные уравнения можно линеаризовать разложением нелинейных членов в ряд Тейлора с отбрасыванием членов ряда выше первой степени малости. Получим справедливую для малых приращений перемещений систему линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (a_\varphi p + b'_\varphi) p \Delta \varphi + (b''_\varphi p + b'''_\varphi + a'_\varphi \ddot{\varphi}_0) \Delta r &= \Delta M_\varphi, \\ a_z p^2 \Delta z &= \Delta F_z, \\ (a_r p^2 + b'_r) \Delta r + b''_r p \Delta \varphi &= \Delta F_r. \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$



Здесь  $p$  – символ дифференцирования по времени, а  $a'_\varphi \dot{\varphi}_0; b'_\varphi, b''_\varphi, b'''_\varphi; b'_r, b''_r$  – коэффициенты разложения в ряд Тейлора функций  $a_\varphi$ ,  $b_\varphi$  и  $b_r$  при  $q=q_0$  и  $Q=Q_0$ ; индексом  $0$  отмечены значения переменных, соответствующих статическому режиму, относительно которого берутся их отклонения.

Из уравнения динамики (6.9) для относительных координат  $q$  можно получить уравнение для абсолютных координат, используя связывающее эти переменные уравнение кинематики  $x=f(q)$ . Для этого дважды продифференцируем последнее выражение, чтобы перейти в нем к  $\ddot{q}$ , входящему в уравнение (6.14):

$$\dot{x} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q},$$

где  $J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}$  –  $m \times n$  матрица Якоби с элементами  $\frac{\partial f_j}{\partial q_i}$ , где  $j=1, 2, \dots, m$ ;  $i=1, 2, \dots, n$ .

$$\ddot{x} = J(q) \ddot{q} + \dot{J}(q) \dot{q} = J(q) \ddot{q} + D(\dot{q}, q),$$

где  $D(\dot{q}, q) = \dot{J}(q) \dot{q}$  – вектор-столбец с элементами

$$\dot{q}^T \frac{\partial^2 f_k(q)}{\partial q \partial q^T} q = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial^2 f_k}{\partial q_i \partial q_j} q_i q_j, \text{ где } k = 1, 2, \dots, m.$$

Подставив выражение для  $\ddot{q}$ , в уравнение (6.9) или, наоборот, подставив сюда выражение для  $\ddot{q}$  из уравнения (6.9), получим следующее уравнение для  $x$ :

$$A(q)J^{-1}(q)\ddot{x} + b(\dot{q}, q) + c(\dot{q}) - A(q)J^{-1}(q)D(\dot{q}, q) = Q. \quad (6.13)$$

Основной интерес, разумеется, представляет это уравнение для выходных переменных манипулятора – для координат его рабочего органа  $x_p$ . Заметим, что при решении уравнения (6.13) в случае, когда число степеней подвижности манипулятора  $n > m$  – число степеней подвижности его рабочего органа, возникает неоднозначность в связи с избыточностью степеней подвижности, т.е. с неоднозначностью зависимости  $q = f^{-1}(x)$  и соответственно  $J^{-1}(q)$ . Для ее преодоления обычно вводят какие-нибудь полезные дополнительные условия по числу избыточных степеней подвижности.

Выведем теперь уравнения для усилий, с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды. Здесь возможны два случая. Первый, когда внешняя среда воздействует на манипулятор, оказывая его звеньям определенное сопротивление, сила которого изменяется независимо или в функции от перемещения манипулятора. В этом случае используется уравнение динамики

манипулятора для относительных переменных (6.9) с подстановкой в него указанных сил, пересчитанных на эти координаты. Получаем уравнение:

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q' + J^T(\dot{q})Q_{внеш} . \quad (6.14)$$

Здесь  $Q' = Q_g - Q_{в1}$ , где  $Q_{в1}$  – внутренние возмущающие силы,  $Q_{внеш}$  – внешние возмущающие силы, действующие со стороны внешней среды,  $J^T(q)$  – транспонированная  $n \times m$  матрица Якоби, с помощью которой осуществляется пересчет  $Q_{внеш}$  в систему относительных координат для определенного звена манипулятора с  $m$  степенями подвижности. Выражение  $J^T(q)Q_{внеш}$  получается из баланса мощностей  $Q_{внеш} \dot{x} = Q_{в} \dot{q}$ , где  $Q_{в}$  – действующие на звенья в системе относительных координат силы, вызванные силой  $Q_{внеш}$ .

Второй случай – это когда сам манипулятор своим рабочим органом осуществляет силовое воздействие на внешнюю среду по одной или нескольким своим координатам. В этом случае необходимо пользоваться уравнением динамики для абсолютных координат, в которых осуществляется взаимодействие с внешней средой. Оно получается из уравнения (6.4):

$$\begin{aligned} A(q)J^{-1}(q)\dot{x} + b(\dot{q}, q) + \tilde{c}(q) - \\ - A(q)J^{-1}(q)D(\dot{q}, q) + Q_p = Q' \end{aligned} , \quad (6.15)$$

где  $Q_p$  - выделенные из вектора  $Q$  создаваемые приводами усилия на рабочем органе, действующие по  $l \leq m$  координатам, по которым осуществляется указанное силовое воздействие на среду.

Для остальных  $(m - l)$  координат уравнения динамики остается прежним – (6.9) или (6.13).

В целом согласно рассмотренным уравнениям механической системы манипулятора он как объект управления представляет собой весьма сложный динамический объект – многомерный со взаимосвязанными переменными, нелинейный и нестационарный. Выходными переменными этого объекта являются шесть координат рабочего органа – три координаты центра и три угла его ориентации и действующие по этим координатам силы, с которыми рабочий орган взаимодействует с объектами внешней среды. Из этого числа управляемыми переменными могут быть как координаты рабочего органа, так и действующие по их направлениям усилия, но общим числом – до шести переменных. Например, при выполнении технологической операции нанесения покрытий с помощью пульверизатора требуется управление всеми шестью координатами. Операция снятия шероховатостей и заусенец с поверхностей требует наряду с управлением координатами для осуществления сканирования рабочим инструментом по этой поверхности еще управления силой, направленной по нормали к ней.

Сегодня в реальных системах управления манипуляторами управление координатами рабочего органа осуществляется, как правило, не путем измерения

этих выходных координат  $x_p$  с охватом управляемого объекта обратной связью по  $x_p$ , а по промежуточным переменным в виде относительных координат  $q_i$ . Такое решение объясняется сложностью измерения абсолютных координат рабочего органа. Однако в результате точность позиционирования рабочего органа манипулятора зависит от точности и стабильности датчиков координат  $q_i$ , а также от стабильности зависимости  $x_p$  от  $q_i$ . В результате требования к точности датчиков  $q_i$  оказываются в несколько раз выше требуемой точности управления  $x_p$ .

Управление усилием на рабочем органе манипулятора осуществляется обычно с помощью  $m$ -компонентных датчиков усилия, расположенных в запястьи рабочего органа.

При выводе уравнения (6.9) динамики для механической системы манипулятора предполагалось, что его звенья абсолютно жесткие. В действительности они могут претерпевать определенные деформации распределенные и сосредоточенные. При их учете в уравнении Лагранжа второго ряда (6.7) в уравнении манипулятора появятся новые переменные в виде координат упругих деформаций.

Математическое описание манипулятора вместе с приводами можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_m(Q_g, Q_b), \\ Q_d &= A_n(u_n) \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

Здесь  $A_m$  и  $A_n$  – операторы механической системы и системы приводов манипулятора,  $u_n$  – вектор управляющих воздействий на входе приводов.

Если воспользоваться уравнением динамики манипулятора (6.9) и линеаризовать уравнение привода, схема которого приведена на рис.4.1, получим следующее описание манипулятора с такими приводами:

$$\left. \begin{aligned} A(q)p^2q + b(pq, q) + c(q) &= Q_n - Q_b, \\ Q_g &= W_{n2}(p)u_n - J_g p^2q, \\ u_n &= W_{n1}(p)(q - q_g) - W_{n3}(p)pq. \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$

На рис.6.5 показана соответствующая структурная схема.

Здесь  $u_n$  – вектор управляющих воздействий на входе привода,  $W_{n2}(p)$  – передаточная матрица привода, связывающая векторы  $Q_g$  и  $u_n$ ,  $W_{n1}(p)$ ,  $W_{n3}(p)$  – передаточные матрицы последовательного и параллельного корректирующих звеньев,  $J_g$  – диагональная матрица моментов инерции двигателей, приведенных к выходу приводов  $q$  (умножением на квадрат передаточного отношения редуктора).

Исключив из (6.17) промежуточные переменные можно получить следующее общее уравнение:

$$\begin{aligned} & [J_g + A(q)]p^2q + b(pq, q) + c(q) = \\ & = W_{n1}(p)W_{n1}(p)(q - q_g) - W_{n2}(p)W_{n2}(p)q - Q_b. \end{aligned} \quad (6.18)$$

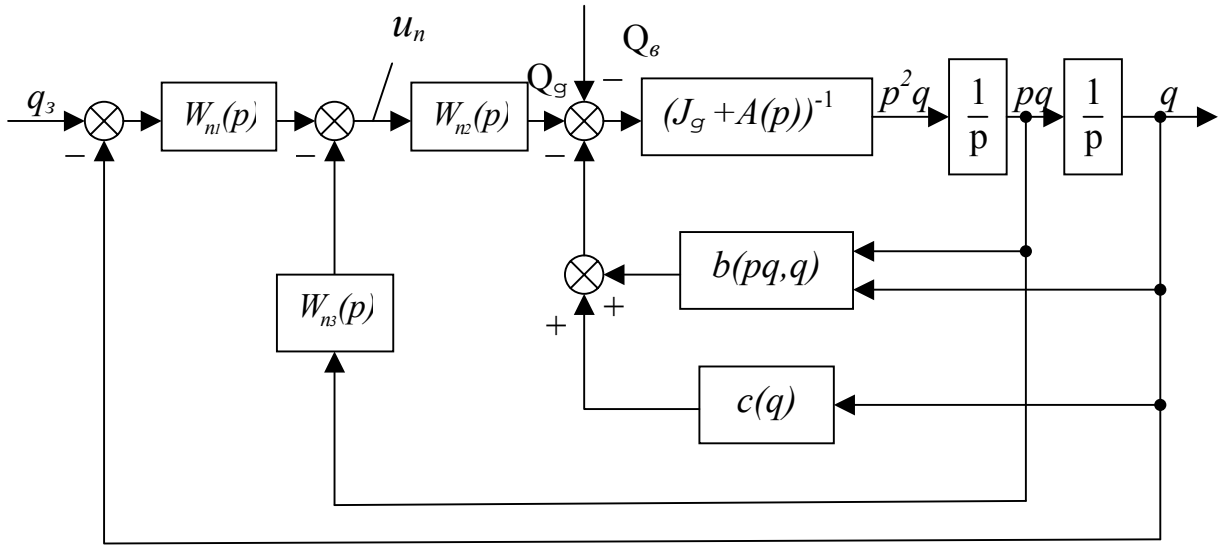


Рис. 6.5. Структурная схема манипулятора с приводами

Рассмотрим теперь математическое описание системы передвижения роботов. Как и для манипуляционных систем, математическое описание этого второго вида исполнительных систем роботов состоит из описания механической системы и системы приводов.

Если дальность передвижения робота сравнима с размером рабочей зоны его манипулятора, математическое описание системы передвижения можно вообще включить в описание манипулятора путем добавления в него степени подвижности системы передвижения. В общем же случае, когда, как чаще всего бывает, манипуляционная система и система передвижения действуют в разное время, в таком объединении нет смысла, так как обе системы все равно должны рассматриваться раздельно.

Механическая часть системы передвижения определяется ее типом – напольная или наземная, для движения в трубопроводах, по вертикальным поверхностям, в воде, под водой или в других средах (воздушные, космические и т.д.). В каждом

конкретном случае математическое описание системы передвижения работа определяется ее конструкцией и заимствуется из соответствующей области техники (внутрицеховой транспорт, различные наземные виды транспорта и т.д.).

Особенность приводов и систем управления для систем передвижения роботов в том, что их основной режим – это управление по скорости с переходом на позиционное управление при остановках.

### 6.3. Особенности динамики и способы динамической коррекции систем управления роботов.

В отношении динамических качеств роботов наиболее сложные требования предъявляются к роботам с непрерывным управлением. Если в дискретных позиционных системах существенна только статическая точность в точках позиционирования, то при непрерывном движении требуется обеспечить динамическую точность по всей траектории движения. Это, прежде всего, приводит к указанному ранее принципиальному различию в программировании систем дискретного и непрерывного управления. В дискретных системах управляющая программа сводится к последовательности точек позиционирования, т.е. представляет собой статическую характеристику.

При аналитическом программировании манипулятора эта программа определяется по его уравнению кинематики из (6.1)  $x_p = f(q)$ , где  $x_p$  – абсолютные координаты рабочего органа. По заданной последовательности дискретных позиций рабочего органа  $x_{p3}(t_k)$  путем решения обратной задачи кинематики находят дискретные программы  $q_k(t_k) = f^{-1}[x_{p3}(t_k)]$ . Эти задания, как уже описывалось, подаются на приводы в виде приращений относительных координат  $\Delta q_3 = q_3(t_k) - q_3(t_{k-1})$  и времени отработки каждого такого шага  $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ .

В системах непрерывного управления такое кинематическое программирование возможно только при низких скоростях движения рабочего органа, примерно не выше 0,5 м/с. В этом случае можно пренебречь динамическим запаздыванием и рассчитывать управляющую программу как непрерывную функцию времени тоже решая обратную задачу кинематики:

$$q_3(t) = f^{-1}[x_{p3}(t)].$$

При больших скоростях движения для синтеза управляющих программ необходимо переходить к динамическому программированию путем решения обратной задачи динамики манипулятора с приводами по (6.16). Подставив в эту систему уравнений вместо  $q(t)$  требуемую программную траекторию  $q_3(t)$ , найденную по  $x_{p3}(t)$  решением обратной задачи кинематики, можно найти искомую управляющую программу для приводов  $u_{n3}(t)$ .

Описанный учет динамического запаздывания и других особенностей динамики роботов с непрерывным управлением возможен только при программном управлении. В остальных случаях для качественной отработки входных

управляющих воздействий необходимо принимать специальные меры в виде известных в теории управления способов динамической коррекции, а именно последовательной коррекции в прямом канале входного управляющего воздействия и параллельной коррекции в каналах обратной связи по ошибке воспроизведения входных сигналов. Такая коррекция особенно существенна для систем непрерывного управления, снижая зависимость качества отработки управляющей программы от неизбежных изменений параметров робота. В частности, увеличение быстродействия системы управления повышает значение скорости программного движения, до которой допустимо кинематическое программирование, т.е. можно игнорировать динамику.

Рассмотрим названные выше способы динамической коррекции применительно к системам управления манипуляторов.

**Последовательная коррекция.** Рис.6.6,а поясняет принцип такой коррекции.

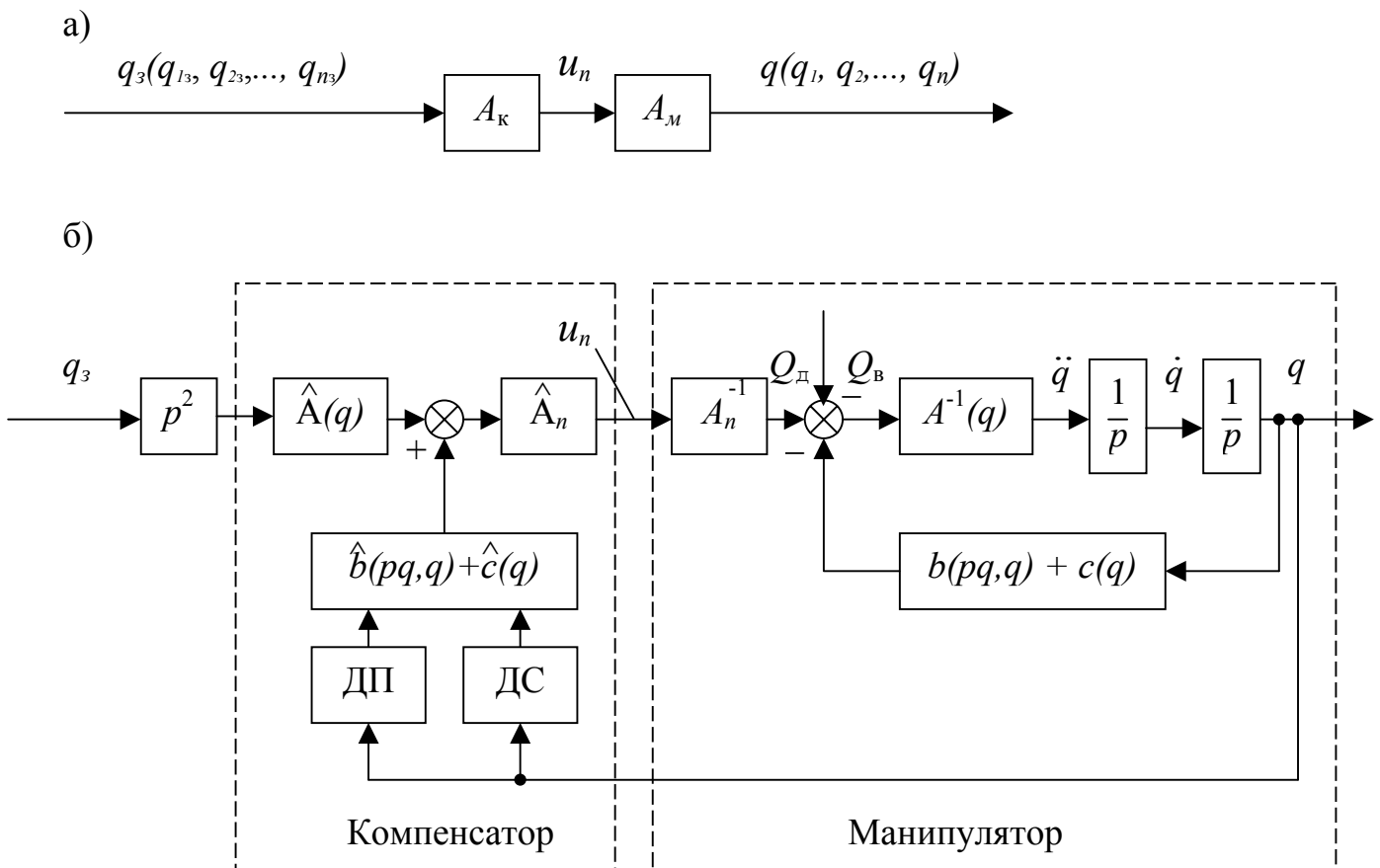


Рис.6.6. Схема манипулятора с компенсатором

Последовательно с манипулятором, описываемым оператором  $A_m$ , в его устройство управления вводится корректирующее звено – компенсатор, оператор которого  $A_k$  определен из условия

$$A_k = A_m^{-1} \quad (6.19)$$

т.е. обратен оператору манипулятора. Тогда общий оператор манипулятора с компенсатором будет  $A_k A_m = I$ , т.е. приводы манипулятора будут без искажений обеспечивать равенство  $q=q_3$ . По существу, такое последовательное корректирующее звено осуществляет компенсацию инерционностей и неидеальности приводов и механической части манипулятора, поэтому его называют компенсатором. На рис.6.6,б показана структурная схема, соответствующая выражению (6.19) и системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} A(q)p^2q+b(pq,q)+c(q) &= Q_G, \\ Q_G &= A_n(U_n), \\ u_n &= A_k(q_3). \end{aligned} \right\} \quad (6.20)$$

Подставив в (6.20)  $q = q_3$  находим выражение для

$$u_n = A_m^{-1}[A(q) p^2q+b(pq,q)+c(q)]. \quad (6.21)$$

На рис.6.6,б значок  $\hat{\phantom{x}}$  означает оценку соответствующих выражений, т.е. принятые в схеме компенсатора их математические модели. Показанные в схеме компенсатора взаимодействия по  $q$  и  $\dot{q}$  отражают нестационарность манипулятора, реализуя векторы  $\hat{b}(pq, q)$  и  $\hat{c}(q)$  как функции этих выходных переменных, т.е. осуществляют подстройку этого звена.

Практически компенсатор как всякое последовательное корректирующее звено не позволяет реализовать полную компенсацию неидеальности корректируемого объекта из-за неизбежной неточности математической модели объекта, а перекомпенсация при этом ведет к неустойчивости. Кроме того, компенсатор выполняет свои функции только при достаточно ограниченных по величине входных воздействиях, при которых приводы манипулятора не выходят в насыщение и не перестают управляться. При этом действие самого компенсатора как звена, осуществляющего форсирующее действие на приводы для преодоления инерционности, способствуют этому. Поэтому настройку компенсатора всегда делают с запасом в виде недокомпенсации и он рассматривается только как средство улучшения динамических свойств объекта управления, в то время как собственно управление должно осуществляться по рассогласованию  $\Delta q = q - q_3$ , т.е. с помощью устройств управления с отрицательной обратной связью.

**Коррекция с помощью обратных связей.** На уровне отдельных приводов к такой коррекции относится обратная связь по скорости, показанная в типовой схеме приводов рис.4.1. В дополнение к ней в приводах манипуляторов нашли применение следующие средства повышения динамических качеств с использованием обратных связей:

- релейное управление при больших отклонениях от задания;
- робастные системы управления, нечувствительные к изменениям ее параметров.

Из теории управления известно, что оптимальное по быстродействию управление объектами типа рассматриваемых здесь должно быть релейным, с тем чтобы обеспечить максимально возможную форсировку процесса управления.

Поэтому в приводах манипуляторов, когда требуется обеспечить предельное быстродействие, в устройство управления вводят релейную приставку, которая включается при больших отклонениях от входного управляющего воздействия и путем нескольких переключений двигателя по определенному алгоритму на форсированные разгон и торможение обеспечивает предельно быстрое устранение очередного такого отклонения.

Робастные системы управления – это системы, у которых структура, т.е. алгоритм управления, обеспечивает принципиальную независимость (инвариантность) качества управления от значений параметров системы, нагрузки и возмущений. Такие системы находят применение в приводах манипуляторов, поскольку последние являются существенно нестационарными объектами управления. Нагрузка приводов манипуляторов изменяется при изменении их конфигурации и величины полезной нагрузки. Ослабить зависимость качества управления при такой нестационарности объекта управления можно, во-первых, путем расширения областей устойчивости и качества в области варьируемых параметров с помощью дополнительных корректирующих средств, и, во-вторых, путем введения автоматической подстройки устройств управления на требуемое качество переходных процессов. Однако в особо сложных случаях кардинальным решением является применение названных робастных систем управления. На рис.6.7. показана схема такой системы с обратной связью по ускорению [13].

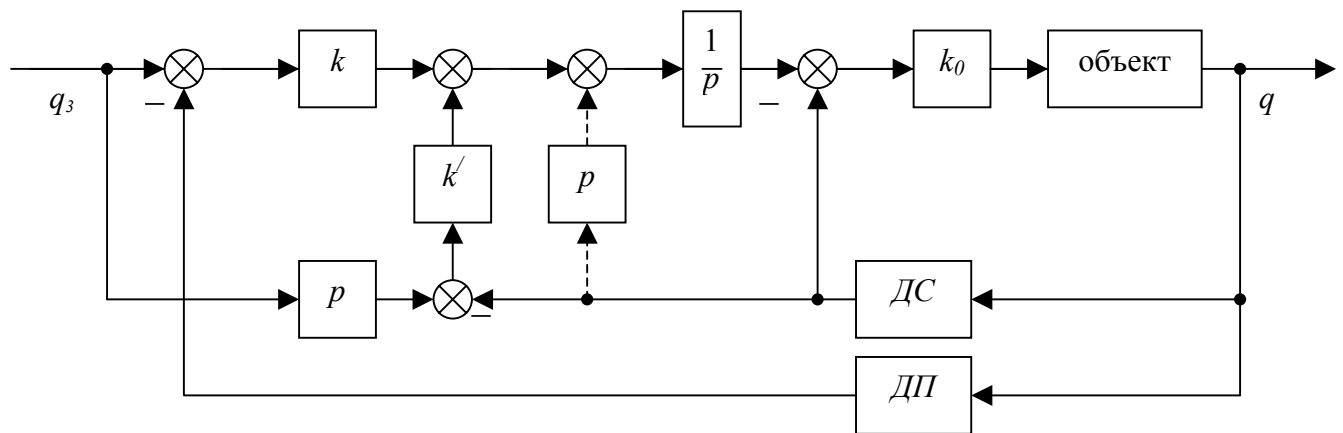


Рис. 6.7. Схема системы управления с обратной связью по ускорению.



Последняя показана пунктиром. Поскольку в прямом канале имеется интегрирующее звено, то эквивалентное преобразование исходной схемы путем переноса этой обратной связи за это звено позволяет обойтись без сигнала по ускорению в явном виде, как показано на рисунке, хотя эта схема реализует именно этот принцип.

Ускорение, как известно, является мерой нарушения баланса сил, действующих на систему, т.е. мерой любых возмущений – внешних или внутренних, включая параметрические. Поэтому устройство управления с обратной связью по ускорению парирует любые возмущения, стабилизируя режим управляемого объекта и поддерживая равенство  $q = q_3(t)$ . Схема на рис.6.7 соответствует объекту второго порядка. Для более сложных объектов ее структура соответственно будет другой, чтобы обеспечить необходимое качество процесса управления.

На рис.6.8 показана схема релейной робастной системы [14].

В теор

Рис. 6.8. Релейная система управления приводом

нтальных

принципа управления — по возмущению и с обратной связью по отклонению от предписанного режима. Выше в робастных регуляторах по ускорению был применен первый принцип выявления и парирования возмущений. Здесь мы рассмотрим создание того же эффекта робастности с помощью предельно сильной обратной связи по отклонению — релейной обратной связи.

Как известно, отрицательная обратная связь ослабляет воздействия всех внешних и внутренних возмущений, включая нестабильность параметров и помехи и этот эффект растет с усилением обратной связи. При увеличении коэффициента обратной связи в пределе получается релейная обратная связь. Как известно, релейное звено без зоны нечувствительности эквивалентно звену непрерывного действия с коэффициентом передачи равным бесконечности. Следовательно, такая предельно сильная обратная связь должна соответственно обеспечить и предельную независимость охватываемого ею объекта от любых возмущений — внешних и внутренних, а в рассматриваемом случае робастность привода с таким управлением.

На рис.6.8 как и в типовой схеме привода на рис.4.1 имеются две обратные связи – по положению  $q$  и по скорости  $\dot{q}$ . Такая структура соответствует объекту второго порядка. Для объекта третьего порядка необходимо соответственно повысить порядок гибкой обратной связи, перейдя к ускорению. На рис.6.8 это показано пунктиром введением дифференцирующего звена. Поскольку в такого типа системах двухпозиционного релейного управления в установившемся режиме неизбежны автоколебания, здесь необходимо принимать специальные меры для их устранения (введение в реле зоны нечувствительности, создание скользящего режима и т.п.).

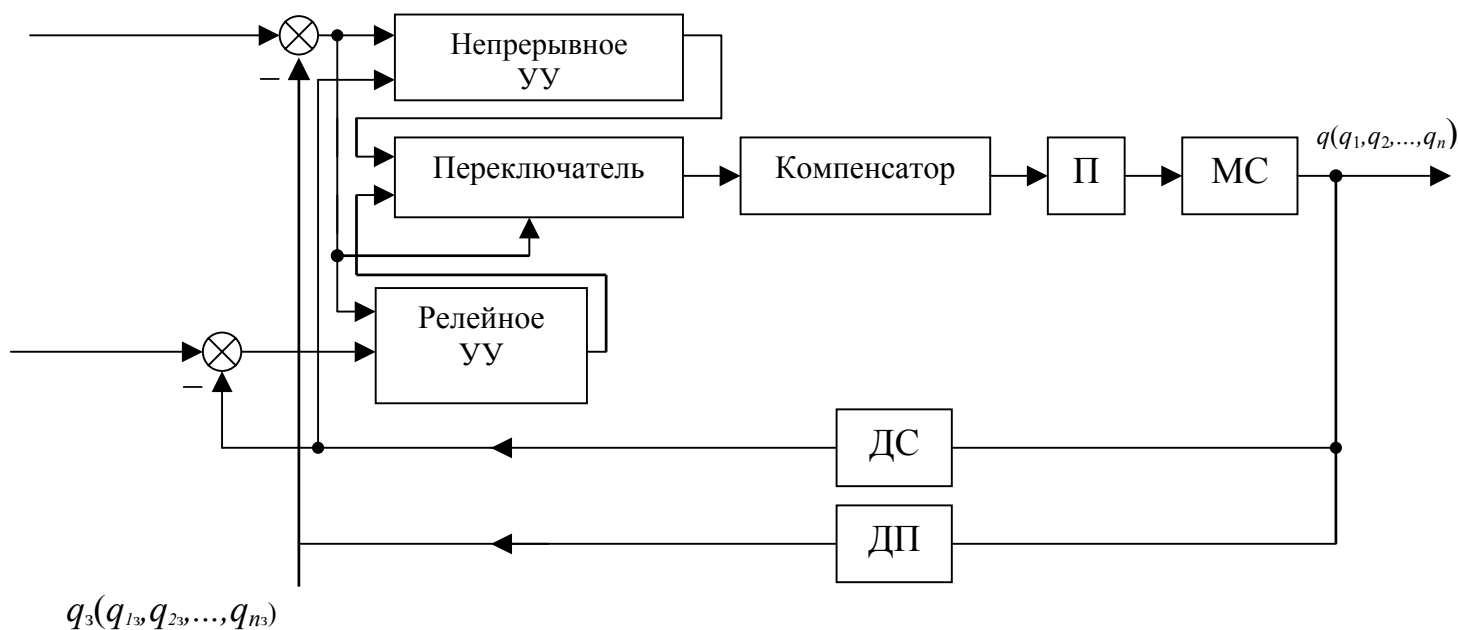
Важным свойством рассмотренных робастных систем управления применительно к приводам манипуляторов является то, что они, парируя все

возмущения, устраняют и взаимовлияния приводов, делая их автономными для верхнего уровня управления.

Общим для обеих рассмотренных робастных систем управления является также то, что обеспечиваемая ими независимость качества управления от возмущений достигается ценой предельно сильного управления и соответственно утяжеления режима управляемого объекта. Поэтому к такому способу управления целесообразно прибегать только в случаях, когда без них невозможно выполнить требования к динамике системы.

Рассмотренные способы динамической коррекции применяются обычно совместно. На уровне управления отдельными приводами совместное применение последовательной коррекции и обратных связей позволяет упростить алгоритмы реализации каждого из этих способов, получив при этом качество управления, недостижимое при применении только одного из них.

На уровне совместного управления приводами манипуляторов требования к коррекции существенно зависят от алгоритмов управления отдельными приводами. На рис.6.9 приведена обобщенная функциональная схема системы управления мани-



$q_3(q_{13}, q_{23}, \dots, q_{n3})$

Рис.6.9. Схема системы непрерывного управления манипулятором:  
 МС – механическая система, П – приводы.

пулятором, в которой присутствуют все рассмотренные выше способы управления. Непрерывное устройство управления осуществляет функции регулятора, поддерживающего равенство  $q = q_3$ . Переключатель осуществляет эпизодический перевод на релейное оптимальное по быстродействию управление при возникновении больших рассогласований  $\Delta q = q - q_3$ . Компенсатор, не давая полной компенсации, развязывает приводы, делая их автономными, и снимает необходимость подстройки, компенсируя нестабильность параметров. Это предельно упрощает общесистемный алгоритм непрерывного устройства управления.

#### **6.4. Компьютерное моделирование робототехнических систем.**

Вследствие сложности робототехнических систем как объектов исследования основным средством такого исследования помимо, разумеется, физического моделирования и натурных экспериментов является математическое моделирование на ЭВМ для решения задач как анализа так и синтеза.

Предварительными этапами такого компьютерного исследования является решение двух задач:

- доказательство достоверности используемого математического описания (математической модели) робота, т.е. решение задачи идентификации,
- разработка компьютерной модели и доказательство ее адекватности исходному математическому описанию.

Задача идентификации включает этапы структурной и параметрической идентификации. В рамках первого этапа необходимо определить существенные свойства объекта исследования отбросив те, которыми, исходя из конкретных целей предстоящего исследования, можно пренебречь в результате чего определяется структура объекта. Прежде всего здесь надо рассмотреть нелинейности, ограничения, упругости, взаимовлияния степеней подвижности манипуляторов. На этапе параметрической идентификации должны быть установлены с оценкой точности численные значения всех параметров определенной на предыдущем этапе структурной схемы системы, диапазоны их изменения и другие количественные зависимости и характеристики.

Задача разработки компьютерной модели заключается в создании программы численного решения описывающей объект исследования системы уравнений на основе одного из известных методов численного интегрирования. На рис.6.10 дана обобщенная схема соответствующего пакета программ для рассмотренных выше ма-



Рис.6.10. Схема пакета программы моделирования манипуляционных систем.

тематических описаний манипуляторов в части их управления. Пакет имеет модульную структуру и включает головную управляющую программу и набор под-программ. Управляющая программа обеспечивает ввод исходных данных, их предварительную обработку и формирование заданий. В блоке «Сборка уравнений кинематики» формируются матрицы пересчета координат, программы пересчета абсолютных и относительных координат. В блоке «Решение уравнений кинематики» осуществляется расчет программных траекторий  $q_3(t)$  по  $x_p(t)$ , т.е. решение обратной задачи кинематики. В блоке «Сборка уравнений динамики» вычисляются коэффициенты уравнения динамики для механической системы манипуляторов. В блоке «Уравнение динамики системы» формируется правая часть этого уравнения, включая приводы и устройство управления робота, т.е. для замкнутой системы управления.

Процесс моделирования, например программного движения, протекает так: по дискретным значениям  $x_{pz}(t_k)$  вычисляются  $q_3(t_k)$ . Затем для этих значений

вычисляются значения  $q_i$ ,  $x_{pi}$  и погрешности  $\Delta q_i - \Delta q_{iz}$  и  $\Delta$  а так же при необходимости показатели качества переходного процесса. Далее могут определяться другие характеристики исследуемой системы: чувствительность к изменениям отдельных параметров, зависимость качества управления от конфигурации манипулятора, веса полезного груза и т.п.

Описанная последовательность соответствует решению задачи анализа. Задача синтеза – структурного и параметрического – требует прежде всего выбора критерия (критериев) качества. Затем решается оптимизационная задача выбора варьируемой части структурной схемы и ее параметров. Последняя задача вследствие сложности объекта исследования решается обычно путем последовательных приближений, начиная с предельно упрощенной модели и последовательным ее усложнением с соответствующим уточнением решения. Последние этапы этого процесса часто выполняются по процедуре анализа, т.е. исследования влияния вновь вводимых элементов схемы и соответствующей коррекции ранее найденного решения задачи синтеза, в том числе и путем введения дополнительных корректирующих звеньев, т.е. изменения структуры системы.

## **ГЛАВА 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ.**

### **7.1. Постановка задачи проектирования средств робототехники.**

Проектирование технических систем – это процесс создания нового изделия в виде его проекта. Проект – это совокупность технических документов, по которым изделие может изготавливаться и эксплуатироваться. Процесс проектирования стандартизирован и состоит из следующих этапов: разработка технического задания, предварительное проектирование (разработка технического предложения), эскизный проект и технический проект (разработка полного комплекта технической документации на изделие). Первые два этапа – это НИР, остальные – ОКР. Процесс проектирования изделия не заканчивается техническим проектом, а продолжается в течении всего времени его производства и эксплуатации. В течении этого времени изделие окончательно «доводится», повышается его технический уровень путем корректировки технической документации.

Порядок и методы проектирования средств робототехники регламентируются комплексом нормативно-технических документов, которые включают ГОСТы (по классификации, терминологии и обозначениям, основным параметрам, ряду грузоподъемности) и методические указания (по техническим требованиям, методам испытаний и правилам приемки, по оценке экономической эффективности). Аналогичные документы имеются и по основным компонентам роботов – устройствам управления, приводам, захватным устройствам, а также по околороботной оснастке. При разработке технических требований к роботам и последующем анализе путей их реализации необходимо исследовать взаимодействие робота с другим работающим совместно технологическим оборудованием и объектами манипулирования с целью выявления возможностей за счет достаточно несущественных их изменений заметно облегчить требования к роботу и тем самым получить общую технико-экономическую выгоду для всей системы совместно работающих машин. Наибольший технико-экономический эффект при этом может быть достигнут, когда все это оборудование проектируется одновременно с роботом. Чаще всего это имеет место при проектировании роботов, выполняющих основные технологические операции.

Одновременно с той же целью необходимо исследовать возможности создания так называемой околороботной оснастки и других средств упорядочения и упрощения внешней среды робота. В качестве иллюстрации на рис.7.1 приведена качественная зависимость стоимости собственно робота и стоимости его вместе с такими средствами в функции от степени упорядоченья внешней среды. Как следует из этих графиков, существует некоторая оптимальная для каждой конкретной задачи степень упорядоченья внешней среды, при которой достигается минимальная суммарная стоимость робота и околороботной оснастки (устройства подачи и позиционирования объектов манипулирования, их маркировка и т.п.).

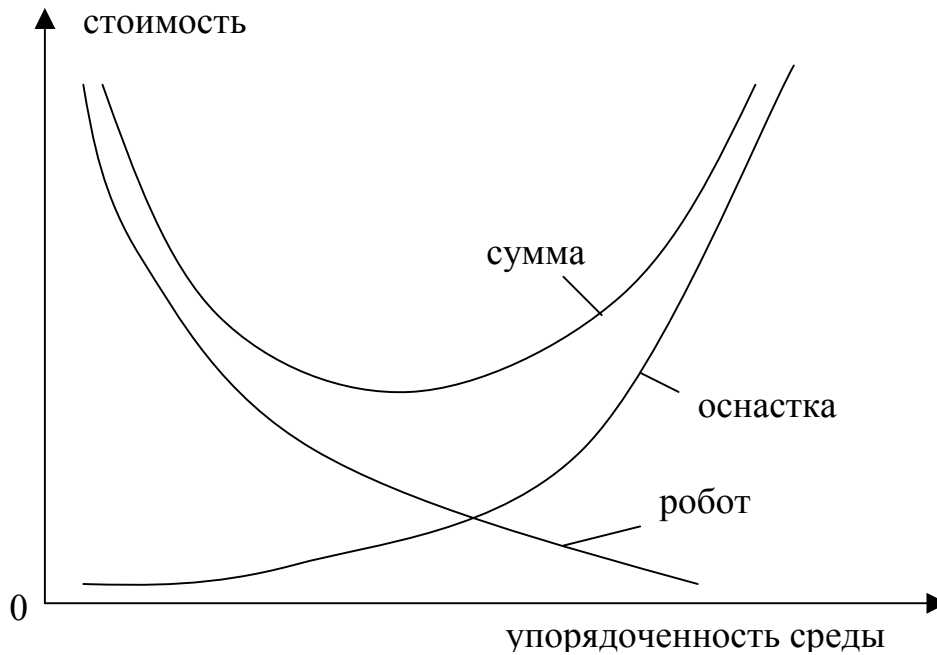


Рис.7.1. Стоимость робота и околороботной оснастки.

Только после такого рассмотрения взаимодействия робота с внешней средой и оптимизации технических требований к роботу и объектам этой среды следует переходить к проектированию собственно робота. Основной принцип здесь, как и при проектировании других технических систем, в применении принципа декомпозиции, т.е. в распараллеливании всей задачи на несколько более простых подзадач. Робот, как и другие средства робототехники, состоит из двух основных функциональных частей — исполнительных систем (манипуляторы и устройства передвижения) и устройства управления ими с сенсорикой. Последнее в свою очередь распадается на аппаратную и программную части. В соответствии с этим на первом этапе проектирования после составления функциональной схемы робота должно быть проведено его разбиение на три указанные части — механическую систему, аппаратуру управления и программное обеспечение, проектирование которых требует специалистов разного профиля. В основе решения этой задачи лежит разделение функций робота и технических требований к нему между этими тремя его взаимосвязанными частями. Эта задача неоднозначна и наиболее ответственна, поскольку ее решение в значительной степени предопределяет результат всей дальнейшей работы по созданию робота.

При распределении функций робота между названными тремя его частями прежде всего выделяют функции, которые полностью или в основном определяются одной из этих частей и соответственно приписываются им. (Например, грузоподъемность и геометрия рабочей зоны определяются механической системой, параметры энергопитания и диапазон температуры внешней среды существенны в основном для аппаратуры управления, язык программирования имеет значение только для программного обеспечения.)

Остальные функции необходимо оптимально распределить между частями робота на основании определенных критериев. При этом следует учитывать еще наличие взаимовлияний между некоторыми из этих функций, что дополнительно усложняет задачу и может привести к тому, что локальное улучшение характеристик одной из частей робота ухудшит эффективность робота в целом. Например, известная взаимосвязь точности и быстродействия не позволяет независимо распределять требования к каждому из этих параметров между частями робота.

## **7.2. Особенности проектирования роботов.**

Основная особенность и сложность в проектировании роботов – это ограниченные возможности декомпозиции на автономно проектируемые части вследствие их взаимосвязанности при определении ряда основных характеристик робота и необходимости при этом системного подхода к роботу как к единому целому. Выше уже говорилось о таком системном подходе в связи с необходимостью рассмотрения робота совместно с объектами внешней среды.

При проектировании первых роботов сперва создавались их исполнительные устройства, а затем для них как заданных объектов управления проектировались устройства управления. Однако в дальнейшем по мере совершенствования роботов и стремлении достижения предельно высоких их параметров исполнительные устройства и устройства управления стали проектироваться совместно как единая система на основе общих критериев. Это позволяет обеспечить оптимальное распределение технических требований к роботу между этими его частями. Характерный пример – это задача минимизации массы манипуляторов. Большие возможности здесь дает переход от традиционного расчета механической части на жесткость с ограничением упругих деформаций звеньев к расчету только на прочность со снятием этих ограничений. Это позволяет примерно втрое уменьшить массу механической системы манипуляторов. Однако возникающая при этом гибкость конструкции и вызванная ею колебательность существенно осложняют задачу управления движением таких манипуляторов и соответственно технические требования к устройству управления.

Следствием такого системного подхода к проектированию роботов являются следующие принципы их создания:

1. Децентрализация управления вплоть до конструктивного встраивания устройств управления отдельными частями механической системы в эти части. Это позволяет удешевить всю систему в целом, повысить ее надежность и быстродействие за счет сокращения связей, распараллеливания и иерархического построения информационных процессов и процессов управления. Для таких систем разработаны различные варианты структур с сильными и со слабыми связями



(распределенные системы), а также методы их проектирования.

2. Необходимость обеспечения значительно большей надежности управления, чем обычно считается приемлемым для других подобных типов объектов. Это вызвано тем, что в этих системах отказ управления, как правило, ведет к аварии всей системы.
3. Широкое применение компьютерного моделирования без чего такие сложные системы, как правило, не могут быть созданы на современном научно-техническом уровне.

### **7.3. Методы проектирования средств робототехники.**

В основе всех методов проектирования техники лежит унификация. Проектирование нового изделия – это всегда противоречивая задача для разработчика: с одной стороны существует естественное стремление использовать все последние достижения науки и техники в данной области, с другой – этому препятствуют ограничения по срокам, стоимости, материальным ресурсам и др., оговоренные обычно в технических требованиях к создаваемому изделию. Выход здесь один – это компромисс в виде оптимальной приемственности с ранее созданными подобными изделиями и их компонентами. Основным средством для этого и является, как известно, унификация и стандартизация. Иногда в техническом задании прямо оговаривается степень (процент) унификации. Как будет показано, проблема унификации для робототехники имеет особенно большое значение.

Сфера применения робототехники быстро расширяется, постепенно охватывая все новые области человеческой деятельности. Соответственно быстро растет номенклатура роботов. Уже сегодня количество требуемых типов роботов только общепромышленного применения измеряются сотнями. В связи с этим одной из важнейших задач робототехники являются комплексная унификация и стандартизация роботов и их компонентов.

По определению международной организации по стандартизации, *стандартизация* — это установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области. Сюда, в частности, входит установление единиц величин, терминов и обозначений, требований к продукции, технологическим процессам, технике безопасности. К нормативно-техническим документам (НТД) по стандартизации относятся стандарты, методические указания, технические условия и т. п.

*Унификация* — это наиболее эффективный метод стандартизации, заключающийся в рациональном сокращении числа объектов одинакового функционального назначения с целью повысить производительность труда и экономичность производства и эксплуатации, улучшить качество и обеспечить взаимозаменяемость.

В робототехнике унификация развивается по трем уровням: для

компонентов роботов, для собственно роботов и для роботизированных технологических комплексов. Хорошо отработанные и серийно выпускаемые унифицированные компоненты – по существу единственно возможная основа развития робототехники в условиях упомянутого выше быстрого роста номенклатуры роботов с учетом необходимости при этом оперативного создания, освоения производства и эксплуатации новых типов роботов и их модификаций.

Создание унифицированных функциональных компонентов роботов явилось первым этапом унификации в области робототехники. Ее следующим этапом стала унификация конструкции этих компонентов и программного обеспечения на основе *модульного принципа построения* [15]. Сущность этого принципа заключается в построении механических, аппаратных и программных частей робота из более мелких унифицированных частей — модулей, которые позволяют осуществлять различные компоновки из некоторого их набора. Система таких модулей строится по иерархическому принципу, когда более сложные модули состоят из более мелких модулей. Например, привод выполненный в виде модуля, является готовой конструктивной частью для сборки манипуляторов и устройств передвижения, приспособленной для соединения с модулями другого функционального назначения. При этом в свою очередь он состоит из ряда модулей, которые позволяют собирать различные модификации этого типа привода.

Модульный принцип построения роботов позволяет наиболее легко создавать их модификации и совершенно новые типы на базе одних и тех же конструктивных частей. При этом возникает возможность в каждом конкретном случае наиболее оптимально выбирать степень кинематической, аппаратной и программной избыточности, стоимость и распределение функции между роботом и работающим вместе с ним технологическим оборудованием (вплоть до конструктивного объединения отдельных модулей робота с этим оборудованием).

В связи с рассматриваемым модульным построением роботов возникает вопрос: существует ли какая-нибудь альтернатива этому принципу на сегодня или в перспективе? Таким принципом может представляться идея создания универсальных оцувствленных роботов. Собственно говоря, именно эта идея наиболее соответствует исходной идее робота как универсального заменителя человека. Техническая база для создания систем управления таких роботов уже имеется – это микропроцессоры, которые сами по себе представляют яркий пример реализации идеи универсального программно перестраиваемого устройства широкого применения. Однако в отличии от микроэлектроники в робототехнике в целом этот путь, по крайней мере сегодня, экономически невыгоден, поскольку стоимость роботов резко возрастает при увеличении их функциональных возможностей и грузоподъемности. Вместе с тем сейчас отчетливо прослеживается концепция перехода ко все более функционально сложным роботам с техническим зрением и интеллектуальным управлением. Саму идею модульного построения таких роботов можно трактовать как

экономически наиболее оптимальный путь создания функциональной избыточности, но не в отдельном роботе, а в рамках всего арсенала унифицированных частей – модулей. Таким образом, модульный принцип построения роботов можно рассматривать не как альтернативу сверхуниверсальным роботам, а, наоборот, как форму реализации этой идеи, но применительно не к отдельному роботу, а ко всему их множеству.

В целом модульный подход к построению роботов дает следующие преимущества:

- резко сокращаются (до нескольких месяцев) сроки создания, освоения производства и внедрения новых марок роботов, поскольку они собираются из хорошо отработанных серийных компонентов;
- возрастает технический уровень роботов, их надежность и снижается стоимость; последнее связано не только с удешевлением компонентов роботов при их серийном производстве, но и с уменьшением избыточности в конструкции и параметрах роботов благодаря тому, что появляется возможность для каждого конкретного варианта применения компоновать роботы из минимально необходимого числа простейших модулей;
- снижаются расходы на создание, производство, внедрение и эксплуатацию роботов, существенно упрощается их обслуживание; упрощается также задача модернизации технологических комплексов путем докомплектования входящих в них роботов новыми модулями и применения отдельных модулей в качестве самостоятельных технологических приспособлений (механические руки, кантователи, межоперационные транспортные устройства и т.д.);
- производство роботов сводится главным образом к их сборке из стандартных частей, что может быть организовано практически на любом машиностроительном производстве.

Особо большое значение для повышения технического уровня и эффективности применения роботов в технологических комплексах имеют модульные устройства управления. С их помощью удастся решать проблемы управления не только самими роботами, но и такими комплексами (участками, цехами) в целом. Это позволяет резко ускорить, упростить и удешевить создание и внедрение роботов в составе технологических комплексов, что в сущности и являются конечной целью применения роботов в промышленности. Впервые идея модульного построения роботов была сформулирована, обоснована и реализована в ЦНИИ РТК в 1980/82 годах. Здесь была создана первая система модулей для построения механической части роботов, их устройств управления и программного обеспечения [2]. На рис.7.2 и 7.3 показаны модули-приводы из этой системы, а на рис.7.4 – пример робота, собранного из этих модулей. Особенно большая эффективность применения этих модулей была продемонстрирована при срочном создании для обеспечения работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС



Рис.7.2. Электромеханические вращательные модули-приводы типа ПРЭМ.

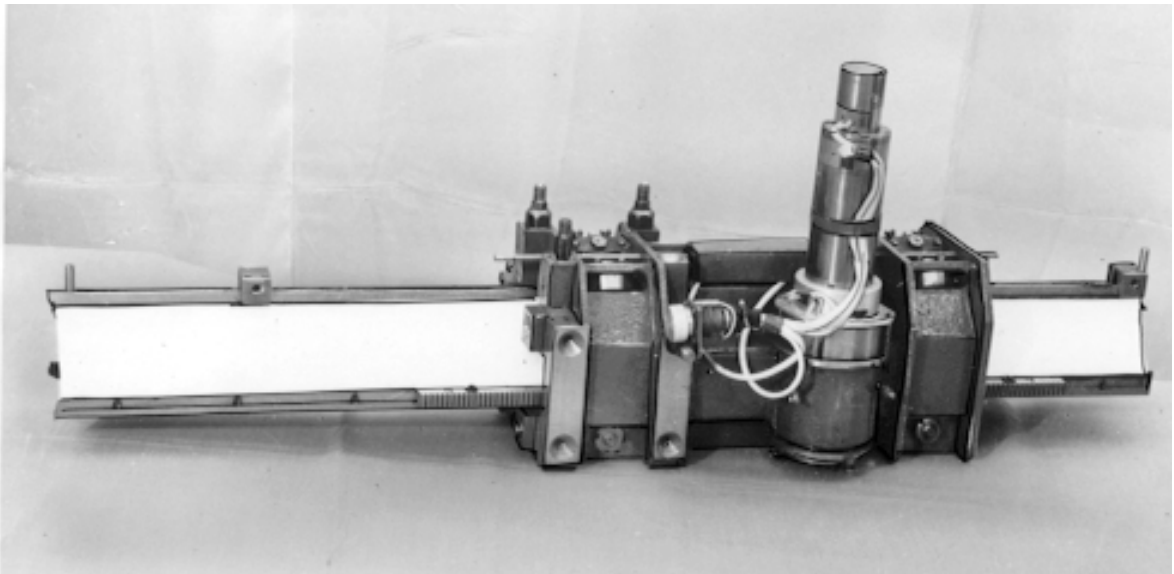


Рис.7.3. Электромеханический поступательный модуль-привод типа ПРЭМ.

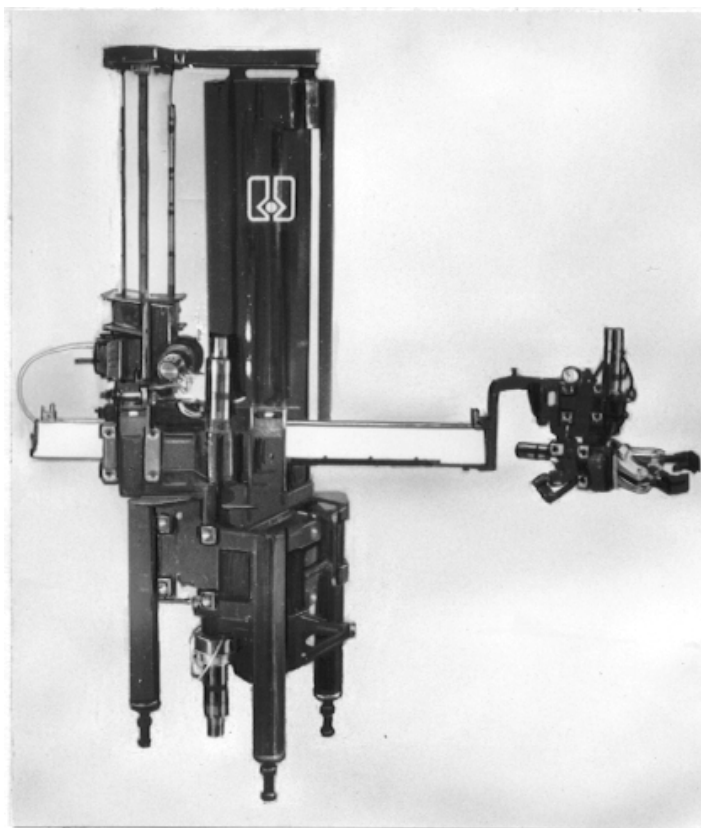


Рис.7.4. Модульный электромеханический промышленный робот ПРЭМ-5.

в 1986 году. За 2-3 месяца было разработано и поставлено на станцию более 15 различного назначения роботов, собранных из ранее отработанных унифицированных модулей. С их помощью было обследовано более 10 000 и очищено около 5000 кв.метров территории станции [2].

Сегодня модульный принцип построения роботов успешно используется всеми ведущими фирмами, производящими роботы, в том числе «Юнимейшен» и «Праб» (США), «Мицубиси» и «Фанук» (Япония), «Фольксваген» и «Бош» (Германия), «Сиаки» (Франция), «Оливетти» (Италия), «АСЕА» и «Электрлюкс» (Швеция).

Модульный принцип построения техники нашел применение и в ряде других отраслей промышленности – в судостроении, строительстве, приборостроении. Наряду с этим принципом существуют и другие принципы построения техники, тоже основанные на идее унификации – это принцип базового изделия и агрегатного построения. Первый принцип заключается в создании гаммы (семейства) изделий, повторяющих конструкцию первоначально обработанного базового изделия, но в других габаритах и грузоподъемностях. Принцип агрегатного построения заключается в создании различного назначения и компоновок изделий из унифицированных сборочных функциональных единиц – агрегатов. (Агрегатные станки, агрегатные системы в приборостроении и вычислительной технике.) Эти оба принципа построения технических систем нашли применение и в робототехнике и могут рассматриваться как частные случаи модульного принципа.

## ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

### 8.1. Классификация технологических комплексов с применением роботов.

Задача робототехники наряду с созданием собственно средств робототехники заключается и в создании технических систем и комплексов, основанных на использовании этих средств. Как было отмечено в главе 2 при изложении истории развития робототехники, несмотря на непрерывное расширение сферы применения робототехники основной областью этого применения, по-прежнему, пока остается промышленность, и прежде всего машиностроение и приборостроение. Здесь появились первые роботы и сосредоточено до 80% всего парка роботов в мире. Напомним, что роботы, применяемые в промышленности получили наименование промышленные роботы (ПР). Они подразделяются на технологические, которые выполняют основные технологические операции, и вспомогательные, занятые на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования. Технические комплексы с такими роботами называются роботизированными – роботизированные технические комплексы (РТК).

Общий термин «робототехнические системы» (РТС) означает технические системы любого назначения, в которых основные функции выполняют роботы. Рассмотрение применения средств робототехники в промышленности начнем с классификации соответствующих технологических комплексов, сложившейся в машиностроении и приборостроении и основанной на следующих основных признаках:

- тип производственного подразделения;
- степень изменения производства, связанная с применением ПР;
- вид технологического процесса;
- количество выполняемых технологических операций;
- тип и количество используемого основного технологического оборудования;
- тип и количество используемых ПР;
- серийность и номенклатура продукции;
- компоновка комплекса;
- принцип управления комплексом;
- степень участия (функции) человека в комплексе.

В табл. 8.1 представлена общая классификация технологических комплексов применительно к машиностроению, основанная на перечисленных выше признаках. Рассмотрим их основные типы, перечисленные в табл. 8.1.

Таблица 8.1.

**Классификационные признаки и соответствующие им основные типы технологических комплексов с роботами.**

№ п/п	Признак	Наименование
1.	Тип подразделения	технологическая ячейка участок линия цех
2.	Степень изменения производства, связанная с применением ПР	Для вновь создаваемого производства: с принципиально новой технологией с новым технологическим оборудованием Для модернизируемого производства: с изменением технологии с модернизацией оборудования с созданием новых ПР
3.	Вид технологического процесса	Комплекс: механообработки холодной штамповки ковки литья прессования пластмасс термической обработки сварки транспортный контроля и испытаний и т.д.
4.	Тип и количество технологического оборудования	С выполнением основных технологических операций: технологическим оборудованием ПР их комбинацией
5.	Серийность и номенклатура продукции	С определенным размером выпускаемых партий продукции без переналадки комплекса С определенным перечнем видов (типов) выпускаемой продукции
6.	Компоновка комплекса	С компоновкой: линейной круговой линейно-круговой по площади объемной
7.	Тип управления	С управлением: централизованным децентрализованным комбинированным
8.	Участие человека	С участием человека: в выполнении технологических операций основных вспомогательных основных и вспомогательных

**Тип производственного подразделения** (табл.8.1,п.1). Здесь классификационным признаком служит количество выполняемых технологических операций. Простейшим типом, который лежит в основе более крупных комплексов, является *технологическая ячейка* (ТЯ). В ней выполняется всего одна основная технологическая операция (помимо вспомогательных). При этом количество единиц технологического оборудования и ПР в составе ТЯ не регламентируется. В частности, в ТЯ может совсем отсутствовать технологическое оборудование помимо ПР, когда основную операцию выполняет ПР, или, наоборот, могут отсутствовать самостоятельные ПР, когда последние объединены с основным технологическим оборудованием.

Следующим более крупным комплексом является *технологический участок* (ТУ). Он характеризуется тем, что здесь выполняется несколько технологических операций, которые объединены технологически, конструктивно (оборудованием) или организационно (управлением). Эти операции могут быть одинаковыми или различными. Если различные операции технологически последовательно связаны, то такой участок представляет собой *технологическую линию* (ТЛ).

Технологический участок не обязательно представляет собой совокупность ТЯ и может не иметь их совсем. Например, такой участок может включать несколько единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним ПР (неподвижным с размещением оборудования вокруг ПР или мобильным, перемещающимися вдоль ряда единиц оборудования).

Следующим типом комплекса является цех, состоящий обычно из нескольких участков. Пределом развития роботизированного производства является комплексно роботизированное предприятие.

В состав участков и цехов помимо технологических ячеек обычно входят еще склады, транспорт (в том числе и на базе ПР) и системы контроля качества продукции.

**Классификация технологических комплексов по степени изменения производства, связанного с применением ПР** (табл.8.1,п.2). Такое изменение, очевидно, будет максимально для создаваемых новых производств, основанных на новых технологиях и минимально для действующего производства, автоматизируемого на базе серийных ПР.

**Классификация по виду технологического процесса** (табл.8.1,п.3) не исчерпывает перечень последних, а включает только типовые для современного состояния областей применения ПР в машиностроении.

**Классификация по типу и количеству используемого основного технологического оборудования** (табл.8.1,п.4). Здесь выделены два уже названных выше основных варианта: когда ПР выполняют основные технологические операции (сборку, сварку, окраску и т.д.) или – вспомогательные по обслуживанию основного технологического оборудования.

**Серийность и номенклатура продукции** (табл.8.1,п.5) определяется в данном случае объемом партий продукции, которые можно изготавливать без переналадки комплекса, а номенклатура – широтой перечня выпускаемых видов (типов) продукции. Оба эти показателя имеют существенное влияние на



эффективность применение ПР. В частности, каждый технологический комплекс характеризуется предельными значениями этих параметров, вне рамок которых данный комплекс оказывается экономически невыгодным вплоть до целесообразности перехода от гибких комплексов к специальным автоматам (при большой серийной и узкой номенклатуре) или даже к использованию рабочих вместо ПР (в противоположном случае предельно единичного производства).

**В классификации по типу размещения технологического оборудования и ПР** (табл.8.1,п.6) приведены основные (базовые) типы компоновок. При простой линейной компоновке оборудование располагается в один ряд (по линии), а при наиболее сложной объемной компоновке – на нескольких этажах (уровнях).

**Классификация по типу управления** (табл.8.1,п.7) включает рассмотренные выше централизованное, децентрализованное и комбинированное управления. Централизованное управление осуществляется устройством группового управления. Децентрализованное управление реализуется с помощью совокупности местных устройств управления, связанных друг с другом с целью взаимной координации.

**Классификация по степени участия человека** (табл.8.1,п.8) включает два случая участия человека в работе: когда человек непосредственно выполняет некоторые технологические операции (основные или вспомогательные) и когда он участвует в управлении комплексом.

## **8.2. Компоновки технологических комплексов с роботами.**

В параграфе 8.1 была дана общая классификация технологических комплексов, где могут быть применены роботы. В отличии от простейших комплексов в виде технологической ячейки роботизированным участкам, линиям и цехам присущи следующие принципиально новые качества. Прежде всего – это необходимость транспортно-складской системы и единой системы управления. Эти системы материально и информационно связывают отдельные технологические ячейки, автоматизированные склады (материалов, заготовок, инструмента, отходов производства, готовой продукции) и другие части комплекса в одну согласованно действующую систему машин. Затем такие комплексы должны включать помимо систем динамического управления непосредственно технологическим оборудованием расположенные над ним уровни иерархии управления, решающие задачи программирования и оперативно-календарного планирования (сменного, суточного, недельного и т.д.).

На рис.8.1 показан пример простой линейной компоновки однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с непосредственной связью между составляющими линию ячейками. Здесь отсутствует межоперационная транспортная система, а предметы производства передаются от одной ячейки к другой непосредственно входящими в них вспомогательными ПР. Такие линии с непосредственной жесткой связью между

ячейками просты, однако требуют строго определенное взаимное расположение основного технологического оборудования.

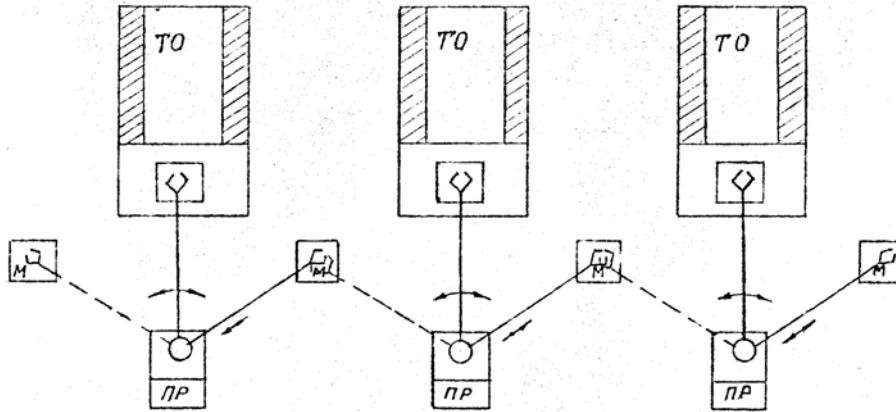


Рис.8.1. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой:

ТО – основное технологическое оборудование; ПР – промышленный робот; М – магазин поштучной выдачи заготовок.

На рис.8.2 показан более сложный вариант линейной компоновки однопоточ-

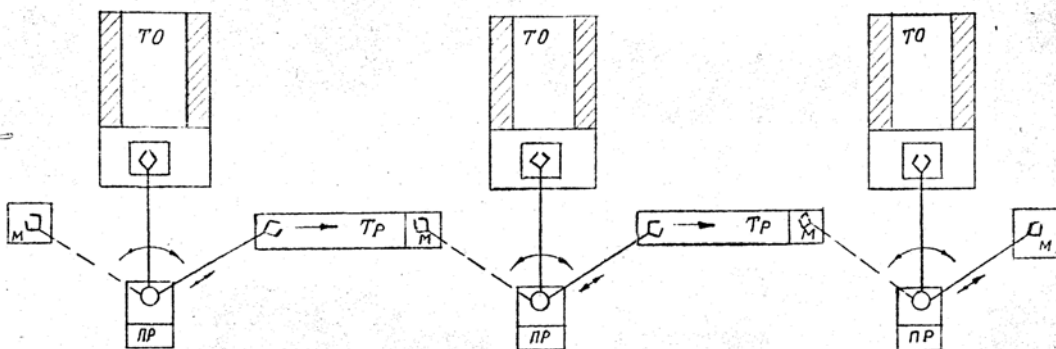


Рис.8.2. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с транспортным устройством:

Тр – транспортное устройство.

ной роботизированной технологической линии тоже холодной штамповки, в которой транспортные связи между составляющими их ячейками осуществляются

с помощью специальных транспортных устройств. Это дает возможность территориально развязать отдельные ячейки и тем самым облегчить компоновку всего комплекса. В качестве транспортного устройства могут быть использованы транспортер, мобильные ПР.

Показанные на рис.8.1 и 8.2 компоновки комплексов характерны для технологических процессов с малым циклом обработки предметов производства на технологическом оборудовании (единицы и десятки секунд), что свойственно, в частности, процессам холодно-листовой штамповки. Для технологических процессов с большей длительностью циклов обработки на технологическом оборудовании часто применяют другой тип построения комплексов с обслуживанием одним ПР нескольких единиц технологического оборудования. На рис.8.3 показан вариант такого комплекса с круговой компоновкой, в котором один ПР обслуживает три металлорежущих станка расположенных вокруг него. Другая

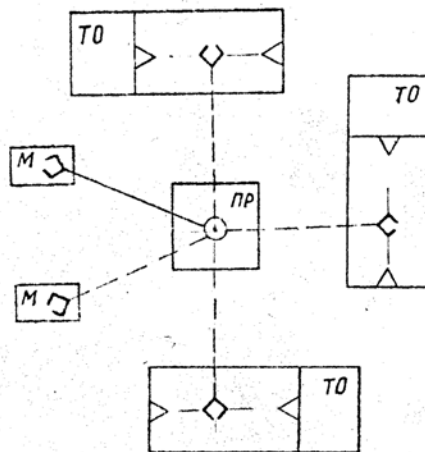


Рис.8.3. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с круговой компоновкой.

типовая компоновка линии механообработки с применением подвижного ПР, который может быть напольным или подвесным (перемещающимся, например, по монорельсу), приведена на рис.8.4.

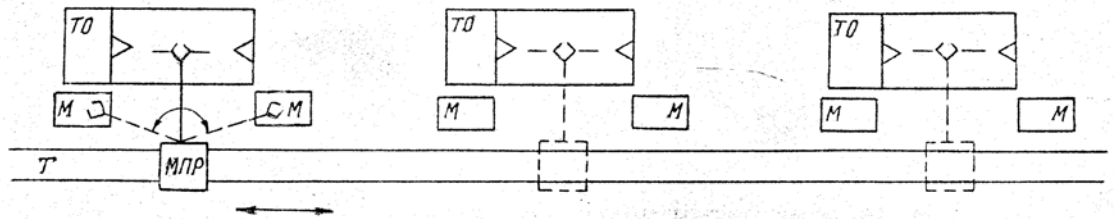


Рис.8.4. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с линейной компоновкой, обслуживаемого мобильным промышленным роботом:

МПР – мобильный промышленный робот; Т – трасса промышленного робота.

На рис.8.5 показан пример более сложного роботизированного технологического комплекса для цеха механообработки с линейно-круговой компоновкой. По схеме можно проследить последовательность движения предметов производства.

В приведенных примерах ПР выполняют вспомогательные операции по обслуживанию основного технологического оборудования. На рис.8.6 показана схема сборочной линии с линейной компоновкой, где все основные операции выполняют ПР. Транспортное устройство реализовано в виде шагового конвейера, по которому от одного рабочего места к другому перемещаются кассеты с объектами сборки.

На рис.8.7 представлена схема сборочного цеха, составленного из типовых сборочных линий, показанных на предыдущем рисунке.

На рис. 8.8 изображен типовой робототехнический сборочный участок с круговой компоновкой, характерной для приборостроительной промышленности. Схема дана упрощенно, на ней, в частности, не показаны промежуточные и конечные контрольные операции, обязательные в сборочном производстве.

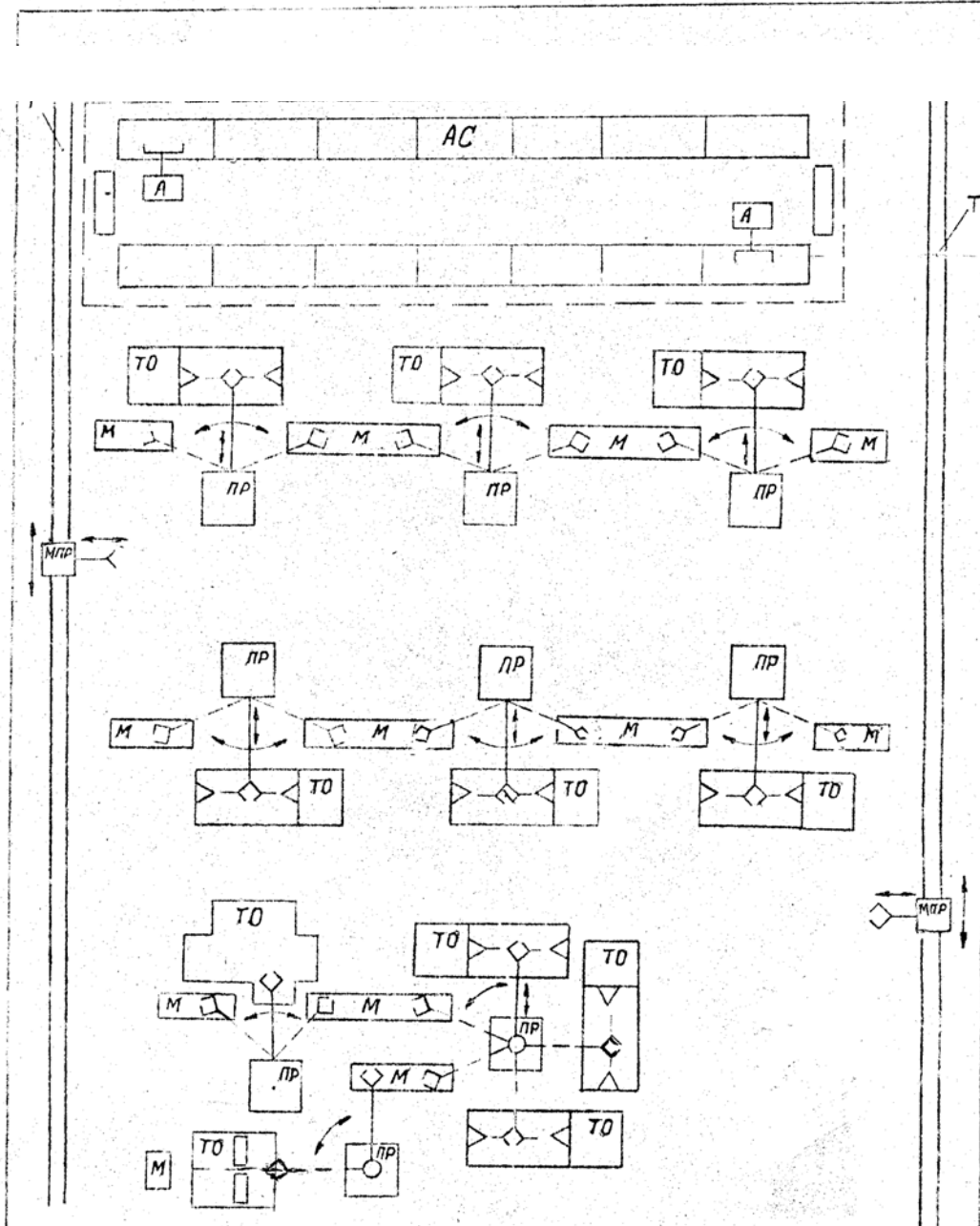


Рис.8.5. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с компоновкой по площади:

АС – автоматизированный склад с подвижными автоопера́торами-штабелерами А; Т – трасса транспортной системы с мобильными промышленными роботами МПР.

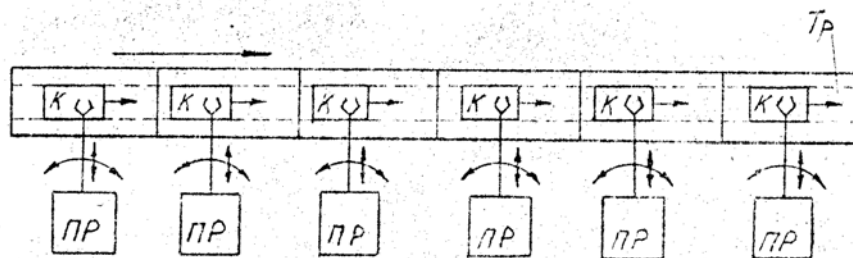


Рис.8.6. Схема сборочной робототехнической линии с линейной компоновкой:  
Тр – шаговый транспортер; К – кассеты.

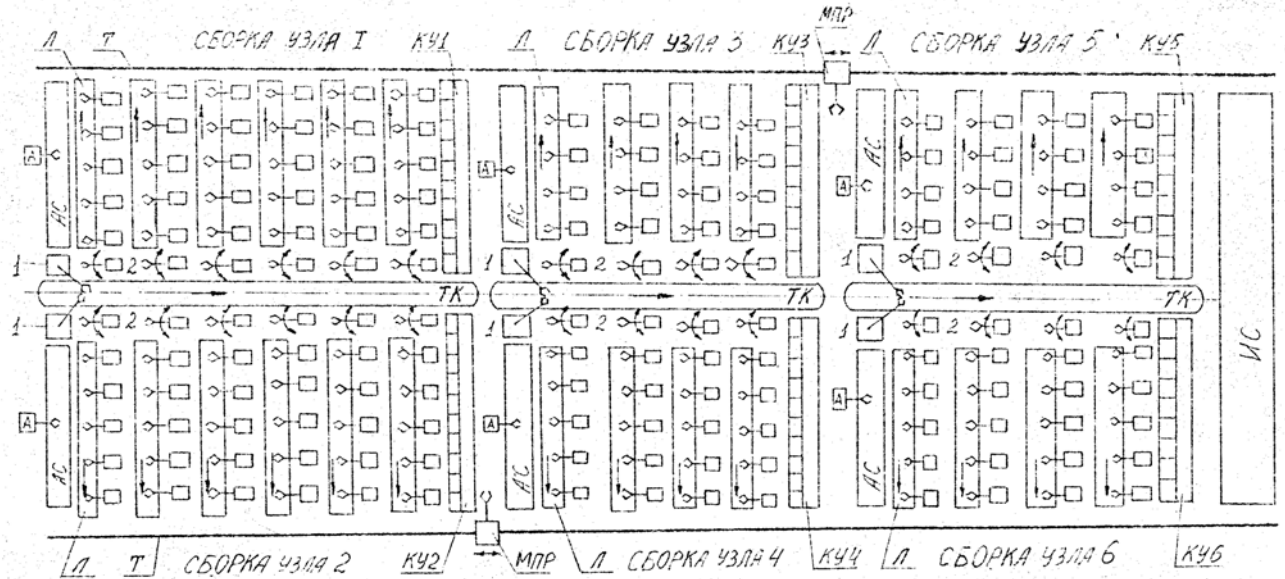


Рис.8.7. Схема сборочного цеха:

Л – робототехническая сборочная линия, КУ1-КУ6 – контроль узлов, АС – автоматизированный склад с автооператором А, ТК – транспортный конвейер, 1 – ПР для взятия кассет со склада и установки их на конвейер, 2 – ПР для взятия кассет с конвейера и передачи на сборку, МПР – мобильный ПР на трассе Т, ИС – испытательная станция.

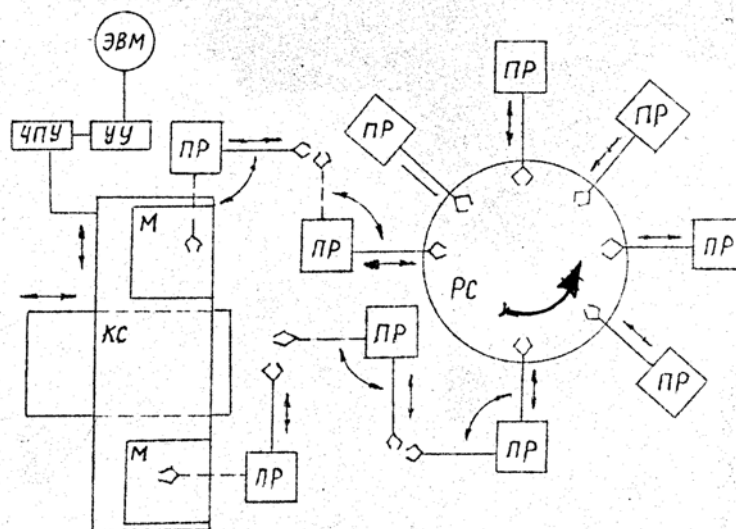


Рис.8.8. Схема робототехнического сборочного участка с круговой компоновкой:

РС – роторный стол, КС – координатный стол, М – магазин, УУ – устройство управления.

### **8.3. Управление технологическими комплексами.**

Все части технологических комплексов объединены общей системой автоматического управления. Эта система является иерархической и включает в общем случае следующие три уровня управления. Первый уровень образуют системы управления отдельными технологическими ячейками и другим работающим в составе комплекса оборудованием. На этом уровне применяют обычно специальные устройства управления типа ЧПУ.

Второй уровень управления – это уровень связывания отдельных частей, включая транспортные системы, в согласованно работающую систему машин. Реализуется этот уровень обычно на стандартных микро-ЭВМ. Помимо координации работы всех составных частей комплекса на этом уровне часто осуществляются контроль технологических режимов и исправности оборудования, синтез управляющих программ для первого уровня, обработка и передача информации между управляемыми частями комплекса и к следующему, третьему уровню управления.

Третий уровень – уровень оперативно-календарного планирования и контроля. Здесь составляется и хранится план производства по объему и номенклатуре на смену, сутки, неделю и т.д., производится контроль его выполнения, учет и анализ простоев оборудования. В состав этого уровня входят, кроме того, системы технической диагностики оборудования. Реализуется этот уровень на мини-ЭВМ. Все используемые в комплексе ЭВМ объединены в единую локальную информационно-вычислительную сеть.

Перечисленные три уровня управления являются основными и могут дополняться промежуточными уровнями. Так, системы управления отдельными технологическими ячейками в свою очередь могут иметь два уровня управления – уровень управления отдельными единицами входящего в ячейку оборудования и уровень совместного группового управления этим оборудованием в составе ячейки. В крупных комплексах типа цеха, содержащих несколько участков, наряду с системами управления этими участками обычно имеется следующий над ними уровень координации их работы.

### **8.4. Этапы проектирования технологических комплексов.**

В процессе создания технологических комплексов можно выделить три следующих основных этапа: технологический, алгоритмический и технический [16]. На первом этапе осуществляется анализ технологического процесса, в результате чего определяется структура комплекса. На рис. 8.9 показана типовая структура этого этапа. Анализ технологического процесса (ТП) является одним из наиболее ответственных этапов, от качества выполнения которого в значительной степени зависит эффективность разрабатываемого комплекса. В связи с тем, что этот этап включает сравнение большого числа возможных вариантов размещения

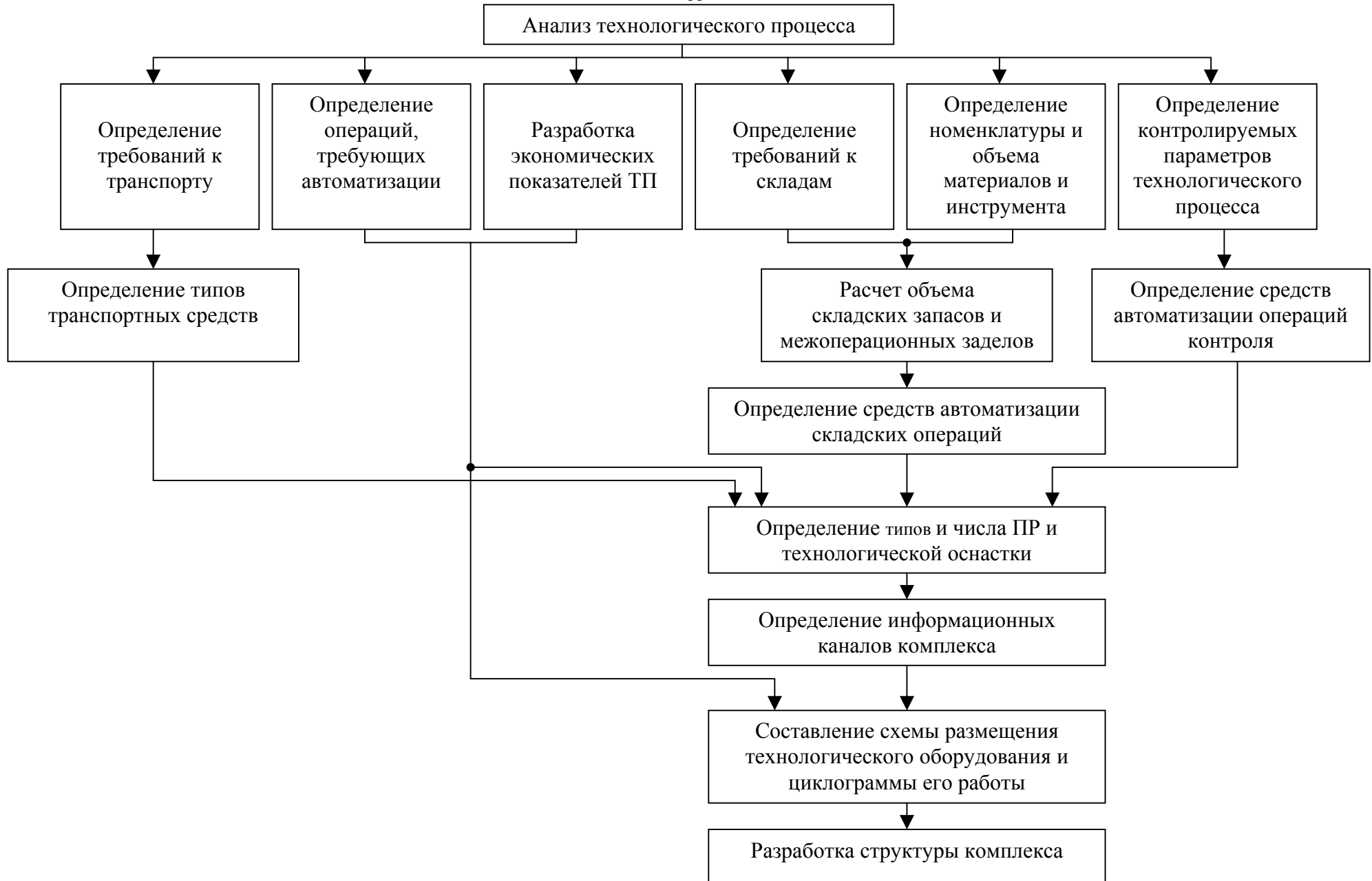


Рис. 8.9. Состав технологического этапа проектирования технологического комплекса.



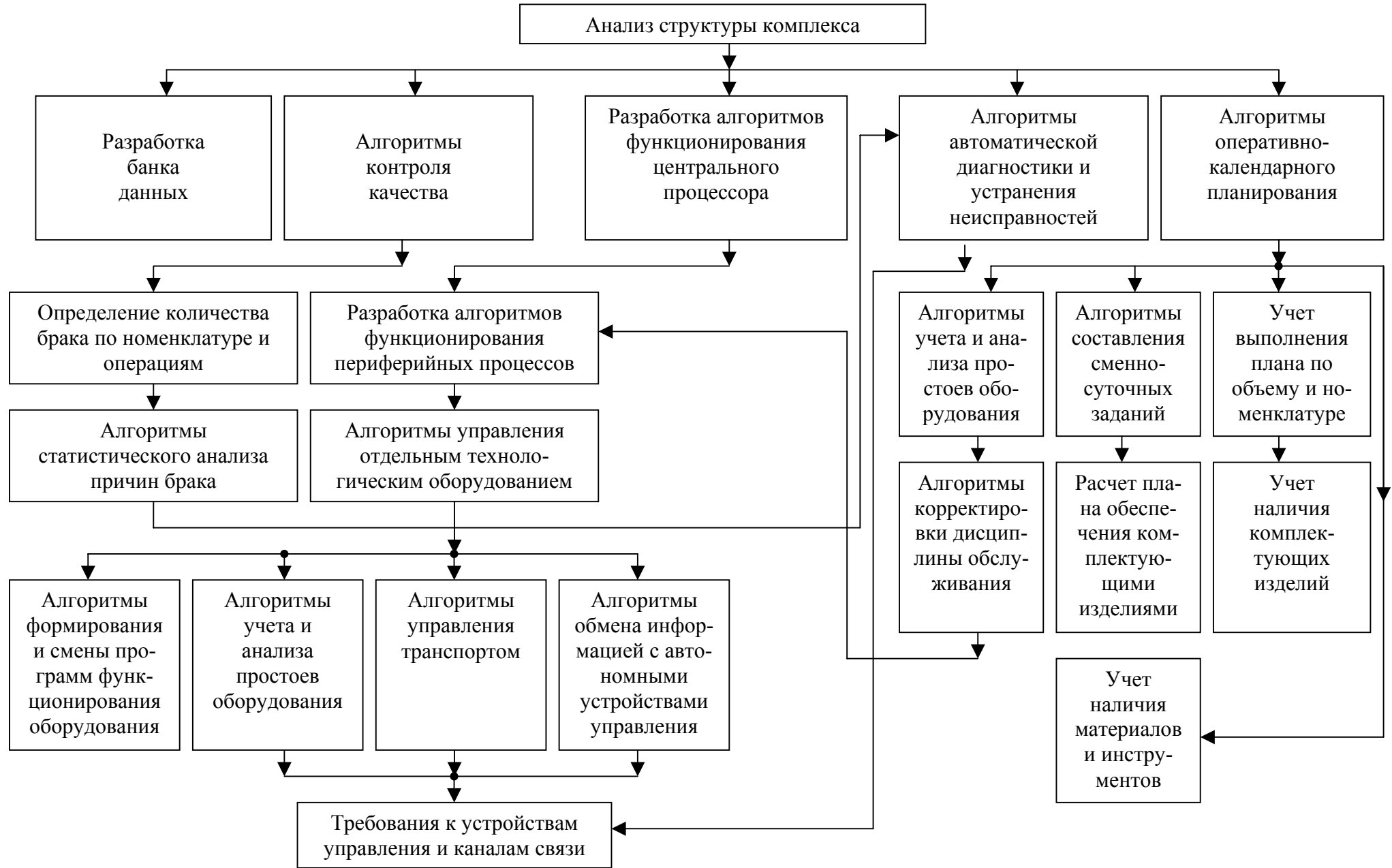


Рис.8.10. Состав алгоритмического этапа проектирования технологического комплекса.

оборудования, транспортных путей и т.п., важным средством его выполнения является компьютеризация.

Результатом следующего алгоритмического этапа разработки является определение алгоритмов функционирования всего комплекса и его частей, требований к устройствам управления, каналам связи и вспомогательному оборудованию. Функционально алгоритмический этап можно представить в виде, приведенном на рис.8.10. На этом этапе происходит также увязка с автоматизированной системой управления предприятием.

На этапе алгоритмического проектирования комплекса необходимо, в частности, учитывать следующие требования:

- наиболее полное и рациональное использование производственных фондов;
- возможность корректировки банка данных в ходе выполнения производственной программы;
- поэтапность ввода технологических комплексов и его частей.

При алгоритмической разработке технологических комплексов важным вопросом является обеспечение требований к надежности комплекса. Выход какого-либо из его устройств не должен влечь за собой остановку всего производственного процесса. Частично для устранения отдельных кратковременных отказов оборудования служат межоперационные заделы, но для полного решения проблемы надежности на стадии алгоритмического проектирования необходимо разрабатывать алгоритмы автоматической диагностики и оперативного устранения неисправностей.

Существенным элементом этого этапа является создание банка данных, содержащего все сведения о типах и характеристиках всего оборудования, устройств управления, каналов связи и т.д. Причем он должен непрерывно корректироваться и расширяться с включением существующих решений по отдельным элементам комплекса и по отдельным технологическим операциям. Банк данных должен включать буфер оперативного управления, через который осуществляется обмен данными с АСУ предприятия, в который заносятся параметры хода производственного процесса.

На рис.8.11 приведена типовая функциональная схема организации управления технологическим комплексом.

Заключительным этапом процесса проектирования технологического комплекса является его техническая реализация. Этот этап включает, в частности, разработку или выбор ПР, их устройств управления, технологической оснастки, транспортных путей и способов транспортировки, каналов связи, устройств информационного обеспечения на основе требований, определенных на предыдущих этапах проектирования.

### **8.5. Особенности роботизации технологических комплексов в действующих производствах.**

Задача комплексной автоматизации и роботизации действующих производств имеет принципиальные особенности, затрудняющие ее решение по сравнению с созданием новых технологических комплексов. В последнем случае создаваемый



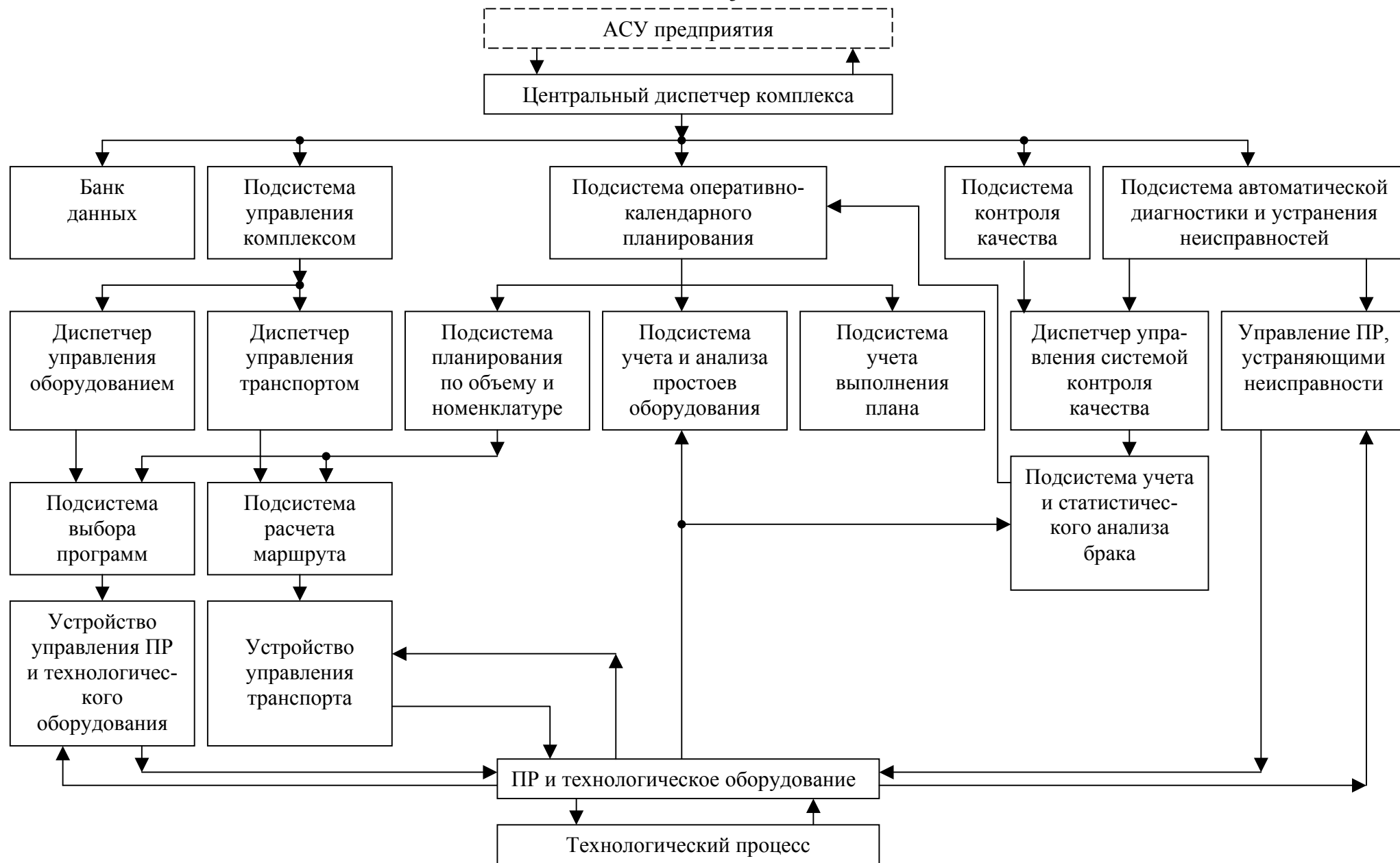


Рис.8.11. Схема управления технологическим комплексом.

комплекс с самого начала проектируют с учетом применения ПР и других средств робототехники, размещения оборудования, возможности использования специализированных ПР и манипуляторов, поставляемых в комплекте с основным оборудованием, сопряжения систем управления всех составных частей и т.д.

При решении этой задачи для действующего производства необходимо учитывать серьезные ограничения, обусловленные тем, что в этом случае речь идет о модернизации в большей или меньшей степени не приспособленного для применения средств робототехники технологических процессов и используемого в нем технологического оборудования. При этом часто не допускается так же длительная остановка производства.

Основными трудностями при решении этой задачи являются:

- необходимость размещения ПР и других средств робототехники на ограниченных площадях действующего технологического комплекса, включая обеспечение транспортных операций;
- необходимость достаточно полного и рационального использования возможностей применения ПР и их устройств управления, что в значительной степени определяет стоимость и эффективность работы всего комплекса, а также удобство его эксплуатации и надежности;
- обеспечение требуемой производительности, т.е., как правило, ее существенного повышения, в том числе за счет соответствующего быстродействия ПР.

Существует и ряд других трудностей, связанных с управлением всем комплексом, особенностями конструкции основного оборудования и производимой продукции, однако они имеют меньшее значение.

При решении рассматриваемой задачи первостепенное значение имеет требуемая грузоподъемность ПР и других средств робототехники, поскольку она в основном определяет их размеры, а следовательно, и возможности размещения на рабочем месте вместо высвобождаемых рабочих. В связи с этим при решении вопроса о применении ПР на действующем производстве следует различать следующие три приведенные в табл.8.2 основных случая в зависимости от массы объектов, которыми надлежит манипулировать. Как следует из табл.8.2, наиболее трудным случаем применения ПР и манипуляторов на действующем производстве является работа с изделиями, масса которых измеряется единицами килограммов (примерно до 25 кг), когда для размещения ПР и манипуляторов необходимо больше места, чем требуется для заменяемых ими рабочих.

Основным решением, которое в этом случае приемлемо практически почти всегда, является применение подвесных ПР, в частности с размещением их над основным оборудованием, когда ПР выполняют операции по его обслуживанию. Такое решение получило достаточно широкое распространение, например в механообработке. При этом часто используют мобильные ПР, передвигающиеся над основным оборудованием по рельсовому пути, что дает возможность обслуживать одним ПР несколько станков.

Таблица 8.2.

**Особенности применения промышленных роботов (ПР) и манипуляторов (М) в действующем производстве в зависимости от массы объектов манипулирования.**

Масса объектов манипулирования	Основная область применения	Занимаемый объем и условия размещения	Типовые решения
Доли килограмма	Приборостроение, легкая промышленность	ПР и М занимают места меньше, чем рабочий, поэтому разместить их на рабочем месте, как правило, несложно.	При использовании ПР для обслуживания основного оборудования ПР или их отдельные модули размещают непосредственно на их оборудовании.
Единицы килограммов	Основная часть машиностроения	ПР и М занимают больше места, чем рабочий. В связи с этим существует проблема их размещения в пределах существующего рабочего места.	Подвесные ПР, в том числе подвижные (на рельсах); модульного построения (с минимальной избыточностью) и вынесенным устройством группового управления.
Десятки килограммов и более	Тяжелое машиностроение, транспорт	ПР и М занимают места не больше, чем рабочий вместе с используемыми им специальными средствами механизации для работы с большими грузами.	ПР модульного построения, сбалансированные манипуляторы.

Наряду с ПР для рассматриваемых целей широкого применения находят сбалансированные манипуляторы с ручным управлением. Размещаясь на вертикальной колонне, они занимают значительно меньше места, чем ПР той же грузоподъемности, благодаря чему их часто можно устанавливать в действующих цехах без перемещения основного оборудования. Кроме того, такие манипуляторы дешевы и просты в управлении. Их применение позволяет существенно облегчить условия труда, повысить производительность, а за счет этого сократить количество рабочих.

## 8.6. Гибкие производственные системы.

Рассмотрим теперь особенности применения средств робототехники при создании новых комплексно-автоматизированных производств. Их высшей формой являются гибкие автоматизированные производства (ГАП). Такие производства позволяют быстро переходить на выпуск новой продукции, осуществлять ее модернизацию, совершенствовать технологию производства прежде всего путем смены управляющих программ. Создание и внедрение ГАП выходит за рамки робототехники, однако ПР являются важнейшим универсальным компонентом таких производств.

На рис. 8.12 приведен типовой состав ГАП. Как здесь показано, в наиболее полном, завершенном виде такое производство состоит из двух частей:

- гибко автоматизированной собственно производственной части, представленной в верхней части рисунка, которая непосредственно реализует технологический процесс изготовления изделий, и
- автоматизированных систем научных исследований и проектирования подлежащих изготовлению изделий (АСНИ, САПР) и технологической подготовки их производства (АСТПП), реализуемых с помощью показанных в нижней части рисунка автоматизированных рабочих мест (АРМ). Эти части объединены общей системой управления АСУ, которая реализуется локальной компьютерной сетью.

Предел, к которому стремится процесс гибкой автоматизации производства, можно кратко определить так:

- автоматическое производство изделий сколь угодно малыми партиями;
- себестоимость и производительность, близкие к достигнутым в современном массовом производстве;
- практически безлюдное производство – количество работающих по сравнению с существующим меньше на два порядка;
- комплексная автоматизация всех частей производства, включая технологические процессы, подготовку производства, разработку конструкторской документации на выпускаемые изделия, планирование и управление производства в целом.

Таким образом, в максимально полном исполнении ГАП на его вход поступают технические задания на очередное изделие, а на выходе – готовая продукция. При этом весь процесс может происходить непрерывно круглые сутки на основе машинных носителей информации, т.е. без бумажной документации.

В целом понятие гибкость можно определить как возможность быстрой реакции производства на следующие внутренние и внешние «возмущения»:

- задания извне переходить на выпуск новой продукции в пределах заданной номенклатуры должны реализоваться путем смены управляющих программ, а при изменении этой номенклатуры – путем изменения состава используемого технологического оборудования;

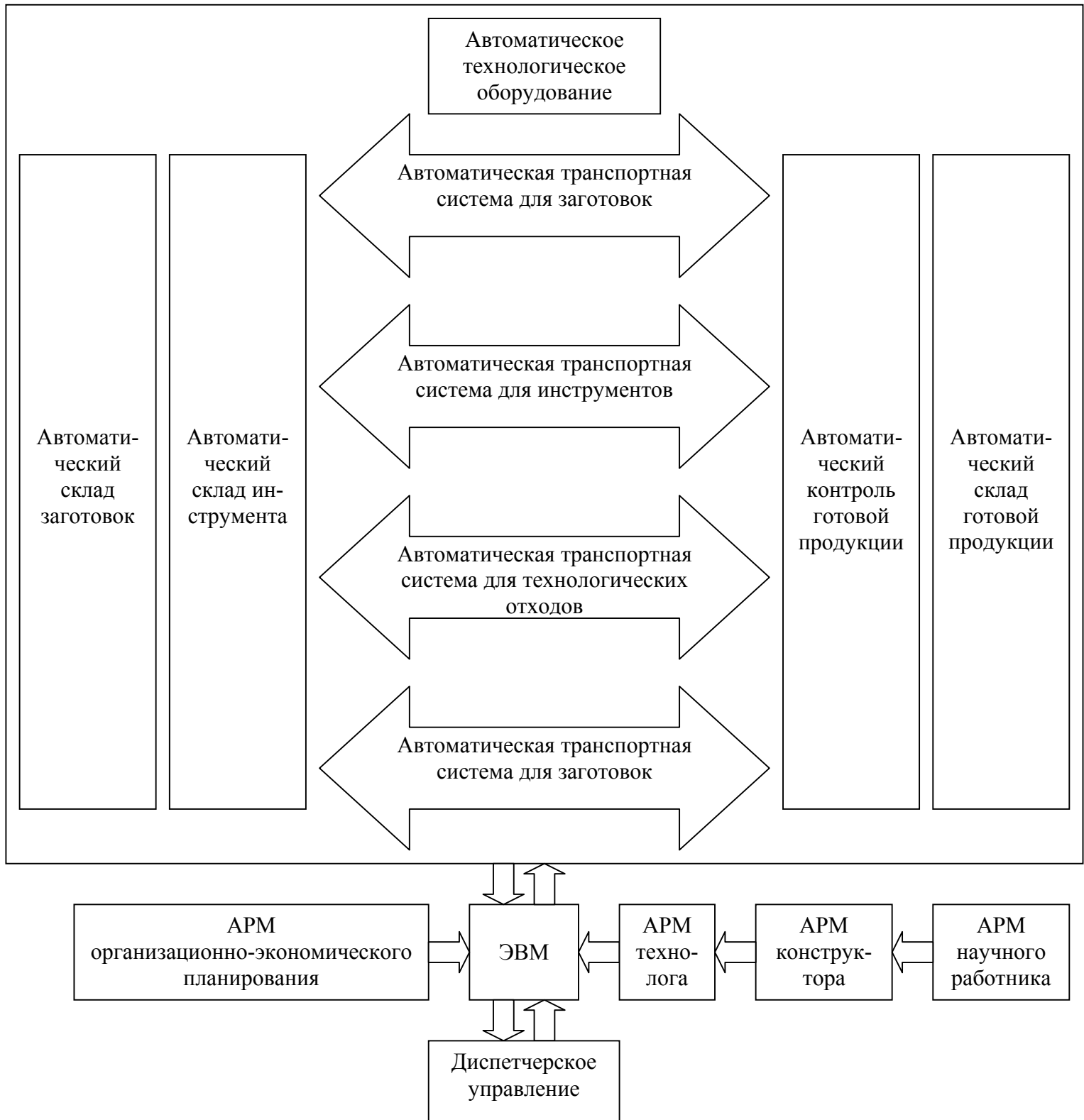


Рис.8.12. Состав гибкого автоматизированного производства.



- выход из строя отдельных единиц оборудования или других частей производства должен быстро парироваться их заменой.

Для мелкосерийного производства степень гибкости обычно характеризуется количеством типов изделий, которые изготавливают путем смены только программ. Типичные значения этой величины для современных ГАП механообработки — десятки типов деталей и сотни их модификаций. Антиподом ГАП в отношении гибкости являются автоматические линии с так называемой жесткой автоматизацией (см.рис. 8.13).

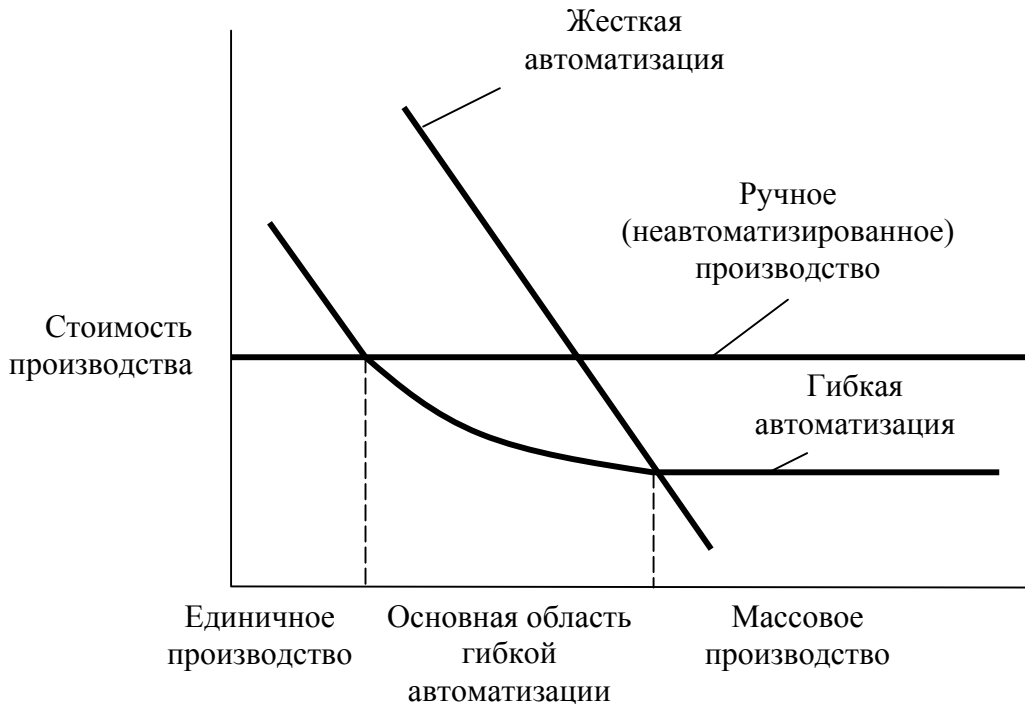


Рис.8.13. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства.

В мире с внедрением гибкой автоматизации связываются следующие конкретные выгоды:

- повышение конкурентоспособности продукции (за счет более быстрой сменяемости выпускаемых изделий, повышения их качества, экономии ресурсов и труда);
- рост производительности;
- стабилизация производства и ускорение оборачиваемости капитала;
- повышение эффективности использования рабочей силы;
- создание новых технологических процессов и производств.

Основным принципом построения гибких производств является компоновка их из комплектно-поставляемых унифицированных модулей. В соответствии с составом ГАП, показанным на рис. 8.12, основными такими модулями являются технологические (робот-сборщик, сварщик и т.д., станок-робот, пресс-робот и т.д.), транспортные (в том числе на базе транспортных навесных и напольных роботов), складские (в том числе с роботами-штабелерами), модули контроля качества

продукции и технической диагностики оборудования. Последние модули образуют систему автоматического контроля качества, без которой невозможна автоматическая работа всего комплекса. В задачи таких систем входят собственно измерение контролируемых параметров, регистрация результатов этих измерений, визуализация их на терминалах, подача управляющих воздействий в системы управления оборудованием, когда по этим параметрам осуществляется автоматическая корректировка технологических процессов (например, в случае адаптивного управления станками, учитывающего износ инструмента, изменение размеров заготовок и т. п.). Примером оборудования, используемого в системах автоматического контроля ГАП, являются робототехнические контрольно-измерительные машины.

## **ГЛАВА 9. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ.**

### **9.1. Классификация технологических комплексов с роботами на основных технологических операциях.**

Как было указано в главе 1, одна из неизменных тенденций в развитии робототехники – это устойчивый рост доли ПР, применяемых на основных технологических операциях. В 1980-1981 годах их доля в общем парке роботов впервые превысила 50 %. Опыт показывает, что хотя внедрение ПР на основных операциях требует значительно больших (в три-четыре раза) затрат, чем на вспомогательных операциях, именно здесь достигается наибольшая эффективность применения ПР при высвобождении рабочих. Велик здесь и социальный эффект в связи с вредностью для человека ряда таких операций (например, окраска, сварка) или с их монотонностью (например, сборка на конвейере). Основными типами таких комплексов в машиностроении являются технологические комплексы сборки, сварки, нанесения покрытий, шлифования, зачистки, клепки. К ним относятся также комплексы для бурения в горном деле, монтажа огнеупоров в металлургии, для монтажных и облицовочных работ в строительстве, упаковки штучной продукции в легкой и пищевой промышленности.

### **9.2. Сборочные робототехнические комплексы.**

Этот тип робототехнических комплексов по своему значению является, пожалуй, наиболее важным. Трудоемкость сборочных операций в машиностроении достигает 40% себестоимости изделий, а в приборостроении еще больше – до 50-60%. Вместе с этим степень автоматизации сборочных работ сегодня весьма низка в связи с ограниченными возможностями, которые имеют здесь традиционные средства автоматизации в виде специальных сборочных автоматов. Такие автоматы применимы главным образом в массовом производстве, в то время как, например, в машиностроении до 80% продукции относится к мелкосерийному и серийному производству. Поэтому создание гибких сборочных комплексов на базе ПР является одним из основных направлений в автоматизации сборочных операций.

К сборочным операциям относятся механическая сборка, электрический монтаж, микроэлектронная сборка. Процесс сборки состоит из следующих взаимосвязанных последовательных операций:

- загрузка собираемых деталей в загрузочные и транспортные устройства (обычно с их ориентацией);
- перемещение деталей к месту сборки;
- базирование, т.е. фиксация в строго определенной позиции, с относительной ориентацией деталей на сборочной позиции;
- собственно операция сборки, т.е. сопряжения деталей, включая часто закрепление;
- контрольно-измерительные операции в ходе сборки;

- удаление собранного узла со сборочной позиции для перемещения его на следующую сборочную позицию, если сборка не закончена.

Каждая из этих операций принципиально может быть выполнена с помощью ПР, но не всегда это целесообразно. В тех, например, случаях, когда требуется перемещение по одной координате, более простым решением может быть применение устройства типа толкателей. В других случаях могут применяться специальные ориентаторы и простые однопрограммные механические руки. Роль ПР в сборочных комплексах наряду с более простыми и специальными средствами автоматизации может быть различной. Зависит это, прежде всего, от конкретных требований к гибкости комплекса, что в свою очередь определяется в основном серийностью выпускаемой продукции. Поэтому рассмотрим роль ПР в сборочных комплексах в соответствии со следующей их классификацией в зависимости от объема выпуска продукции начиная с массового производства и до единичного:

- 1) специальные сборочные автоматы для массового и крупносерийного производства с возможным применением простых автоматических манипуляторов на вспомогательных и отдельных основных сборочных операциях;
- 2) робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства, в которых сборочные операции выполняют специальные (простые) ПР с цикловым управлением;
- 3) робототехнические сборочные комплексы для крупносерийного и серийного производства на базе универсальных и специализированных ПР, каждый из которых может осуществлять любые сборочные операции за счет смены инструмента (в том числе непосредственно и процессе сборки изделия);
- 4) робототехнические сборочные комплексы для серийного производства, в которых вся сборка выполняется одним сложным универсальным ПР;
- 5) робототехнические сборочные комплексы для серийного производства с участием человека в управлении ПР или в выполнении им отдельных операций вручную.

Включение человека непосредственно в технологический процесс сборки может вызываться либо экономическими соображениями, либо технической невозможностью сегодня автоматизировать отдельные сложные операции (например, некоторые регулировочные и настроечные), либо необходимостью оперативного подключения человека в аварийных ситуациях, когда автомат по какой-то причине не справляется с заданием, либо, наконец, временно на этапе освоения сборки нового изделия (в том числе и как один из способов программирования методом обучения).

Примерами специальных сборочных автоматов, указанных в пункте 1, являются автоматы для монтажа печатных плат и сборочные роторные линии, используемые в массовом и крупносерийном производствах. Средства робототехники находят здесь ограниченное применение в основном для их обслуживания на входе и выходе (операции загрузки-выгрузки) [16].

На рис.9.1 показан один из первых отечественных робототехнических

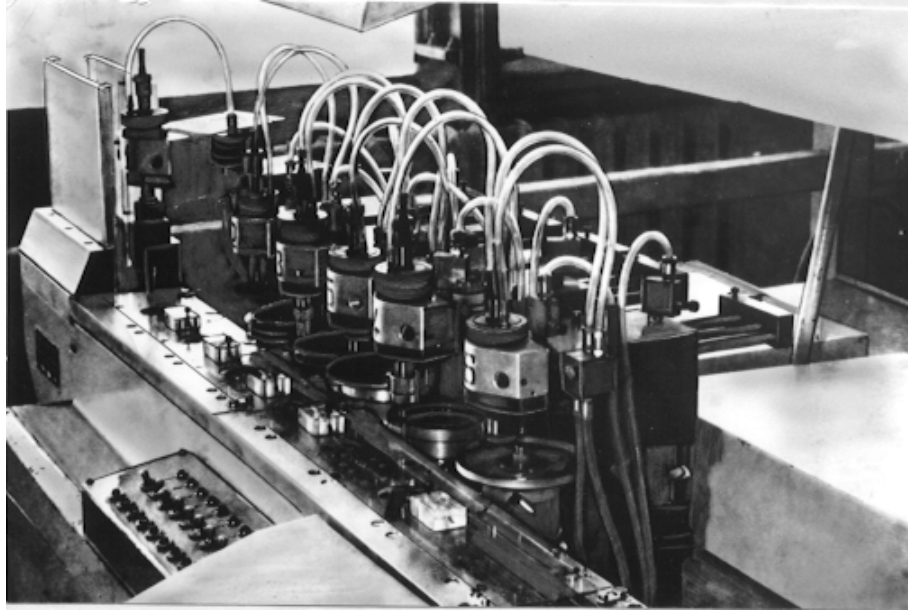


Рис.9.1. Робототехнический сборочный комплекс массового производства наручных часов.

сборочных комплексов массового производства механических наручных часов на базе специальных ПР, относящийся к следующему пункту 2 данной выше классификации. На прямоточной транспортной системе закреплено приспособление-спутник, которое перемещается от позиции к позиции по прямой линии с фиксацией через равные промежутки времени. Сборка осуществляется по принципу параллельно-последовательной сборки на всех позициях одновременно с последующей подачей приспособления-спутника на очередной шаг. Установка оснащена специальными пневматическими ПР со сменяемыми приспособлениями в зависимости от марки собираемых часов.

В целом сборочный комплекс включает транспортную систему, специальные ПР, пульт управления, вибробункеры, питатели, а также различную оснастку и приспособления. Детали и узлы часов поступают на позиции сборки из вибробункеров в ориентированном положении. Платины часов, набранные в кассеты, автоматически устанавливаются в приспособления-спутники, которые являются составным элементом прямоточной транспортной системы. Роботы производят установку деталей или узлов в платину часов в заданной последовательности и с необходимой точностью. Чтобы обеспечить условия собираемости, платина часов фиксируется снизу с помощью специального приспособления. Полный цикл работы комплекса – 6-10 с. Высокая ритмичность работы комплекса и непрерывность выполнения операций позволили в шесть-восемь раз повысить производительность, улучшить качество сборки часов, ликвидировать монотонный ручной труд, поднять культуру и организацию производства.

На рис. 9.2 показан пример сборочного робототехнического комплекса, построенного на базе универсального ПР (пункт 3 классификации). Комплекс включает несущую раму, поворотный стол, загрузочные и ориентирующие устройства, устройства крепления оснащения, кабельные узлы, устройство



выдача. Для обеспечения условий собираемости и снижения требований к точности изготовления сборочных элементов, оснастки и приспособлений манипуляторы ПР оснащены вибромодулями. За один рабочий цикл выполняются все технологические

операции десятью ПР по принципу параллельно-последовательной сборки. В конце цикла происходит перемещение координатного устройства, которое подает в позицию захвата первого ПР и в позицию сброса десятого ПР соответствующие ячейки подающей и приемной кассет, а также перемещение на один шаг поворотного стола, на специальных ложементх которого производится сборка контурной катушки. Длительность цикла работы комплекса – 10 с.

Применение подобных сборочных комплексов на порядок повышает производительность труда, дает экономию производственной площади и позволяет осуществить комплексную автоматизацию сборочного производства в целом. Переналадка комплекса осуществляется заменой рабочих органов ПР и их управляющих программ. По сравнению с предыдущим типом сборочных комплексов, основанных на использовании специальных ПР, применение здесь на всех операциях одного типа универсального ПР расширяет номенклатуру собираемых изделий, хотя сами ПР при этом оказываются более сложными и избыточными по своим возможностям применительно к каждой отдельной выполняемой ими операции. Поэтому переход от специальных ПР к универсальным оказывается оправданным с уменьшением серийности выпускаемых изделий.

На рис.9.3 показан участок автоматизированного сборочного производства, включающий три сборочных комплекса, автоматы намотки катушек и автоматическую транспортно-складскую систему. Мини-ЭВМ осуществляет изменение программ работы оборудования участка, а также диспетчерирование и оптимизацию загрузки оборудования на основании плана поставок и располагаемых материальных ресурсов.

На рис. 9.4 представлена схема линии сборки с помощью ПР трансформаторов с элементами осязательного и адаптивного управления. На несущей раме смонтировано сборочное оборудование — три ПР, питатели собираемых деталей и сборочная оснастка. В линию входят также установка формовки и сушки трансформаторов и ряд других элементов.

Устройство управления линии осуществляет групповое управление всеми ПР и технологическим оборудованием по заданной программе. Кроме того, в него включен узел адаптации, состоящий из тактильного сенсора и системы контроля тока холостого хода трансформатора. Набор вспомогательных программ позволяет контролировать качество сборки трансформаторов и принимать решение о дальнейшем порядке работы в зависимости от полученной информации.

Роботы реагируют на нестандартные ситуации, которые могут складываться во время работы:

- невыполнение одного из условий собираемости узла,
- несоответствие магнитных и электрических параметров заданным.

Линия работает по принципу последовательной сборки следующим образом. При поступлении нижней пары магнитных сердечников с питателя на исходную

позицию сборки подается команда на ПР, который берет катушку из питателя и устанавливает ее на пару сердечников. Другой ПР берет с исходной позиции питателя два верхних магнитных сердечника, последовательно отпускает их в обезжиривающий и клеевой растворы, а затем соединяет с катушкой и двумя нижними сердечниками. Третий ПР удаляет собранный трансформатор с позиции сборки и с одновременным разворотом подает в установку формовки и сушки карусельного типа. В установке трансформаторы обжимаются и подогреваются для склейки торцов сердечников.

В процессе сборки трансформаторов контролируется:

- поступление деталей на исходные позиции (оптические датчики);
- собираемость деталей и узлов (датчики положения);
- электрические параметры магнитопривода (датчики тока).

После окончания формовки и сушки трансформатора осуществляется выходной контроль его электрических параметров. В случае невыполнения одного из условий детали или узлы сбрасывают в браковочную тару.

Следующим типом робототехнических сборочных комплексов, которые оказываются экономически более выгодными при меньшей серийности производства, являются комплексы с ПР, последовательно выполняющими ряд сборочных операций на одном рабочем месте вплоть до полной сборки целого изделия (позиция 4 данной выше классификации). Такое построение комплекса существенно повышает его гибкость, позволяя чисто программно изменять число сборочных операций без изменения числа ПР, что неизбежно, если каждый ПР выполняет только одну операцию. В таких комплексах ПР в ходе сборки многократно сменяет свои рабочие органы при переходе от одной операции к другой. Примерами сборочных ПР, предназначенных для такой многооперационной сборки, являются электромеханические ПР типа «Сигма» (Италия, см.рис.3.5) и «Пума» (США, см.рис.3.8).

На рис.9.5 показан один из первых робототехнических комплексов, осуществляющих сборку на одном рабочем месте такого достаточно сложного изделия как пылесос, фирмы «Хитачи» (Япония). Комплекс смонтирован на сборочном столе и включает два электромеханических манипулятора 1, 2 с восьмью степенями подвижности, первый (силовой) работает в вертикальной плоскости, а второй (очувствленный) – в горизонтальной, семь телевизионных камер. Три из них ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ориентированы вертикально, а четыре (A, B, C, D) – горизонтально. Захватное устройство чувствленного манипулятора снабжено датчиками усилия, давления и тактильными.



Пылесос 3 собирается из трех узлов: фильтра 4, электродвигателя 5 и корпуса 6, которые поступают на сборку неориентированными.

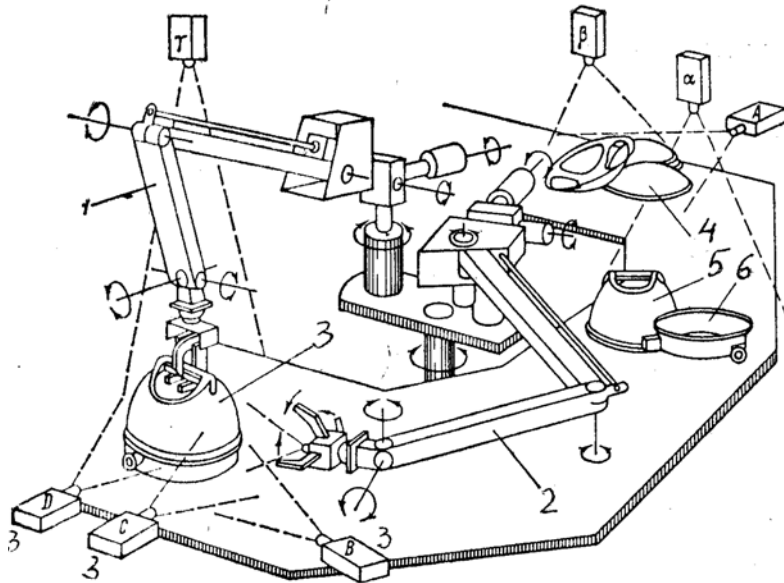


Рис.9.5. Робототехнический комплекс для сборки пылесосов.

### 9.3. Сварочные робототехнические комплексы.

Сварка — одна из областей широкого применения ПР. Из многочисленных видов сварки ПР получили основное применение на контактной точечной, дуговой, а также на электронно-лучевой сварке. Контактная точечная сварка осуществляется путем нагрева импульсным электрическим током. Рабочими органами ПР для выполнения такой операции являются сварочные клещи (см. на рис.9.6). Существуют

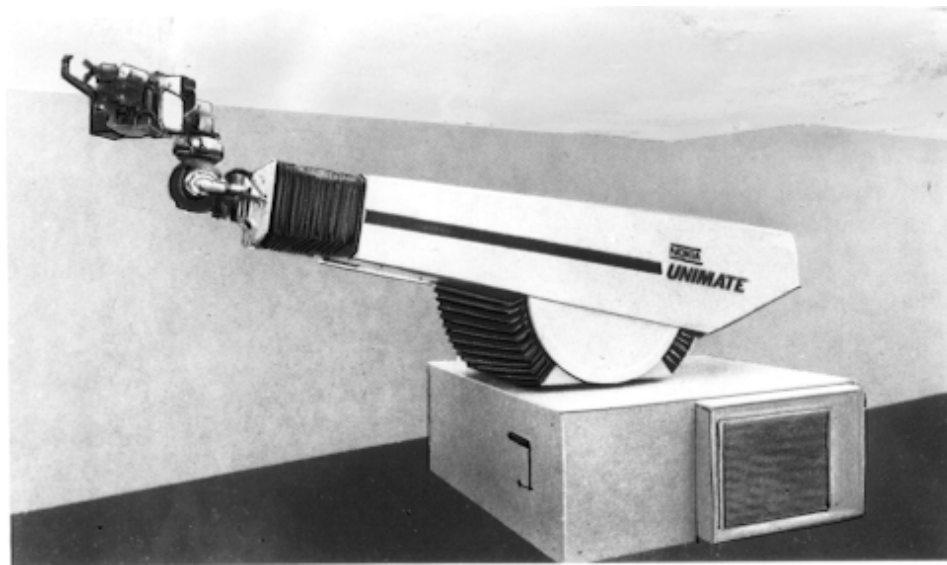


Рис.9.6. Сварочный робот Юнимейт

сварочные ПР, у которых манипулятор заканчивается одним электродом, а вторым электродом служит само свариваемое изделие (рис. 9.7). Промышленные роботы для

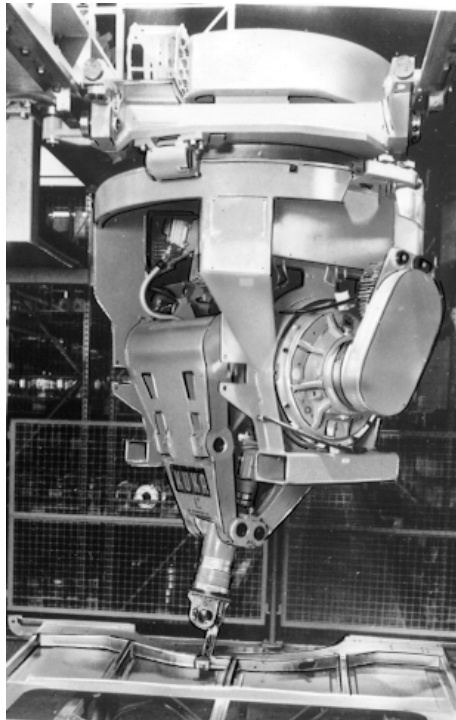


Рис.9.7. Сварочный робот фирмы КУКА.

боты для контактной точечной сварки имеют специальную конструкцию, которая предусматривает размещение сварочного трансформатора и токопроводящего кабеля, идущего от него к сварочным клещам. Сварочный трансформатор расположен обычно на манипуляторе ПР, в том числе и непосредственно в его рабочем органе (с целью максимально сократить длину кабеля от трансформатора к сварочным клещам, по которым проходит большой импульсный сварочный ток). Грузоподъемность таких сварочных ПР обычно составляет 20-30 кг. Управление ПР для контактной точечной сварки дискретное позиционное. Устройство управления должно быть рассчитано на работу в условиях сильных электромагнитных помех, создаваемых импульсами сварочного тока.

Наиболее широко контактная точечная сварка с помощью ПР применяется в автомобилестроении (сварка кузовов), судостроении и вагоностроении. На рис.9.8 показан участок сварки кузовов автомобилей с помощью ПР.

Дуговая сварка — более сложный технологический процесс, чем контактная точечная. Здесь требуется осуществлять непрерывное перемещение сварочного электрода с определенной скоростью по сложной траектории вдоль свариваемого шва с одновременным поперечным перемещением для создания нужной формы. Электрод при этом должен сохранять определенную ориентацию по отношению к плоскости шва. Грузоподъемность ПР для дуговой сварки меньше, чем ПР для контактной точечной, и не превышает 5-8 кг. Промышленный робот для дуговой сварки часто комплектуется еще столом с несколькими степенями подвижности по углу для размещения на нем свариваемых изделий и манипулирования ими перед ПР.



Рис.9.8. Участок точечной сварки роботами кузовов автомобилей.

В функции устройства управления ПР для дуговой сварки помимо управления движением входит еще регулирование параметров режима сварки (тока, напряжения дуги, притока газа и т.д.). Управление при этом должно быть адаптивным. Основные задачи адаптации — это поиск начала шва, слежение за кромками свариваемых деталей с учетом возможной кривизны их поверхностей и ориентации электрода. Кроме того, адаптация требуется при регулировании технологических параметров собственно процесса сварки с учетом состояния внешней среды.

Для контроля положения электродов относительно кромок свариваемых деталей применяют контактные и магнитные датчики, ультразвуковые и оптические дальномеры, телевизионные системы. На рис.9.9 показан робототехнический комплекс для дуговой сварки в комплекте с манипуляционным столом — так называемый сварочный центр.

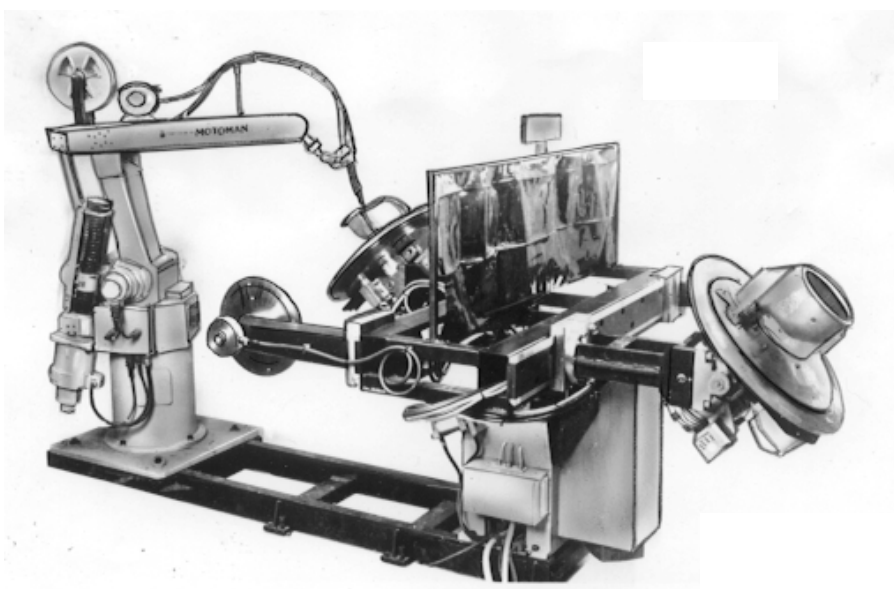


Рис.9.9. Робототехнический комплекс для дуговой сварки с ПР «Мотоман» с двухкоординатным столом.

Электронно-лучевая сварка осуществляется в вакууме путем перемещения электронного пучка, создаваемого электронной пушкой, по линии шва. Этот вид сварки интересен тем, что в отличие от обычных механических манипуляторов здесь манипулирование производится электронным лучом с помощью отклоняющего магнитного или электрического поля. (Хотя существуют установки и с перемещением стола, на котором крепятся свариваемые детали.) Управление движением луча по шву осуществляется в простейших случаях по жесткой программе, а при наиболее сложных траекториях стыка – с применением адаптивного управления и обратной связи через телевизионную систему технического зрения.

С робототехническими комплексами для сварки схожи комплексы для пайки и резки (дугой, лазерным лучом, плазмой). Последние, в частности, широко применяют для раскроя материала и снабжают обычно устройствами ЧПУ.

#### 9.4. Робототехнические комплексы для нанесения покрытий.

Промышленные роботы нашли применение на операциях нанесения покрытий различного назначения: лакокрасочных, защитных, упрочняющих, герметизирующих и т.п. Операции эти для человека не только физически тяжелы, но и вредны для здоровья. В большинстве случаев нанесение покрытий связано с применением взрыво- и пожароопасных веществ. Поэтому используемые на таких операциях ПР должны иметь взрывобезопасное исполнение. Для нанесения покрытий широко применяют пульверизаторы. На рис.9.10 показан ПР с пульверизатором в качестве ра-

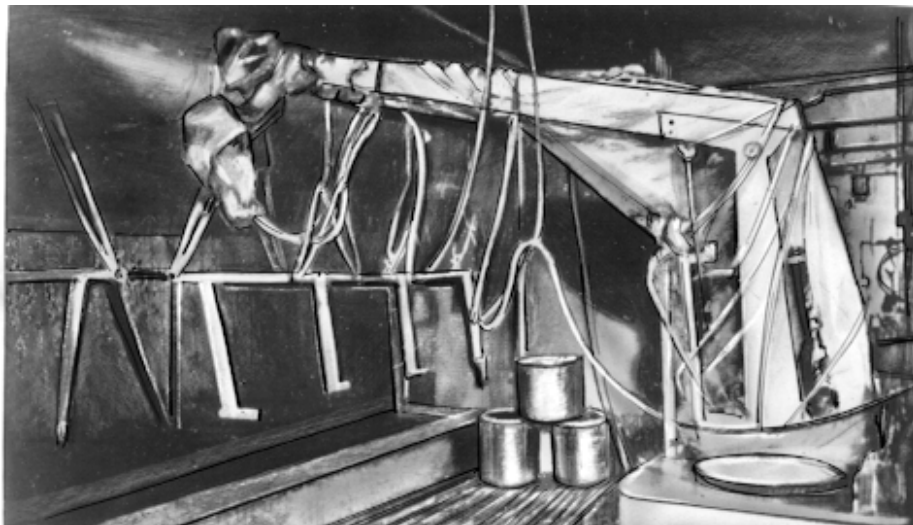


Рис.9.10. Роботизированный окрасочный комплекс с ПР фирмы «Девилбис» (США).

бочего органа. Робот такого же назначения был показан на рис.4.9. Управление такими ПР – непрерывное (контурное) с программированием методом обучения. По сравнению со сварочными ПР требование к точности ПР для нанесения покрытий существенно ниже, а к быстродействию, наоборот, выше. Применяется в этих ПР и

адаптивное управление: с использованием системы технического зрения для определения габаритов очередного изделия, на которое должно быть нанесено покрытие. По полученным данным автоматически выбирается и корректируется управляющая программа для ПР.

Другим вариантом технологии нанесения покрытий является использование для этого электростатического поля. Этот способ обеспечивает высокое качество покрытия и более экономичен. Однако высокое напряжение (десятки киловольт) создает дополнительную взрывоопасность, что ограничивает область применения окрасочных ПР с такого типа распылителями.

Широкое применение получили средства робототехники для нанесения гальванических покрытий. Основная манипуляционная операция здесь — это погружение в ванны деталей или корзин с деталями и перемещение их от одной ванны к другой. Операция эта выполняется с помощью простых однопрограммных

автооператоров. На рис.9.11 показана линия гальванопокрытий. Сегодня тысячи автооператоров заменяют рабочих в этом вредном производстве.

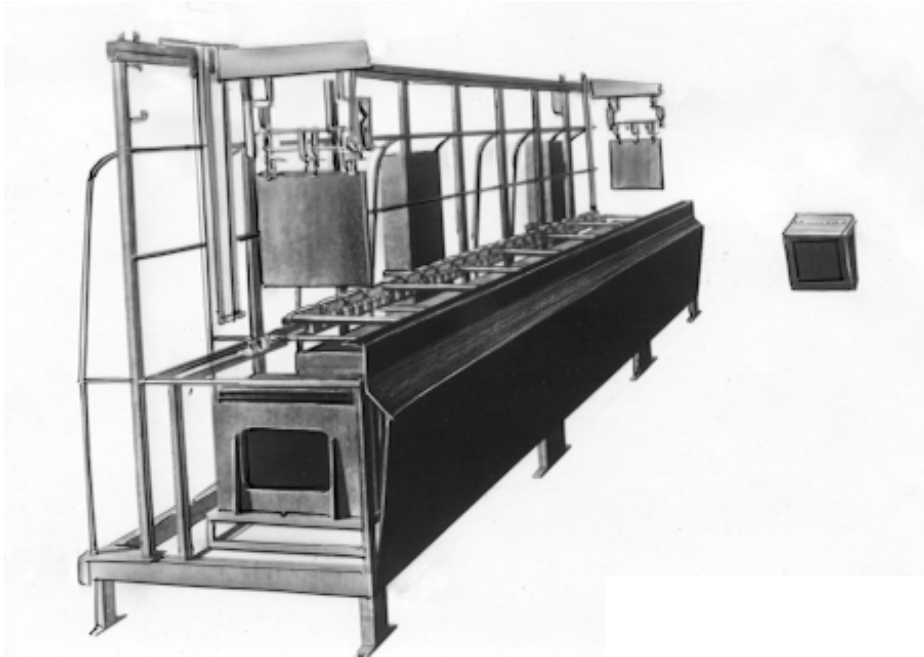


Рис.9.11. Линия гальванопокрытий с автооператорами.

Близки к процессу нанесения покрытий пескоструйная и дробеструйная обработка поверхностей. На этих операциях также нашли применение ПР с непрерывным управлением. Из других основных технологических операций, где используются ПР с непрерывным управлением, следует назвать шлифование, зачистку (например, отливки), обрубку облоя.

Промышленные роботы с дискретным позиционным управлением применяют также на клепке и для контроля размеров. Для последней операции созданы специальные измерительные машины, рабочим органом которых является измерительный щуп, которым производится ощупывание контролируемого изделия в нужных точках. Обычно такие измерительные машины имеют прямоугольную систе-

му координат и ЧПУ, обеспечивающее точность до единиц микрометров. На рис.9.12 показан пример такой измерительной машины.



Рис.9.12. Измерительная машина фирмы DEА (Италия).



## **ГЛАВА 10. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ.**

### **10.1. Классификация роботизированных технологических комплексов.**

Одна из актуальных задач робототехники – замена рабочих, занятых на вспомогательных операциях. Хотя, как было отмечено выше, стоимость автоматизации вспомогательных операций в три-четыре раза ниже, чем основных степень их автоматизации почти вдвое ниже. В результате сегодня около половины рабочих, занятых в промышленности, работают на таких наименее престижных и не требующих высокой квалификации ручных операциях. Роботизированные технологические комплексы (РТК), в которых ПР используются на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования, и сами такие ПР классифицируются по виду основного технологического процесса или реализующего его основного технологического оборудования. Основными по значению типами таких РТК являются РТК механообработки, штамповки, прессования пластмасс, горячей штамповки иковки, литья под давлением и внутрицехового транспорта.

### **10.2. Роботизированные технологические комплексы механообработки.**

Одна из главных областей применения ПР на вспомогательных операциях – это обслуживание металлорежущих станков. Здесь ПР выполняют наиболее типичную вспомогательную операцию загрузки-разгрузки оборудования, т.е. установки обрабатываемой детали и снятие ее по окончании обработки. Аналогичные операции осуществляют ПР и при обслуживании других типов технологического оборудования. Имеются еще и некоторые более специальные вспомогательные операции, выполняемые ПР, такие как смазка пресс-форм, окунание деталей в жидкость, межоперационная транспортировка, штабелирование, упаковка и т.д. Основным технологическим оборудованием в РТК механообработки служат станки токарные, сверлильные, фрезерные, зубообрабатывающие, шлифовальные и т.д. К технологическому оборудованию предъявляются следующие основные требования: автоматический режим работы, взаимная согласуемость систем управления, возможность доступа ПР в зону установки детали на станке.

Для обеспечения автоматического режима РТК в его состав должны входить устройства размельчения и удаления стружки, смазки и охлаждения рабочих органов и инструмента, очистки поверхностей базирования, средства контроля качества обработки изделий, магазины с поштучной выдачей ориентированных деталей, устройства ограждения. В соответствии с первым требованием основным типом станков для РТК являются станки с ЧПУ.

Вследствие значительного времени механообработки здесь, как отмечалось в параграфе 8.2, широкое применение получило обслуживание одним ПР нескольких станков. Варианты соответствующих компоновок РТК со стационарными и мобильными ПР приведены на рис.8.3-8.5.

Для обслуживания станков в простейших случаях применяют ПР с цикловым управлением, а наиболее общим вариантом является использование дискретных позиционных ПР. Эти ПР перепрограммируются в среднем раз в неделю, т.е. реже, чем обслуживаемые ими станки с ЧПУ. Средняя длительность цикла работы таких ПР – единицы минут.

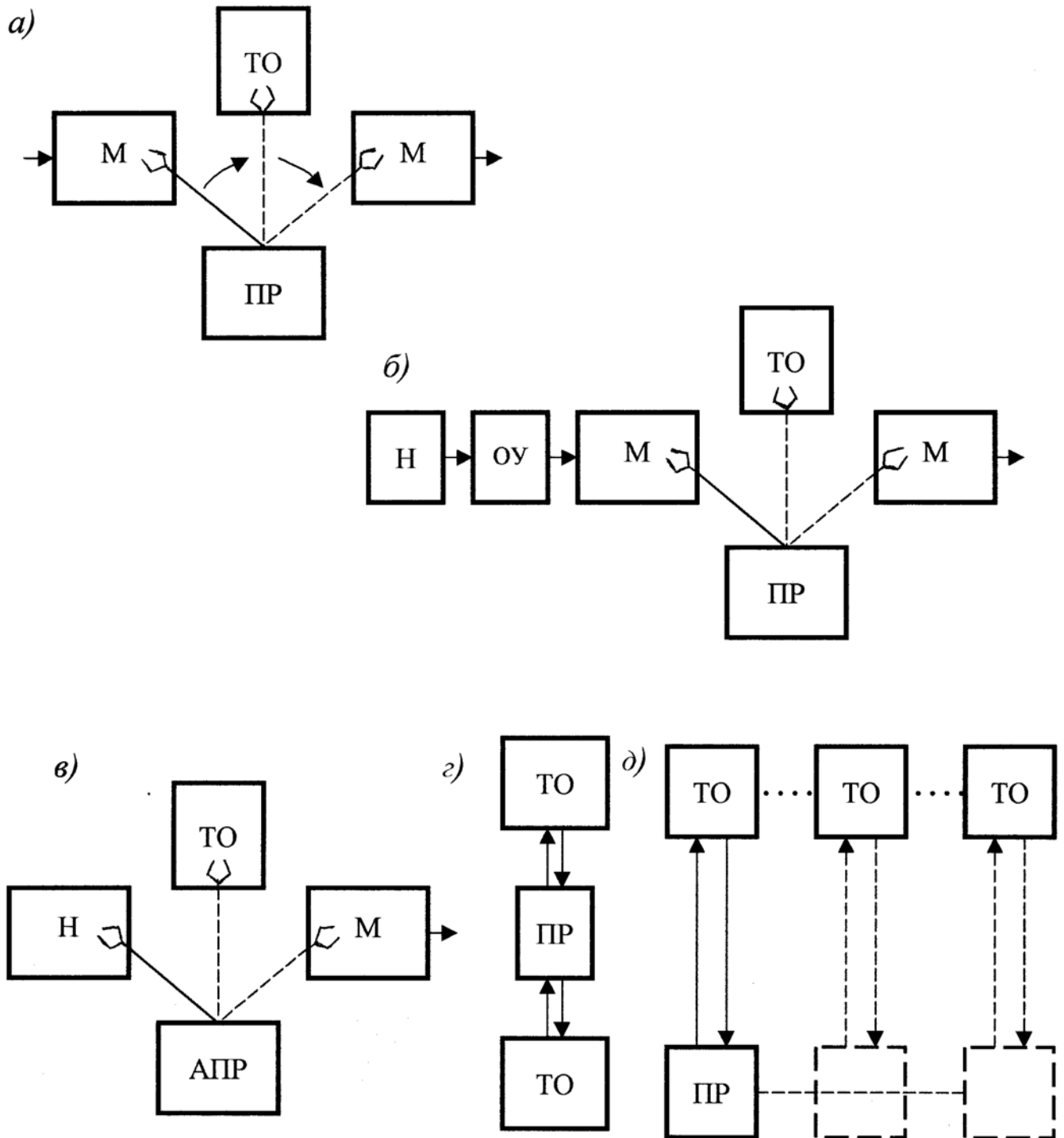


Рис. 10.1. Компоновки роботизированных технологических ячеек «станок – ПР»:

ТО – основное технологическое оборудование, М – магазин с поштучной выдачей ориентированных деталей, ОУ – ориентирующее устройство, Н – детали навалом, АПР – адаптивный ПР.

На рис.10.1,а показана простейшая роботизированная технологическая ячейка «станок – ПР». Деталь, которую надо обработать, ПР берет из левого магазина. Здесь они расположены в ориентированном положении в ячейках или подаются поштучно к ПР. По окончании обработки ПР снимает деталь и кладет ее в правый магазин. Из таких ячеек собирают участки, подобные показанному на рис.8.5. При последовательном соединении подобных ячеек в линию все последующие ячейки получают детали из магазина на выходе предыдущей ячейки. Однако для левого магазина самой первой ячейки существует задача предварительного ориентированного размещения в нем деталей, получаемых в общем случае в неориентированном виде, т.е. навалом. Принципиально возможны следующие варианты решения этой задачи:

- применение специального ориентирующего устройства (рис.10.1,б),
- использование для загрузки магазина адаптивного ПР,
- применение такого ПР для обслуживания станка первой ячейки (рис.10.1,в).

В настоящее время широкое распространение получили специальные ориентирующие устройства типа вибробункеров.

Основной недостаток применения адаптированных ПР – их значительная стоимость. Поэтому в тех случаях, когда могут быть использованы специальные ориентирующие устройства, они являются более предпочтительными. К сожалению, однако, область их применения, как и вообще всех специальных устройств, ограничена крупносерийным и серийным производством с достаточно редкой сменяемостью обрабатываемых деталей. Для ослабления этого ограничения создаются перестраиваемые ориентирующие устройства (со сменными частями и т.п.).

Вариант использования адаптивного ПР непосредственно для обслуживания станков применим в основном только при достаточно длительном цикле обработки деталей на станке, когда время работы ПР заведомо меньше цикла работы станка. Особенно эффективно применение таких ПР, когда значительная длительность цикла обработки позволяет осуществить обслуживание одним ПР нескольких станков (рис.10.1,г и д). В этом случае стоимость ПР соответственно распределяется на несколько технологических ячеек.

На рис. 10.2 показан цех механообработки, где автоматизированы все операции, включая транспортно-складские. Система управления включает микро-ЭВМ, устройство беспроводной связи и пульт с речевым командным устройством.

### **10.3. Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки.**

Одной из областей широкого применения ПР является холодная листовая штамповка. Объясняется это большим травматизмом, достигающим 30%, и монотонностью обслуживания прессов, а также простотой применения на этих операциях ПР. Промышленный робот используется здесь, как и в механообработке, прежде всего для выполнения операций загрузки-разгрузки: загрузка прессов исходным листовым материалом, т.е. подача его в штамп, и разгрузка штампа, т.е.

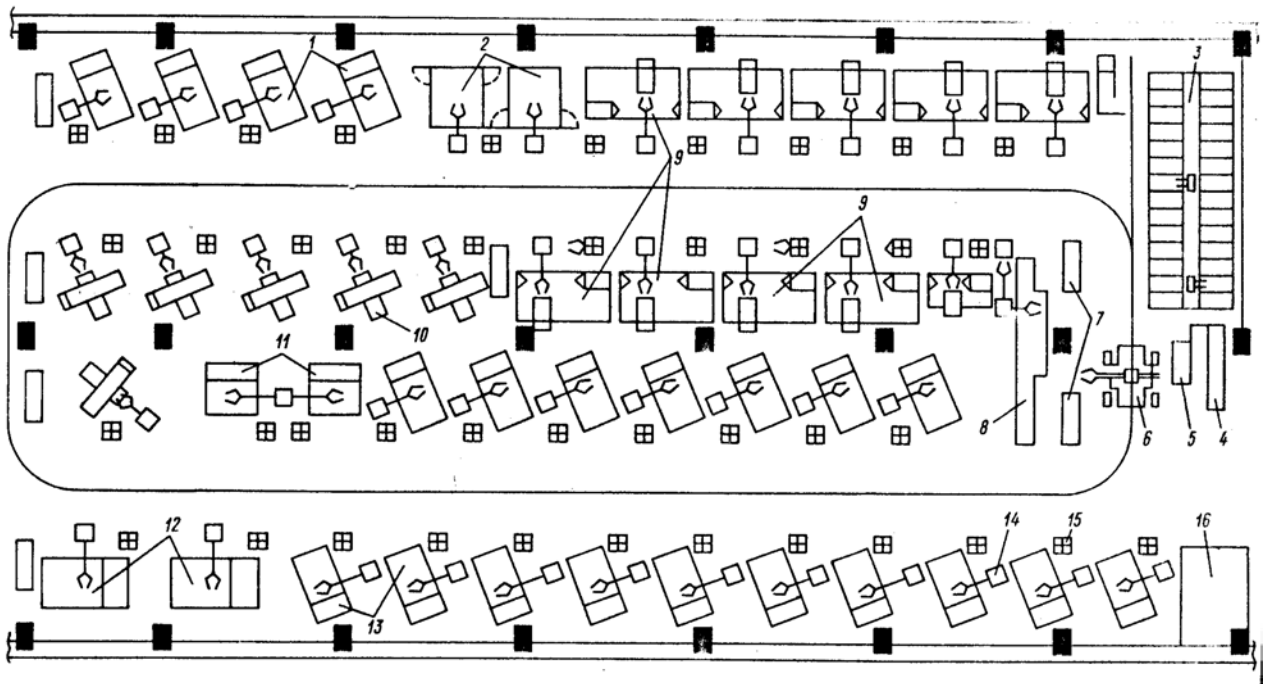


Рис.10.2. Роботизированный цех механообработки: 1, 2, 11, 12, 3 — токарные станки; 3 — склад; 4 — загрузочное устройство; 5 — разгрузочное устройство; 6 — напольные транспортные ПР; 7 — промежуточные склады; 8 — протяжной станок; 9 — шлифовальные станки; 10 — фрезерные станки; 14 — ПР; 15 — магазины; 16 — пульт диспетчера

съем штамповки и укладки ее в магазин. На рис. 8.1 и 8.2 были представлены основные компоновки РТК холодной штамповки.

Основной особенностью применения ПР на холодной штамповке по сравнению с механообработкой является необходимость обеспечить значительно большее быстродействие, поскольку цикл работы прессы измеряется всего несколькими секундами. Используемые здесь ПР имеют простое цикловое управление, как правило, цилиндрическую систему координат и не более трех степеней подвижности. Захватное устройство чаще всего выполняется в виде вакуумных присосок. Для обеспечения необходимой быстроты обслуживания прессы часто применяют ПР с двумя манипуляторами — один для загрузки, а другой для загрузки штампа. Иногда также разгрузку осуществляют с помощью устанавливаемого на станине прессы толкателя или штамповка сдувается сжатым воздухом. На рис.10.3 показан пример РТК холодной штамповки с адаптивным ПР на входе для взятия заготовок из навала.

Адаптивный позиционный робот ПР1 с техническим зрением берет неориентированные листовые заготовки из магазина М1, где они расположены навалом, и в произвольном положении кладет на стол С. Над столом расположены видеодатчик ВД (телевизионная камера) и устройство подсветки УП. Информация от видеодатчика поступает на устройство предварительной обработки видеoinформации УПО, где осуществляется выделение контура заготовки. Далее в мини-ЭВМ вычисляются координаты и ориентация заготовки и формируются кор-

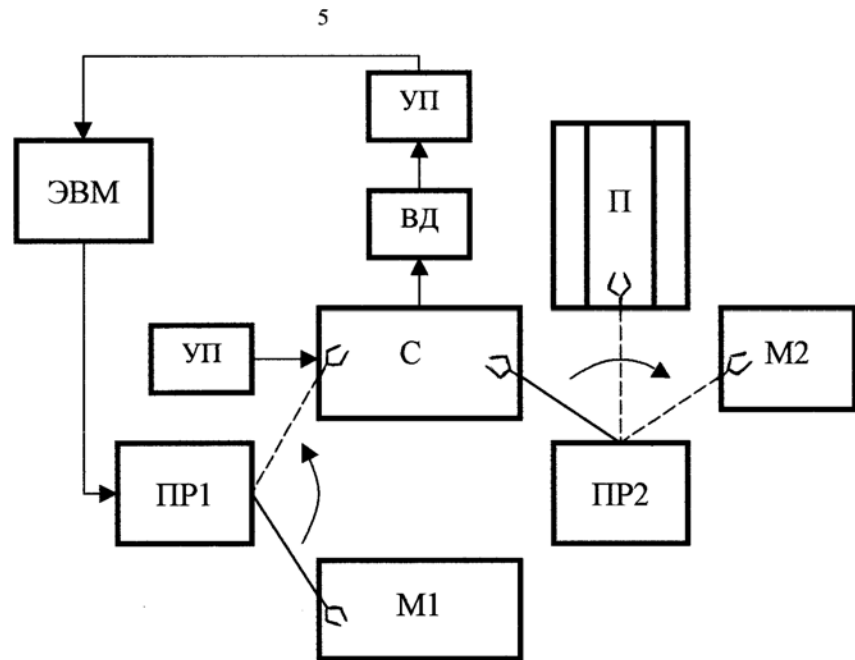


Рис.10.3. Роботизированный комплекс холодной штамповки с адаптивным ПР на входе

ректирующие сигналы в устройство управления ПР1, по которым последний смещает заготовку на столе в расчетную позицию для возможности последующего взятия ее цикловым промышленным роботом ПР2. Цикловой ПР устанавливает эту заготовку в пресс П, извлекает из него отштампованную деталь и кладет в магазин М2 готовых деталей.

На рис. 10.4 показан пример планировки цеха холодной листовой штамповки радиозавода.

АСУ цеха осуществляет оперативное и календарное планирование производства, включая определение потребностей в материалах, заготовках, планирование и управление для отдельных участков, складов и транспортных систем, решение других задач АСУ цеха, в том числе обмен информацией с АСУ завода.

Номенклатура изготавливаемых деталей включает такие типовые для радиотехнических изделий детали, как основания, платы, кронштейны, скобы и т.п. Исходный листовой материал на участке раскроя превращается в заготовки в виде полос. Лист раскраивается по картам, рассчитанным на ЭВМ. Заготовки сдаются на склад заготовок. Отсюда по команде АСУ цеха они поступают через транспортную систему на линию кассетирования, и далее заполненные кассеты попадают на склад заготовок. Участки штамповки снабжаются заготовками и оснасткой через соответствующую транспортную систему, которая обеспечивает также транспортировку готовых деталей на склад готовой продукции. Транспортные системы построены на базе напольных транспортно-загрузочных роботов. Общее управление цехом осуществляет оператор с помощью пульта, на который поступает информация о выработке кассет с заготовками, заполнении магазинов готовой

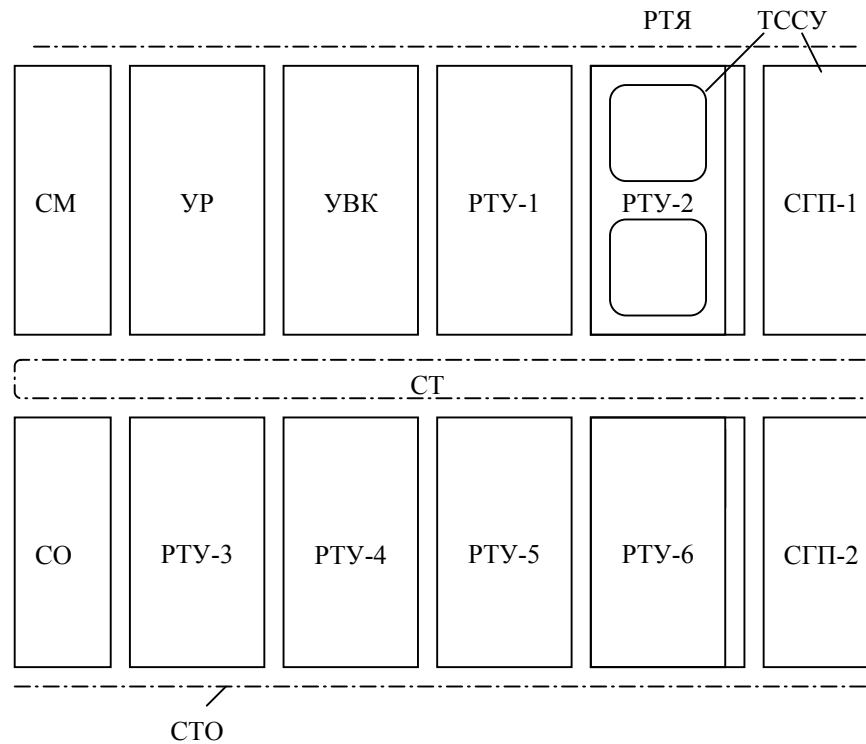


Рис. 10.4. Планировка роботизированного цеха холодной листовой штамповки: УР —участок раскроя; УВК — участок вырубки и кассетирования; РТУ-1 — РТУ-6 — роботизированные технологические участки; СТ — система транспортировки технологической оснастки, заготовок и готовой продукции; СТО — система транспортировки и сортировки отходов; ТССУ — транспортно-складская система участка; СГП-1 – СГП-2 — склады готовой продукции; СМ — склад материалов; СО — склад оснастки

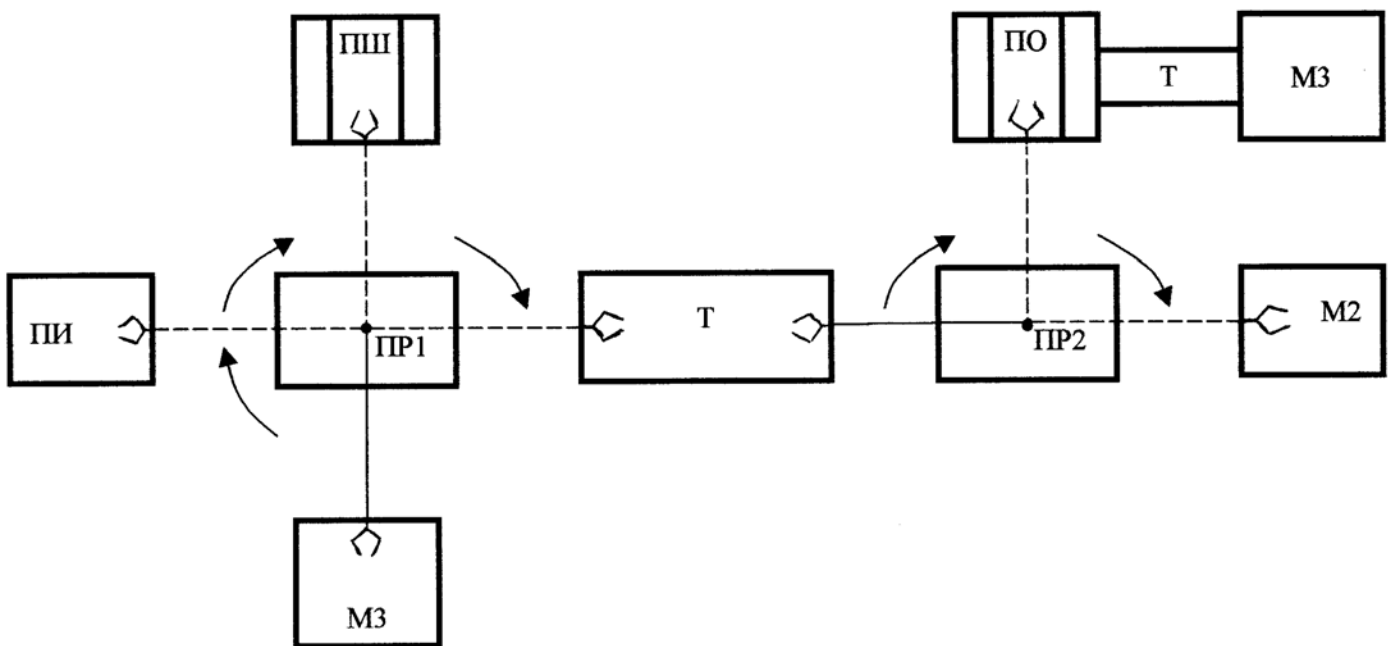
продукцией, положении транспортно-загрузочных роботов, возможных неисправностях в работе оборудования.

#### 10.4. Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве.

Основным стимулом для автоматизации кузнечно-штамповочного производства наряду с повышением производительности являются тяжелые условия работы в кузнечных цехах. Однако в отличие, например, от холодной штамповки задача комплексной автоматизации такого производства представляет значительные трудности. Это связано со сложностью работы кузнеца. Поэтому наряду с ПР здесь широко применяют манипуляторы с ручным и автоматизированным управлением — ковочные телеоператоры, управляемые квалифицированным кузнецом.

Помимо собственно штамповки автоматизации подлежат операции загрузки заготовок в нагревательную печь, извлечения нагретой заготовки из печи, перемещение ее к ковочному прессу, манипулирования заготовкой при ковке, укладки готовой поковки в магазин. Кроме того, имеется еще ряд таких вспомогательных операций как смазка и обдувка штампа (сдув окалины), обрезка облоя с детали и укладка его в тару.

На рис.10.5 показана схема РТК горячей объемной штамповки, включающий



два ПР: ПР1 – робот-кузнец и ПР2 – робот-обрубщик. Робот-кузнец обслуживает ин-

дукционную печь для нагрева заготовок и пресс горячей штамповки, а робот-обрубщик – обрезной пресс для обрубки облоя с поковки. Поковки к обрезному прессу и облой в магазин транспортируются с помощью транспортера.

Сегодня более 80% выпускаемой номенклатуры поковок массой 25-500 кг изготавливают методом свободной поковки. РТК свободной поковки включает обычно гидравлический пресс и манипулятор, с помощью которого оператор-кузнец осуществляет манипулирование заготовками при ковке.

Система управления комплексом, выполненная на микро-ЭВМ, предусматривает следующие режимы:

- полуавтоматическое управление прессом с помощью пульта управления;
- полуавтоматическое управление манипулятором в копирующем режиме с помощью задающей рукоятки, расположенной на пульте управления;
- автоматическое управление по заранее введенной в память устройства управления программе (с возможностью оперативного вмешательства оператора путем прерывания выполнения программы с переходом на другую программу или другой режим управления);
- программирование манипулятора методом обучения с помощью управляющей рукоятки.

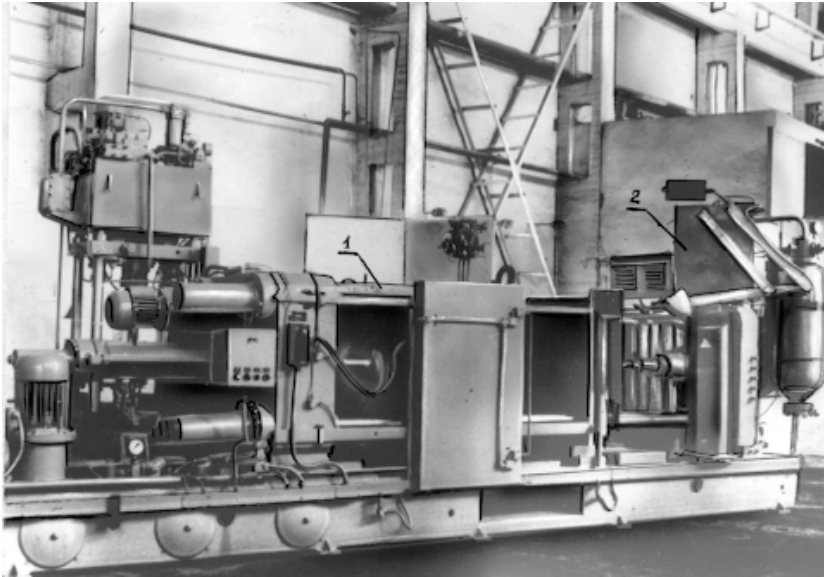
### **10.5. Роботизированные технологические комплексы литья под давлением.**

Процесс производства деталей методом литья под давлением заключается в заливке через горловину в машину литья под давлением определенной порции жидкого металла, взятого из печи, затем в удалении готовой отливки и подаче ее для обрубки литникового остатка. Кроме того, необходимо осуществлять смазку и обдув прессформ. Эффективность применения ПР для обслуживания машин литья под давлением связана с тем, что при обслуживании их рабочим значительны потери металла из-за неточности его дозирования и разбрызгивания при разливе, а также простои оборудования и снижение производительности из-за большой утомляемости рабочего. При этом условия труда являются не только тяжелыми, но и вредным для здоровья.

Роботизированный комплекс литья под давлением состоит из раздаточной печи, машины литья под давлением, пресса для обрубки литников, робота-заливщика и робота для взятия отливки и охлаждения ее в баке с водой. На рис.10.6 показан участок литья под давлением, обслуживаемый двумя ПР. Робот-заливщик погружает свой рабочий орган – ковш в расплавленный металл в раздаточной печи. Глубина погружения ковша определяет массу забираемого им металла и контролируется специальными контактными датчиками. После определенной выдержки времени, необходимой для разогрева и заполнения ковша, ковш поднимается, перемещается к приемнику металла машины литья под давлением и наклоняется для слива металла. После его полного слива осуществляется основная операция прессования. После раскрытия пресс-формы отливка выталкивается толкателем и переносится вторым роботом в бак с водой, где происходит ее охлаждение. Затем тем же роботом она подается на пресс для обрубки литников и сбрасывается в магазин.



а)



б)

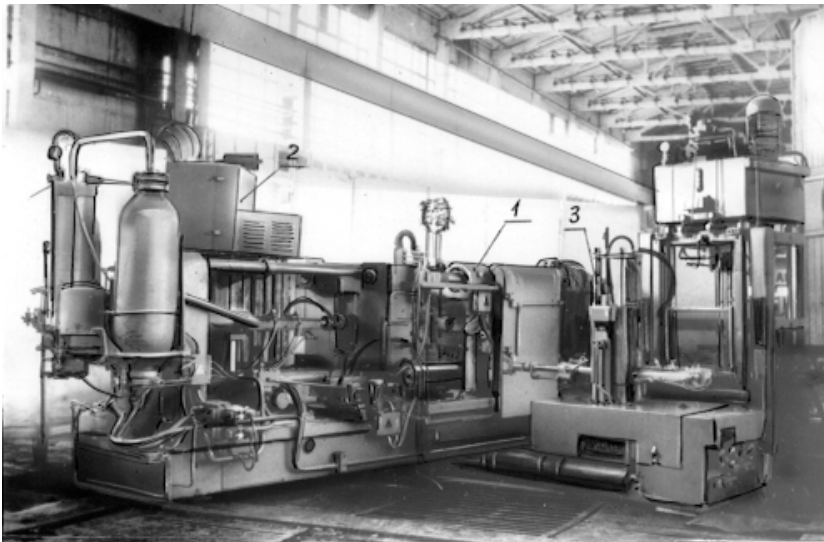


Рис.10.6. Роботизированный комплекс литья под давлением:

*а* – вид со стороны робота заливщика;

*б* – вид со стороны робота, снимающего отливку;

1 – машина для литья под давлением, 2 – робот-заливщик, 3 – робот для снятия отливок, 4 – пресс для обрубки литников.

## **ГЛАВА 11. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИКИ В НЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ И В НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ОТРАСЛЯХ.**

### **11.1. Робототехника в немашиностроительных отраслях промышленности.**

Помимо машиностроения и приборостроения средства робототехники все более широкое применение получают в угольной и горнодобывающей промышленности, черной и цветной металлургии, строительстве, легкой и пищевой промышленности, транспорте. Важность развития робототехники в этих направлениях очевидна уже из того факта, что здесь используется большая часть трудовых ресурсов страны, а степень автоматизации ниже, чем в машиностроении. Сегодня развитие применения средств робототехники в немашиностроительных отраслях происходит прежде всего путем использования опыта машиностроительных отраслей по применению созданных там роботов на тех же или аналогичных операциях — при обслуживании основного технологического оборудования, на погрузо-разгрузочных работах, при выполнении таких основных операций как нанесение покрытий, сварка, сборочно-монтажные работы и т.п. Опыт создания и применения роботов и неавтоматических манипуляторов, специально предназначенных для этих отраслей, пока невелик. Общее количество используемых в немашиностроительных отраслях роботов и манипуляторов не превышает 20 % их общего парка. Анализ основных немашиностроительных отраслей показывает, что только за счет использования роботов общепромышленного применения эта величина может быть увеличена примерно вдвое.

Однако для основной части производств в этих отраслях требуются роботы специальных типов. В табл. 11.1 приведены примеры применений средств робототехники в немашиностроительных отраслях. Анализ технических требований к роботам, необходимым для этих отраслей, и условий их эксплуатации показывает, что в отличие от машиностроения здесь значительно меньше возможностей для применения роботов с чисто программным управлением и требуются прежде всего роботы осязательные с адаптивным управлением. Это объясняется тем, что в немашиностроительных отраслях существуют значительно большая неопределенность и варьированность как параметров объектов манипулирования, так и внешней среды в целом. Здесь требуется большая доля мобильных роботов (в том числе для передвижения по открытой местности), роботов повышенной грузоподъемности и для работы в экстремальных условиях.

В горном деле важной задачей является создание робототехнических комплексов для безлюдной выемки полезных ископаемых. Это позволит высвободить сотни тысяч горняков от работы в тяжелых и опасных подземных условиях, повысить в 4—10 раз производительность труда, существенно снизить себестоимость добычи и свести к минимуму потери руды.

Примеры применения средств робототехники в немашиностроительных и непромышленных отраслях хозяйства.

Операция	Тип средств робототехники
<i>Угольная и горнодобывающая промышленность</i>	
Установка крепи в забое	Мобильный робот с техническим зрением и двумя манипуляторами
Бурение шурпов	Многоманипуляторный мобильный робот с навигационной системой
Отделение угля от породы	Робот с техническим зрением и другими средствами осязания.
Погрузка горной массы Погрузо-разгрузочные работы в обогатительном производстве	Мобильный робот-погрузчик
<i>Металлургия</i>	
Загрузка чушек и металлолома в печь	Манипулятор с управлением от оператора
Ремонт огнеупорной кладки печей, домен	Мобильный робот
Пробивка корки шлака и устранение анодного эффекта при электролизе алюминия	
Извлечение штырей в электролазерах и их перестановка	
Укладка и обвязка пакетов чушек, их погрузка и доставка	

## Продолжение таблицы 11.1.

Операция	Тип средств робототехники
<i>Лесозаготовительное производство</i>	
Валочно-пакетирующие работы на лесосеках	Манипулятор с управлением от оператора
<i>Деревообрабатывающее производство</i>	
Погрузочные работы	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроительном производстве
<i>Строительная промышленность</i>	
Укладка кирпичей	Робот-каменщик
Сортировка кирпича на конвейере	Робот с техническим зрением и дальномерной сенсорной системой
Загрузка печей кирпичами и выгрузка	
Облицовочные работы	Робот для монтажа облицовочных плиток
Монтаж металлоконструкций (зданий, мостов, резервуаров и т.п.)	Робот-монтажник-высотник
Окрасочные работы	Робот-маляр
<i>Легкая и пищевая промышленность</i>	
Обслуживание основного технологического оборудования (пряделных и швейных машин, агрегатов, формирующих синтетические нити, прессов горячей вулканизации, печей для обжига керамических изделий и т.п.)	Средства робототехники, аналогичные применяемым в машиностроении и приборостроении

## Продолжение таблицы 11.1.

Операция	Тип средств робототехники
<p>Внутрицеховые погрузо-разгрузочные и транспортные работы</p> <p>Раскрой кожи и других материалов</p> <p>Укладка в тару конфет, овощей при консервировании и т.п.</p> <p>Погрузо-разгрузочные работы в холодильниках</p>	
<i>Транспорт</i>	
<p>Погрузо-разгрузочные работы</p> <p>Регламентное обслуживание железнодорожных путей</p> <p>Шагающие транспортные машины</p>	Средства робототехники аналогичные применяемым в машиностроении
<i>Агропромышленное производство</i>	
<p>Уборка овощей и фруктов</p> <p>Прополка и прореживание овощей</p> <p>Обслуживание теплиц</p> <p>Товарная доработка плодоовощной продукции (сортировка и загрузка в контейнеры)</p>	<p>Робот с техническим зрением для работы в комплексе с прореживателями</p> <p>Мобильный робот (для выращивания рассады, уборки продукции)</p>
<p>Обслуживание свиноводческих комплексов и комплексов для крупного рогатого скота</p> <p>Дойка и санитарная обработка вымени коров</p> <p>Стрижка овец</p>	

## Продолжение таблицы 11.1.

Операция	Тип средств робототехники
Погрузо-разгрузочные работы с сельскохозяйственной продукцией, сеном, силосом, удобрениями и т.п. Вождение тракторов и других сельскохозяйственных машин	Робот-тракторист
<i>Медицина</i>	
Хирургия (микрохирургия, дистанционная хирургия, стерильная хирургия)	Прецизионные манипуляторы, управляемые оператором
Внутриполостная и внутрисосудистая диагностика Протезирование конечностей	Мобильные микророботы
Реабилитации инвалидов и больных Уход за больными и инвалидами	Робот для массажа и физических упражнений. Робот-сиделка
Помощь, при передвижении слепых людей	Робот-поводырь.
<i>Сфера обслуживания</i>	
Погрузо-разгрузочные работы Охрана помещений Уборка помещений	Робот-домохозяйка
Мойка окон высотных зданий Уход за детьми	Робот-нянька и роботы-игрушки

В состав таких комплексов должны входить роботы для установки крепи-опалубки в забое, роботы-бурильщики шурпов, роботы-взрывники, роботы-погрузчики горной породы, роботы по обслуживанию технологических комплексов проведения выработок. Подобные роботы должны быть мобильными, снабжаться, как правило, развитой системой осязания, включая техническое зрение, несколькими манипуляторами и иметь взрывобезопасное исполнение.

На рис.11.1 показан самоходный робототехнический проходческий комбайн, а на рис.11.2 показан робот-бурильщик шурпов.

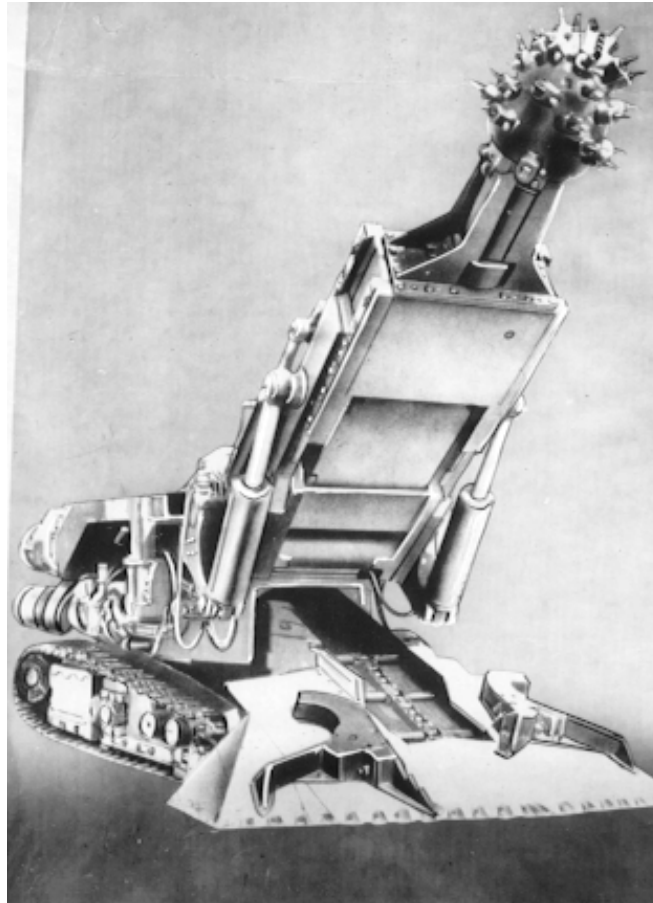


Рис.11.1. Самоходный робототехнический проходческий комбайн.

На рис.11.3 представлен робототехнический комплекс для чистки и выбивки футеровки разливочных ковшей в металлургии. Ковш располагается на позиционере, с помощью которого осуществляются перемещение ковша в горизонтальной плоскости и опрокидывание его для сброса выбитой футеровки.

На рис.11.4 показан пример применения роботов на железнодорожном транспорте для мытья, дезинфекции и окраски вагонов. Гидравлический робот с контурным управлением, снабженный сменными рабочими органами, размещен на подвижном основании. Основание перемещается оператором внутри вагона с помощью пантографической стрелы по мере обработки очередной части вагона в пределах рабочей зоны робота.

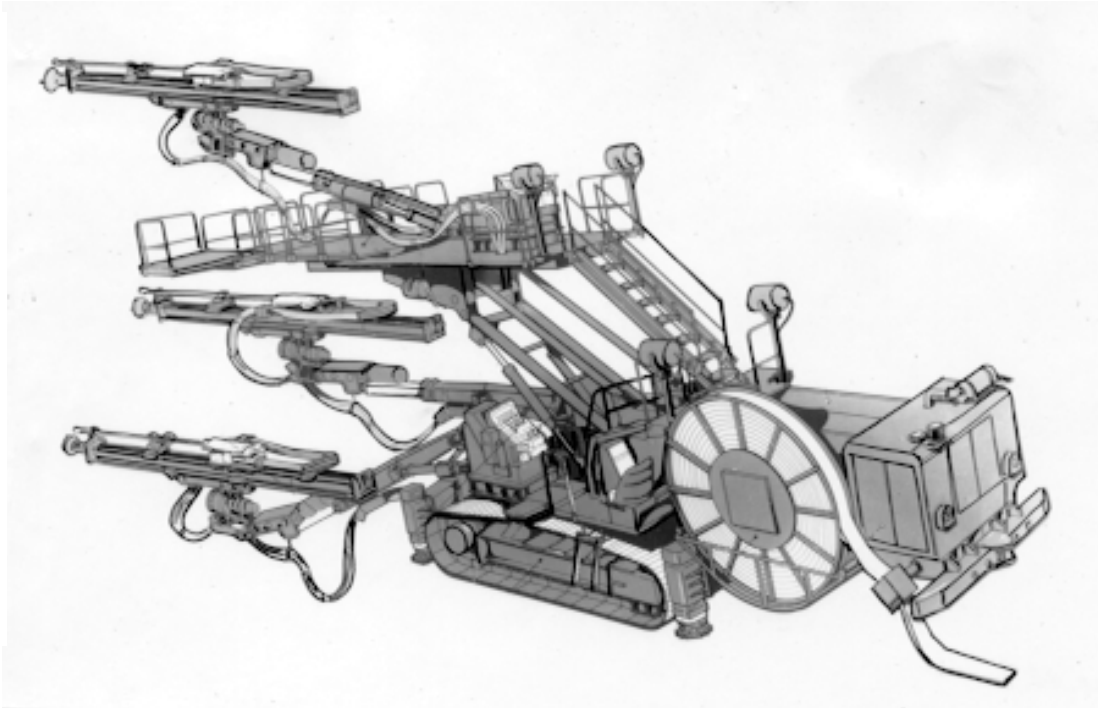


Рис.11.2. Робот для бурения шурпов (робот бурильщик).

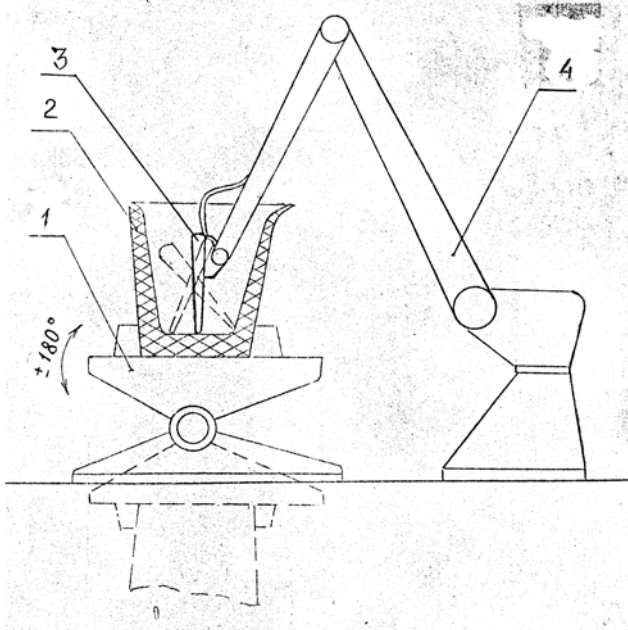


Рис.11.3. Робототехнический комплекс для чистки и выбивки футеровки разливочных ковшей:

1 – позиционер; 2 – разливочный ковш; 3 – отбойник; 4 – промышленный робот.



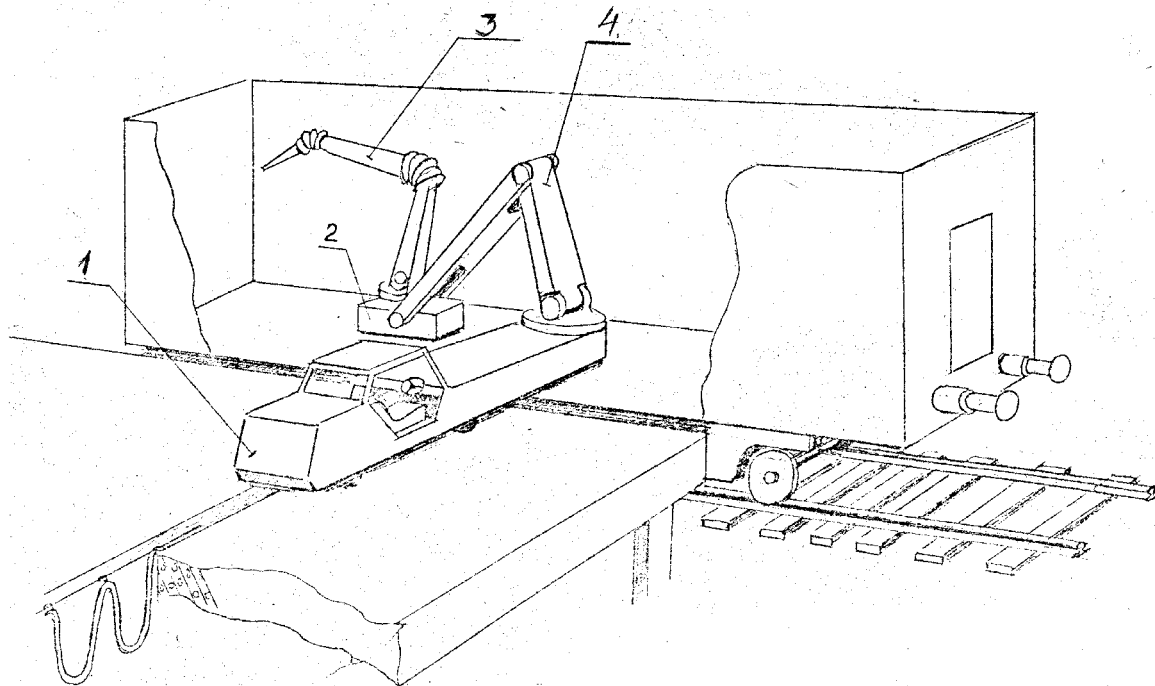


Рис.11.4. Робототехнический комплекс для химической обработки железнодорожных вагонов:

1 – тележка с оператором; 2 – подвижное основание; 3 – промышленный робот; 4 – пантографическая стрела.

Быстро расширяется применение средств робототехники в легкой и пищевой промышленности. На швейных фабриках роботы осуществляют раскрой тканей и обработку деталей одежды. Роботы используют для укладки в ящики и упаковки сахара-рафинада, хлебобулочных изделий, изделий парфюмерии, для раскладки конфет в коробки и т.д.

## 11.2. Робототехника в непромышленных отраслях.

В нижней части таблицы 11.1 приведены примеры применения робототехники в некоторых непромышленных отраслях. Широкие возможности для комплексной автоматизации и роботизации открывает робототехника в сельском хозяйстве. Основные особенности применения здесь средств робототехники заключаются в большой территориальной протяженности и разобщенности предприятий, сезонности работ, сильной зависимости от погодно-климатических условий, в непосредственном контакте с животными и растительными организмами, имеющими большую разбросанность характеристик и существенные специфические требования к взаимодействию с ними.

Одна из важных задач в полеводстве – создание роботов для вождения

тракторов, комбайнов и других машинно-тракторных агрегатов с высвобождением работников самой массовой здесь профессии – трактористов. Роботы-трактористы должны быть приспособлены для замены тракториста на его стандартном рабочем месте. Это позволит оперативно использовать такие роботы на серийных машинно-тракторных агрегатах, заменять трактористов при выполнении работ особо опасных (внесения ядохимикатов и т.п.) или утомительных (вождение культиваторов и прореживателей строго по рядкам растений и т.п.), осуществлять групповое вождение тракторов и других машин с роботами-трактористами за трактором-лидером, ведомым трактористом. Замена трактористов роботами позволит повысить производительность агрегатов, сменность, ритмичность и качество работы, снизить расход топлива.

Одна из наиболее трудоемких отраслей сельскохозяйственного производства – овощеводство и картофелеводство. Производительность труда на ряде операций здесь ограничена физическими возможностями человека. Например, для укладки рассады в высаживающий аппарат требуются несколько сажальщиц на каждой рассадочной машине, которые должны работать в ритме примерно одна операция в секунду в условиях тряски, пыли, при различной погоде.



Рис.11.5. Робототехнический комплекс для сборки огурцов и помидоров в теплице.

В теплицах применение мобильных роботов позволяет комплексно автоматизировать большой круг работ по подготовке почвы, высеву семян, опрыскиванию химикатами, сбору готовой продукции (рассады, овощей, фруктов), их сортировка и укладка в тару. На рис.11.5 показан образец робота для сбора огурцов и помидоров. Робот передвигается вдоль теплицы по технологическим трубопроводам и имеет манипулятор со специальным плодоотделителем в качестве рабочего органа. Система обнаружения и распознавания состоит из двух сканирующих зеркал и фотоприемника. Распознавание осуществляется путем сравнения с эталоном.

Аналогичные задачи необходимо решать на стационарных пунктах послеуборочной обработки овощей и картофеля, включая их сортировку, отделение примесей и некондиционных экземпляров. На рис. 11.6 представлен образец робототехнического комплекса для погрузки капусты и других

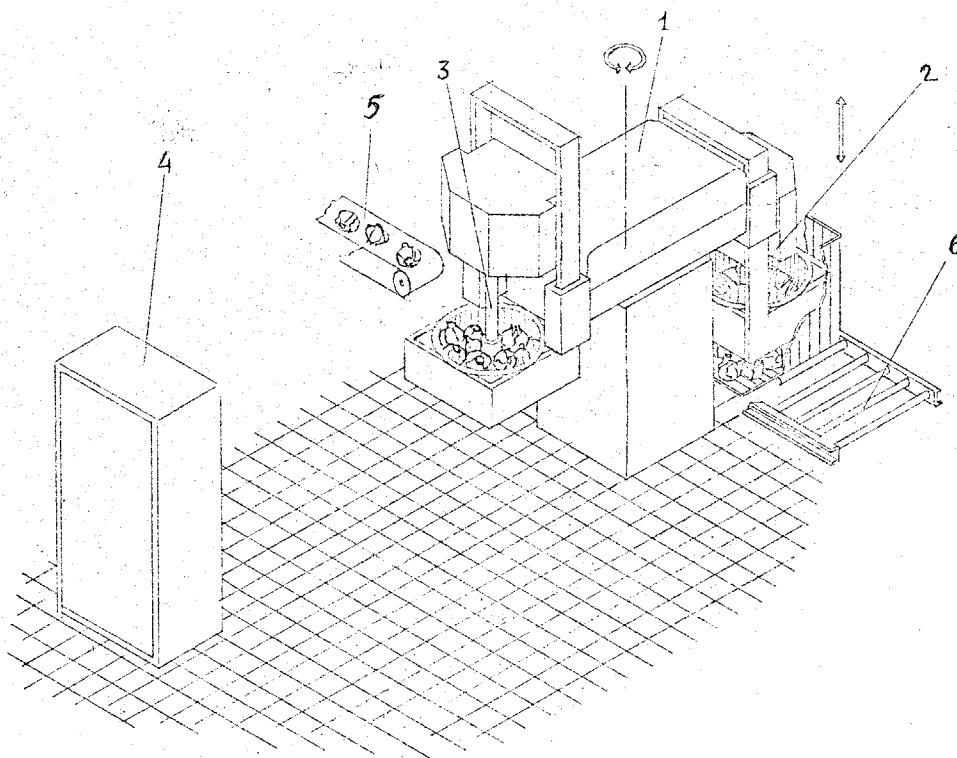


Рис.11.6. Робототехнический комплекс для погрузки капусты:

1 – робот-загрузчик, 2,3 – его манипуляторы. 4 – устройство управления, 5 – транспортер для готовой продукции, 6 – подаватель.

овощей в контейнеры. Комплекс выполняет следующие операции:

- подача пустых контейнеров в зону загрузки;
- загрузка капусты в контейнер;
- перемещение загруженных контейнеров в зону накопления готовой продукции.

Благодаря аккуратному обращению с капустными кочнами полностью исключено их повреждение, которое при других используемых на сегодня способах загрузки достигает 45%.

В животноводстве и птицеводстве требуются, в частности, роботы для выполнения следующих работ:

- основные технологические операции, как дозированная раздача кормов, пойка телят, разбрасывание подстилки, уборка навоза, дезинфекция помещений, взвешивание животных;
- механизированное доение коров;
- дефектоскопия и сортировка яиц в неорганизованных потоках с последующей укладкой в тару.

Большие перспективы имеет робототехника в медицине, в том числе, в хирургии, протезировании, для реабилитации и обслуживания: больных и

инвалидов. На основе достижений робототехники создаются все более совершенные искусственные конечности — протезы рук и ног, имеющие приводы, встроенные микропроцессорные устройства управления и биологические обратные связи. Созданы искусственные скелеты с приводами, так называемые экзоскелетоны (экзо означает «внешний»), для парализованных людей (рис.1.12).

В ряде стран (США, Японии) созданы роботы для обслуживания больных и инвалидов. Такие роботы имеют техническое зрение, систему радиоуправления и управления голосом, устройство передвижения. Ведутся разработки роботов для использования в домашнем хозяйстве – для уборки помещений, работы на кухне, прислуживания за столом, охраны квартиры, в том числе противопожарной, для открывания и закрывания входной двери, обслуживания телефона, радио- и телевизионной аппаратуры и т.п. В США создан робот – ночной сторож («Центурион-1»). Он имеет колесный ход, инфракрасную систему обнаружения людей, устройство для лишения нарушителя подвижности с помощью ультразвука, веселящего или парализующего газа, электрических разрядов.

В целом робототехника в машиностроительных и непромышленных отраслях, как уже отмечено, развивается сегодня, прежде всего на базе опыта, накопленного в машиностроении, и в той же последовательности: изучение потребностей и определение технических требований к роботам, создание и отработка типовых роботизированных технологических ячеек, создание на их основе крупных базовых комплексов и, наконец, тиражирование последних в рамках отраслей.

## ГЛАВА 12. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА.

### 12.1. Экстремальная робототехника в промышленности.

Одно из назначений робототехники – выполнение различного рода работ в экстремальных внешних условиях либо опасных и вредных для человека, либо вообще полностью исключающих его присутствие. Соответствующий раздел робототехники получил краткое наименование «экстремальная робототехника».

Под экстремальными условиями понимаются как аварийные экстремальные ситуации, включая стихийные бедствия, так и штатные экстремальные ситуации, определяемые технологией производства. По мере интенсификации производства удельный вес и тех и других неуклонно растет. Это относится, в частности, к атомной энергетике и промышленности, химической, металлургической, горнодобывающей отраслям промышленности, подводным работам, освоению космоса, военному делу.

Экстремальные условия определяются, прежде всего внешними условиями работы. Например, для атомной промышленности типичные внешние условия включают:

- радиационное облучение с интенсивностью до 10 рентген в секунду и интегральной дозой до  $10^6$  рентген;
- температура окружающей среды в отдельных случаях до  $300^{\circ}\text{C}$ ;
- влажность 100 %;
- взрыво- и пожароопасность;
- радиоактивные загрязнения, требующие дезактивации.

Космическая и подводная робототехника характеризуется своими специфическими внешними условиями.

Помимо внешних условий экстремальные ситуации характеризуются и определенным перечнем специфических работ, подлежащих выполнению. К типовым видам работ в экстремальных ситуациях относятся:

- инспекция (разведка, контроль, диагностика);
- манипуляционные работы, как правило со сменным рабочим инструментом (для резки, сварки, очистки поверхностей, нанесения покрытий, для слесарных, сборочно-разборочных и монтажно-демонтажных работ);
- погрузо-разгрузочные и транспортные работы;
- расчистка и очистка помещений и территорий (включая дезактивацию, нейтрализацию и т.п.);
- устройство транспортных путей (проездов, переправ и т.п.);
- строительно-восстановительные работы;
- пожаротушение;
- спасательные работы.

Эти работы в целом включают сотни укрупненных технологических операций. Их примерный перечень применительно к чрезвычайным наземным ситуациям приведен в таблице 12.1. Как следует из этого перечня, основным типом технических систем, требующихся для выполнения этих операций, являются робо-

Примерный перечень работ и входящих в них технологических операций в экстремальных условиях.

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции
1.	Инспекция	1.1. Визуальный контроль, определение физического состояния местности, объектов, оборудования (с земли, с воздуха, в воде)
		1.2. Радиационный контроль на местности, в помещениях
		1.3. Определение состава атмосферы, воды и земляного покрытия
		1.4. Визуальный контроль труднодоступных помещений
		1.5. Снятие визуально показаний контрольно-измерительной аппаратуры
		1.6. Определение положения показывающих и исполнительных органов, вентилях, тумблеров
		1.7. Выявление мест утечек в трубопроводах и оборудовании
2.	Погрузо-разгрузочные и транспортные работы	2.1. Доставка технических и других средств к местам чрезвычайных ситуаций
		2.2. Расчистка проходов, устройство транспортных путей (проездов, переправ и т.п.)
		2.3. Разборка завалов, укрепление или обрушение неустойчивых конструкций
		2.4. Транспортировка материалов, инструмента, емкостей и др. объектов

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции	
2.5.		Сбор, контейнирование и транспортирование опасных отходов	
2.6.		Удаление опасных предметов (взрывных устройств, боеприпасов и т.п.)	
2.7.		Создание дамб и заградительных полос	
3.	Манипуляционные работы	3.1.	
			Монтаж и демонтаж оборудования и конструкций
3.2.		Сборка и разборка соединений	
3.3.		Нанесение покрытий, удаление покрытий	
3.4.		Бандажирование течей на трубопроводах, замена прокладок в уплотнительных соединениях	
3.5.		Работа с радиоактивными и др. опасными материалами (кантование, укладка, пересыпание, уплотнение и др.)	
3.6.		Сбор и удаление рассыпных материалов	
3.7.		Установка и снятие дополнительных домкратов, опор и растяжек	
3.8.		Сварка и резка труб, металлоконструкций	
3.9.		Сверление и фрезерование	
3.10.		Бурение	
3.11.		Резка металлических, бетонных, железобетонных, деревянных конструкций	
3.12.		Дробление обломков строительных конструкций	

№ п/п	Наименование работ	Наименование операции
4.	Очистка	3.13. Открывание дверей, люков, задвижек 4.1. Дезактивация местности, строений, помещений, конструкций и оборудования 4.2. Очистка площадок 4.3. Откачка воды из затопленных помещений
5.	Строительно-восстановительные работы	5.1. Организация энергоснабжения 5.2. Обеспечение средствами связи 5.3. Восстановление транспортных путей (шоссейных дорог, железнодорожных путей и аэродромов)
6.	Пожаротушение	6.1. Разведка очагов пожара 6.2. Локализация и тушение пожаров
7.	Спасение людей	7.1. Поиск людей в местах их блокировки 7.2. Эвакуация людей из мест чрезвычайных ситуаций



тотехнические системы (РТС), благодаря характерной для них многофункциональности и гибкости, позволяющих оперативно выполнять различные технологические операции. Кроме них для выполнения отдельных типовых технологических операций требуется довольно широкая номенклатура и специальных технологических систем, с которыми РТС должны взаимодействовать.

Примеры таких специальных технических систем – это строительные, строительно-дорожные, транспортные, погрузо-разгрузочные машины – экскаваторы, бульдозеры, краны и т.д., но в специальном исполнении для работы в экстремальных внешних условиях.

Наиболее важными характеристиками РТС для рассматриваемой области их применения являются способы управления, перемещения и энергопитания. Сегодня основным способом управления этими техническими системами является комбинация дистанционного автоматизированного управления со стороны человека-оператора и местного автоматического управления. Перемещение к месту работы может обеспечиваться специальными транспортными средствами (краны, вертолеты и т.п.) или собственной системой передвижения в случае мобильных РТС. Энергопитание может быть автономным, кабельным или комбинированным.

Основным типом легких РТС являются инспекционные системы (разведчики), часто дополняемые манипуляторами и другими исполнительными устройствами. Последние предназначаются для расчистки проходов, взятия проб, поиска и взятия отдельных объектов, выполнения различных операций с органами управления основного технологического и другого оборудования и отдельных технологических операций с помощью сменного инструмента. В отличие от инспекционных систем основное назначение тяжелых РТС – выполнение различных технологических операций с помощью сменных рабочих органов, включая бульдозерные отвалы, грейферы, сварочные аппараты и т.п. Эти системы с учетом ограничений, налагаемых их массо-габаритными характеристиками, проходимостью и устойчивостью к внешним воздействиям, применяются в труднодоступных и стесненных помещениях внутри зданий и на открытой территории.

Основная тенденция развития рассматриваемой техники – это создание автономных и телеуправляемых мобильных РТС с требующейся для этого развития сенсорикой, адаптивным и интеллектуальным управлением. Создание таких систем – одно из важнейших направлений развития современной робототехники в целом. Работы в этой области ведутся крупнейшими машиностроительными фирмами, включая Дженерал Электрик, Вестингауз, Мартин Мариетта, Катерпиллер, Дженерал Дайнамикс, Сименс, Мицубиси. Основной формой организации этих работ являются государственные (США, Япония, Франция, Англия) и международные программы и проекты.

Решение проблемы создания РТС для экстремальных условий связано со следующими особенностями:

- сложность (экстремальность) внешних условий, зачастую находящихся на пределе возможностей современной техники;
- сложность, многообразие, нечеткость (изменчивость) подлежащих выполнению функций, что приводит к большой номенклатуре требующихся технических средств, при одновременно, как правило, единичном характере

потребления этой техники;

- межотраслевой характер проблемы, как с точки зрения потребителей, так и производителей требуемых технических средств.

С учетом этих особенностей в основу проектирования средств экстремальной робототехники должны быть положены следующие два принципа. Первый принцип – функциональная и конструктивная унификация технических средств на основе их модульного построения. Второй принцип – это согласованность требований к рассматриваемым техническим средствам и к их техническому окружению, с которым эти средства должны взаимодействовать, из условий максимума общей технико-экономической эффективности.

Первый принцип был рассмотрен в главе 7. Что касается второго принципа, то для объектов внешней среды он означает необходимость учета их взаимодействия с рассматриваемыми робототехническими средствами. Такой учет может повысить эффективность этих средств в 5-7 раз. Основные дополнительные требования, которые должны предъявлять к объектам внешней среды для облегчения функционирования технических средств, предназначенных для работы в экстремальных условиях, направлены на обеспечение выполнения этими средствами следующих действий:

- передвижение, в том числе при наличии разрушений и препятствий;
- выполнение различных манипуляционных операций с органами управления технологическим оборудованием и контроля за ним;
- проведение демонтажных и ремонтных работ с этим оборудованием;
- расчистка и уборка разрушений, очистка от вредных веществ.

В качестве иллюстрации изложенного приведем примеры подобных требований:

- дверные проемы должны обеспечивать проход РТС;
- несущая способность кровель и межэтажных перекрытий должна позволять использование РТС;
- технологическое оборудование, расположение запорно-регулирующей аппаратуры, выключателей и т.п. должны быть доступны для РТС;
- на объектах, где возможно использование РТС, должны быть предусмотрены помещения для их ремонта, подзарядки и т.д.

На рис.12.1, 12.2 и 12.3 показаны примеры упомянутых в параграфе 7.3 модульных роботов, использованных на работах по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. На место работы эти роботы доставлялись с помощью вертолетов. На рис.12.4 показана типовая схема применения РТС на работах на объектах типа АЭС, доставляемой к месту работы наземным транспортным средством. Транслятор предусмотрен для возможности управления технологическим роботом, находящимся внутри радионепроницаемого здания АЭС.

На рис.12.5 приведен пример более поздней разработки мобильного робота, предназначенного для работы в экстремальных ситуациях в качестве робота развед-

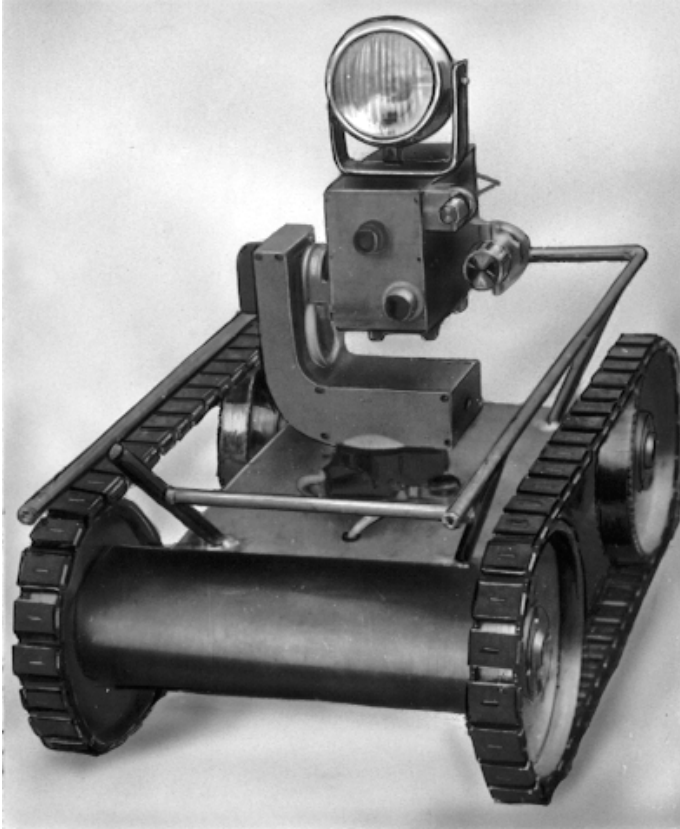


Рис.12.1. Робот-разведчик РР-Г1.

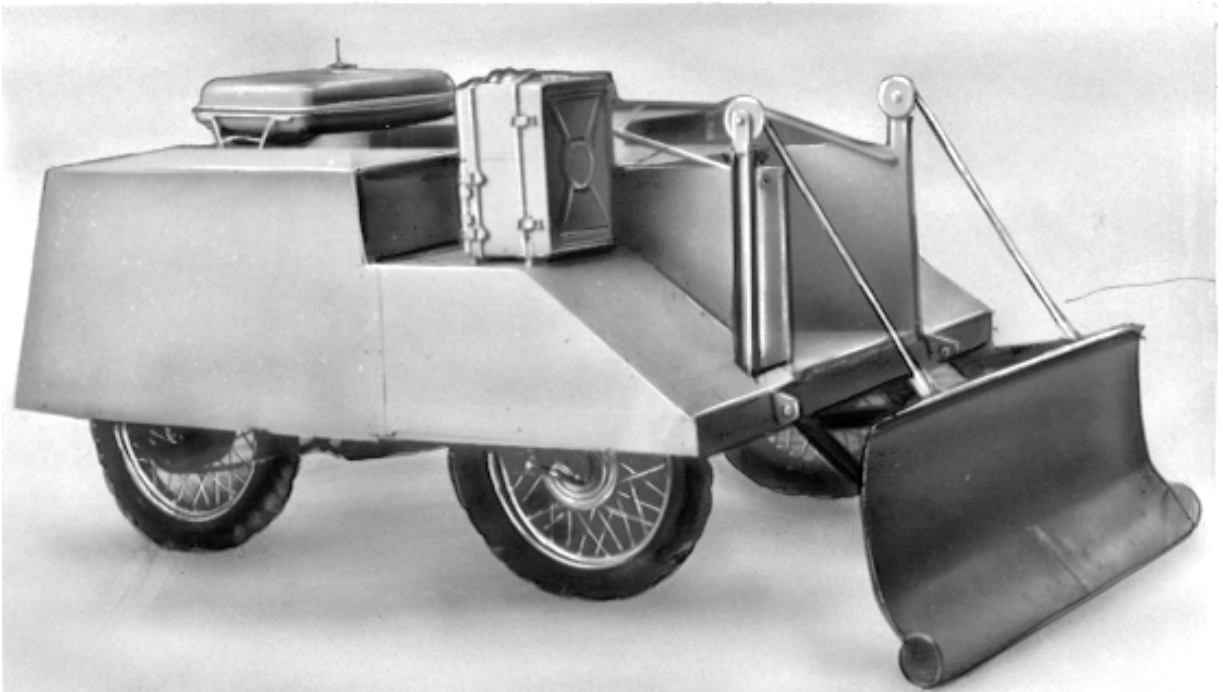


Рис.12.2. Радиоуправляемый тяжелый робот ТР-В1 с двигателем внутреннего сгорания для сборки и транспортировки радиоактивных сыпучих материалов.



Рис. 12.3. Тяжелый робот ТР-Г2. Сверху – подвижные телевизионные камеры и другие сенсорные устройства. Справа – пульт управления.

чика (инспекция), для выполнения различных технологических операций съемным инструментом, ведения охраны и борьбы с террористами. Другие варианты роботов подобного назначения были показаны на рис.3.16, 3.17. Для последнего он комплектуется различными дистанционно управляемыми средствами активной защиты и нападения. Робот снабжен пятиступенным шарнирным манипулятором грузоподъемностью 10 кг и подвижной двухступенной передающей телекамерой. Энергопитание –комбинированное – автономное от аккумуляторов и по кабелю длиной 300 метров. Кабель размещен на барабане – подборщике с вращающимся токосъемником. Управление дистанционное супервизорное и автономное программное и адаптивное, включая автоматический обход и преодоление препятствий.

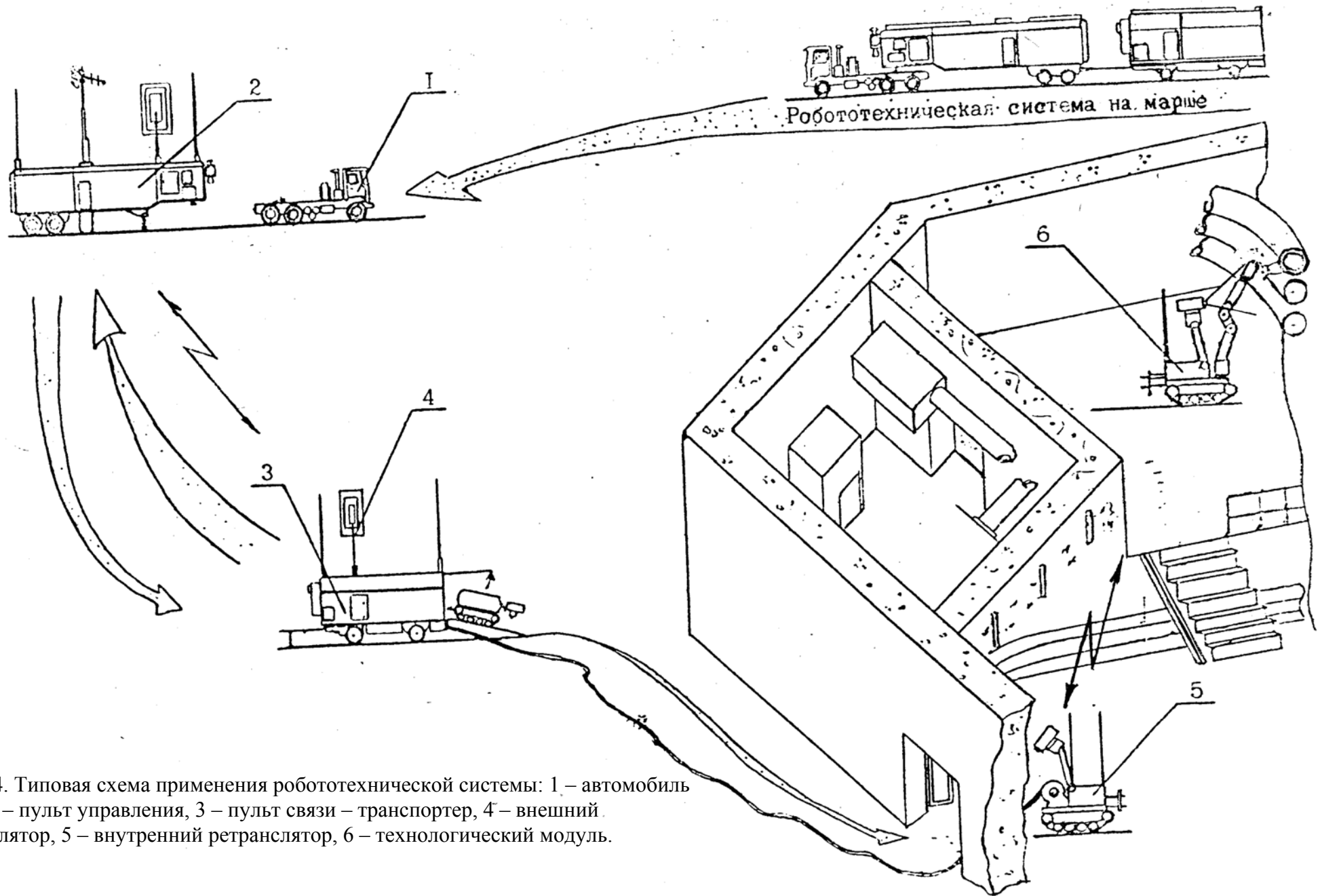


Рис.12.4. Типовая схема применения робототехнической системы: 1 – автомобиль тягач, 2 – пульт управления, 3 – пульт связи – транспортер, 4 – внешний ретранслятор, 5 – внутренний ретранслятор, 6 – технологический модуль.

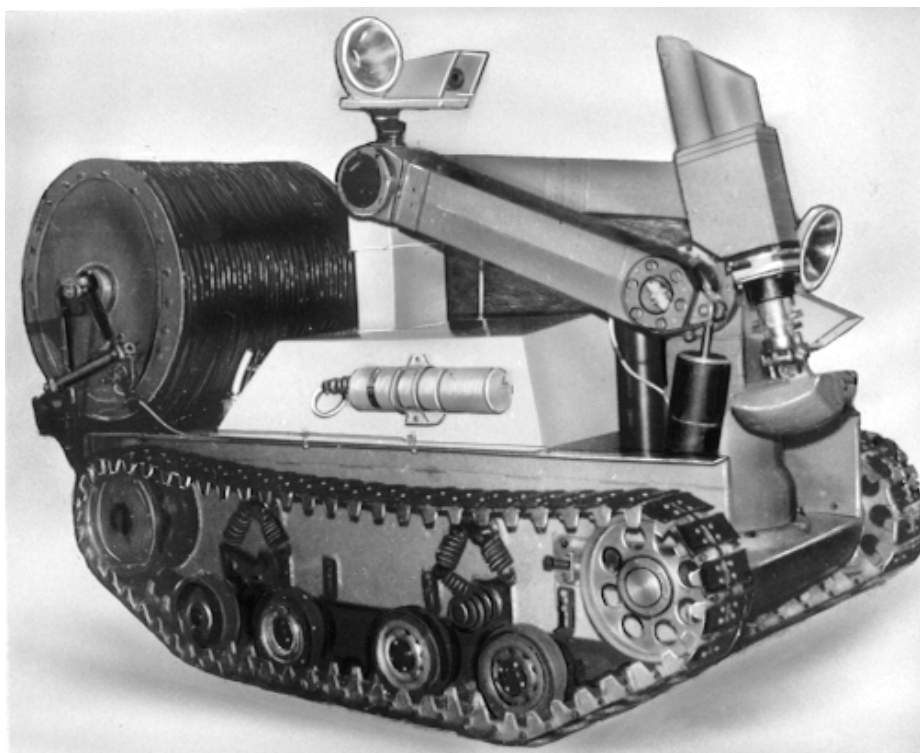


Рис.12.5. Робот «Малыш» (ЦНИИ РТК).

## 12.2. Космическая робототехника.

Космическая робототехника – новое перспективное направление развития космонавтики в том числе для работ в дальнем космосе, на Луне и на околоземных орбитах. Возникнув на стыке пилотируемой и беспилотной космонавтики она быстро сформировалась в самостоятельное направление, во многом определяющее перспективы развития космонавтики в целом. Робототехника расширяет функциональные возможности беспилотных космических аппаратов, доводя их практически до уровня современных пилотируемых аппаратов. В пилотируемой космонавтике робототехника позволяет в значительной степени освободить космонавтов от тяжелых и опасных работ особенно в открытом космосе и в условиях интенсивных ионизирующих излучений и превратить обитаемые космические аппараты в периодически посещаемые. В целом космическая робототехника открывает новые горизонты не только для развития традиционных средств космонавтики, но и для создания принципиально новых типов космических аппаратов, совмещающих достоинства пилотируемых и беспилотных аппаратов.

Космическая робототехника уже сегодня позволяет резко повысить эффективность космических систем, снизить расходы на их эксплуатацию, существенно расширить их функциональные возможности, на порядок увеличить ресурс и надежность, повысить безопасность космонавтов.

Роботы в космосе имеют следующие области применения:

- работа в открытом космосе (свободно перемещающиеся роботы для сборочных, погрузо-разгрузочных и спасательных работ, захвата и инспекции неизвестных объектов и т.д.);

- работа на поверхности планет и других космических тел;
- работа внутри и снаружи космических кораблей (их обслуживание, регламентные и ремонтные работы).

Соответственно можно выделить три основных типа космических роботов: свободнолетающие роботы, напланетные роботы, роботы космических кораблей (обслуживающие роботы)

Космические роботы и управляемые оператором неавтоматические манипуляторы имеют, как правило, электромеханические приводы. При этом в отличие от роботов, применяемых в обычных земных условиях, мощность их приводов на несколько порядков меньше при той же массе объектов манипулирования. Однако при этом неизбежно пропорционально снижается быстродействие робота из-за соответствующего уменьшения ускорений при перемещении объектов, обладающих определенной инерцией. Но этой ценой достигается существенное снижение массы и энергопотребления роботов, что, как известно, особенно важно для космической техники.

На рис.3.28 был показан пример свободнолетающего космического робота. На рис.12.5 и 12.6 показана система бортовых манипуляторов многоразового космического корабля «Буран» [2]. Манипуляторы шарнирные с шестью степенями подвижности имеют электрические приводы. Длина манипулятора - около 15,3 м, усилие в захватном устройстве — примерно 5 кгс. Наибольшая масса объекта манипулирования – 3 т. Линейная скорость с грузом – до 0,03 м/с, без груза – 0,6 м/с. Погрешность позиционирования – 5 мм. В исходном положении манипуляторы крепятся вдоль корабля с помощью ложементов.

Захватные устройства манипуляторов – сменные. На кисти каждого манипулятора укреплен телевизионная камера. Кроме того, на корпусе корабля размещено несколько телевизионных камер и осветителей, в том числе четыре подвижные камеры находятся по краям грузового отсека, откуда с помощью манипуляторов берутся и куда помещаются транспортируемые кораблем грузы.

Устройство управления манипуляторов с пультом управления размещено в кабине корабля. Система управления манипуляторами обеспечивает ручной, полуавтоматический и автоматический режимы управления. Для ручного управления оператор использует две задающие рукоятки, каждая из которых имеет три степени подвижности. Одна (левая) рукоятка служит для управления перемещением рабочего органа манипулятора, а другая (правая) – для его ориентации.

В полуавтоматическом режиме осуществляется интерактивное управление, при котором оператор использует готовые управляющие подпрограммы, оперативно выбирая и последовательно вводя их в действие в ходе выполнения конкретного задания. В полностью автоматическом режиме управление производится без участия оператора, за которым, однако, сохраняется функция контроля с возможностью вмешательства в любой момент в ход выполнения программы.

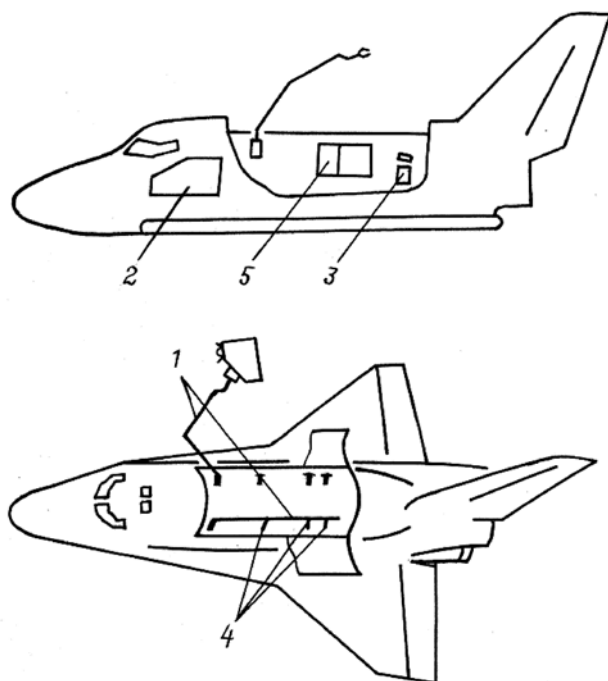


Рис.12.6. Размещение системы манипуляторов на многоразовом космическом корабле «Буран»:

1 – манипуляторы; 2 – устройство управления; 3 – подвижные передающие телекамеры; 4 – ложементы; 5 – полезный груз.

Основные функции системы манипуляторов космического корабля определяются назначением последнего для транспортировки грузов в своем грузовом отсеке с Земли на околоземную орбиту и обратно. Соответственно, с помощью манипуляторов должны осуществляться следующие операции:

- выемка грузов из грузового отсека и перенос их в сторону от корабля;
- манипулирование этими грузами с целью их пристыковывания к другим объектам или развертывания (раскрытия) для самостоятельной работы на орбите (ИСЗ, антенные системы, солнечные батареи и т.п.); захват свободнолетающих объектов и укладка их в грузовой отсек;
- инспекция космических объектов, находящихся на околоземной орбите;
- сборочно-монтажные и ремонтные работы с объектами на околоземной орбите.

На рис.3.29 был показан пример космического робота для наружного обслуживания космических кораблей. На рис.3.30, 3.31 и 3.32 представлены конструкции напланетных мобильных роботов.



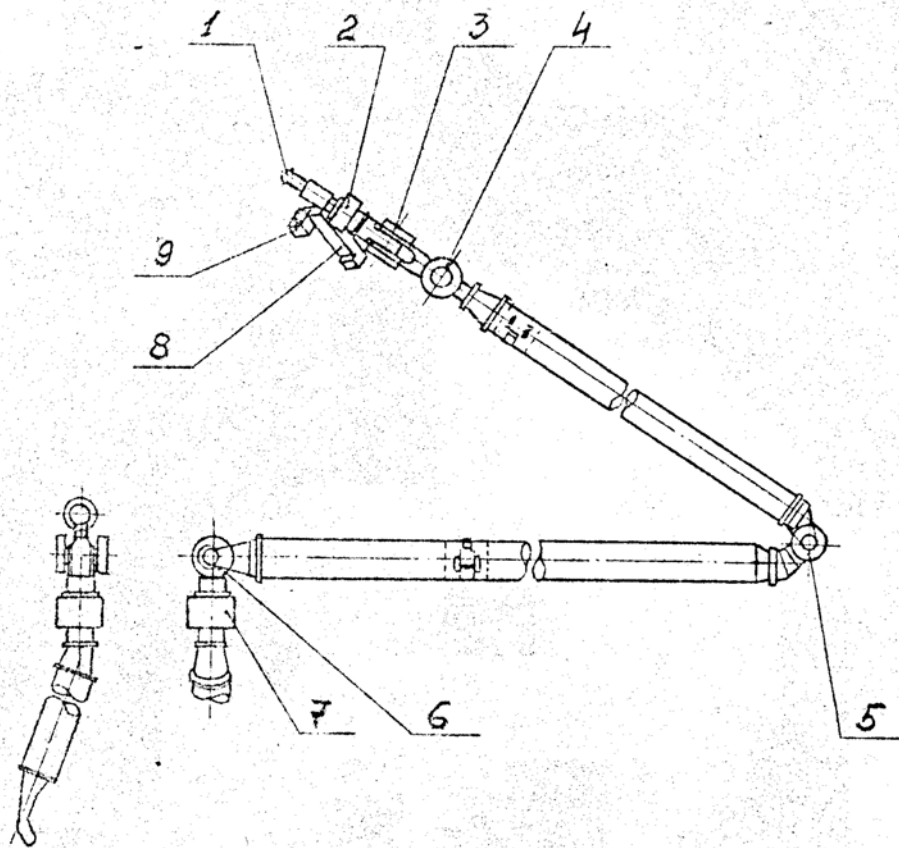


Рис.12.7. Манипулятор космического корабля «Буран» (разработка ЦНИИ РТК):  
1-6 – шарниры; 7 – схват; 8 – осветитель; 9 – телевизионная камера

### 12.3. Подводные роботы.

Исследование и освоение глубин океана и морского дна – еще одна важная сфера экстремальной робототехники, перспективность которой, аналогично космосу, связана, прежде всего, с тяжелыми и опасными для человека внешними условиями. Следствием последних является низкая эффективность работы водолазов. Назначение подводных роботов аналогично назначению роботов космических.

По способу передвижения подводные роботы делятся на плавающие и передвигающиеся по грунту. В зависимости от характера связи с кораблем различают подводные роботы автономные и привязные (связанные с кораблем тросом-кабелем). В последнем случае такой робот состоит из двух частей — надводной и подводной. При этом по соединяющему эти части тросу-кабелю осуществляется энергопитание подводной части и двусторонняя информационная

связь. С целью максимально облегчить подводную часть все функции по оперативной обработке информации, необходимой для деятельности робота, по возможности, поручаются его надводной части (насколько это допускает пропускная способность соединяющего кабеля).

Подводные роботы состоят в общем случае из тех же функциональных частей, что и космические роботы: движители, манипуляторы, системы управления ими, навигационная система и система связи. Задача управления движением подводного робота осложняется ограниченными возможностями подводного телевидения, что повышает роль локационных средств (главным образом ультразвуковых).

В настоящее время в мире созданы более 100 различного назначения подводных аппаратов, снабженных манипуляторами. В подавляющем большинстве используются манипуляторы с ручным и автоматизированным управлением непосредственно с борта аппарата, если он обитаем, или дистанционно с надводного корабля. В последнем случае для сокращения объема информации, которой обменивается оператор с местным устройством управления манипулятора, основными способами управления являются супервизорный и интерактивный.

На рис.1.7 был показан один из первых отечественных исследовательских подводных роботов «Мантa». Робот снабжен двумя гидравлическими манипуляторами грузоподъемностью 50 кг с семью степенями подвижности. На рис.12.8 приведена структурная схема системы управления роботов этого типа. В состав схемы входят пульт управления с устройством целеуказания на телеэкране и бортовой вычислитель на базе мини-ЭВМ. Бортовой вычислитель обеспечивает автономное выполнение роботом следующих директив оператора в супервизорном режиме управления:

- взять указанный оператором на телеэкране объект;
- перенести этот объект ближе к телекамере, положить в бункер или в любую заданную на телеэкране точку пространства;
- искать объект вслепую (на ощупь) в заданном квадрате (в случае видимости из-за замутнения воды и других причин).

В этом режиме обеспечивается автоматический обход манипулятором встречающихся препятствий.

Примером подводных роботов, передвигающихся по дну, являются роботы на гусеничном ходу, используемые для работ по подъему затонувших кораблей. На рис.12.9 показан такой подводный робот РАМ с манипулятором длиной 4 м. Управление роботом и его электропитание осуществляются с корабля-матки по кабелю длиной до 8 км.

Подводные роботы применяют также для очистки и окраски подводной части кораблей. Такой робот обычно удерживается на обшивке корабля электромагнитами.

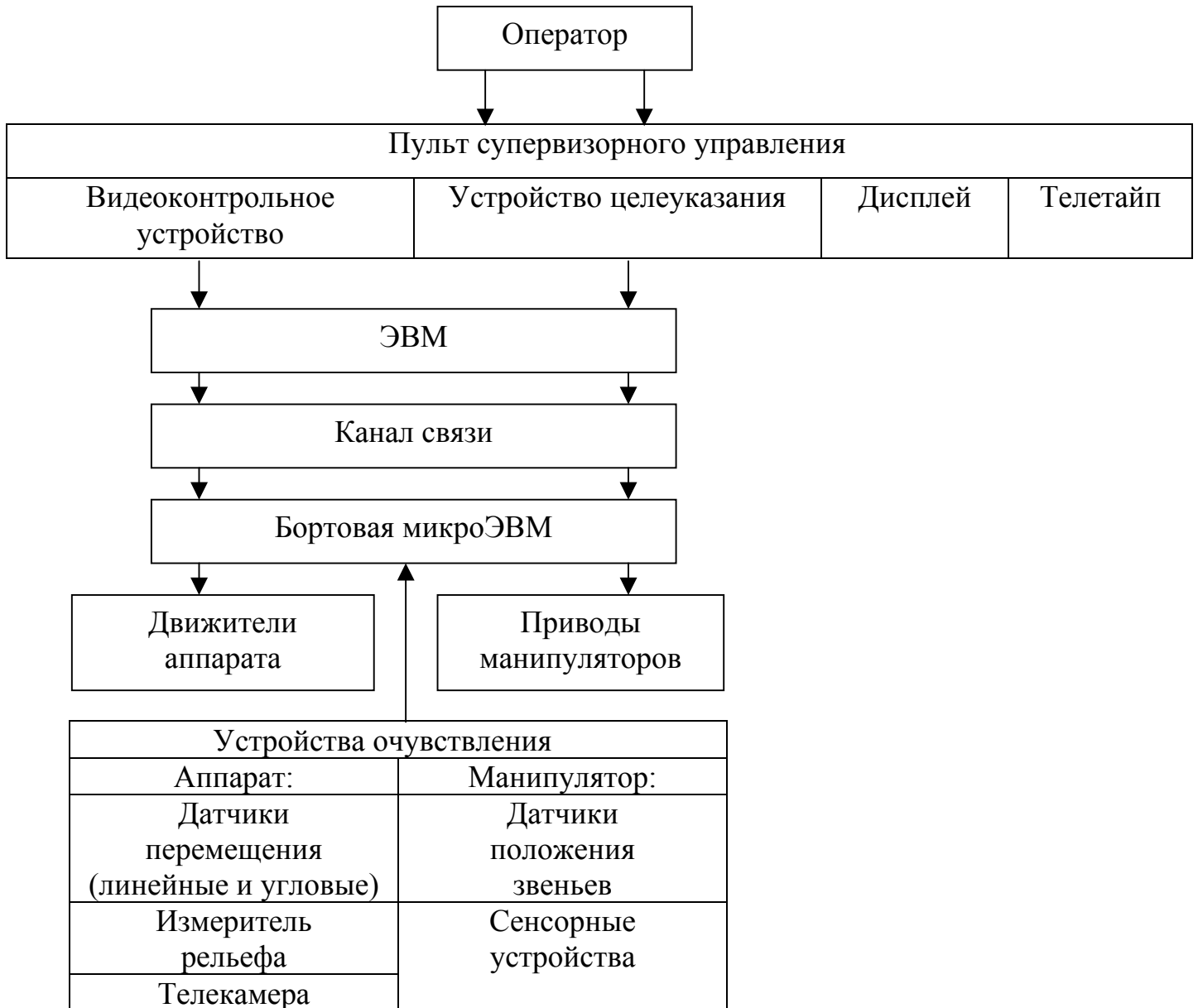


Рис. 12.8. Структурная схема системы управления подводного робота типа «Мантa».

#### 12.4. Военная робототехника.

Важным разделом экстремальной робототехники является робототехника для вооруженных сил. В нее входят следующие по назначению типы средств робототехники:

- боевые,
- боевого обеспечения,
- специально-технического обеспечения,
- тылового обеспечения.

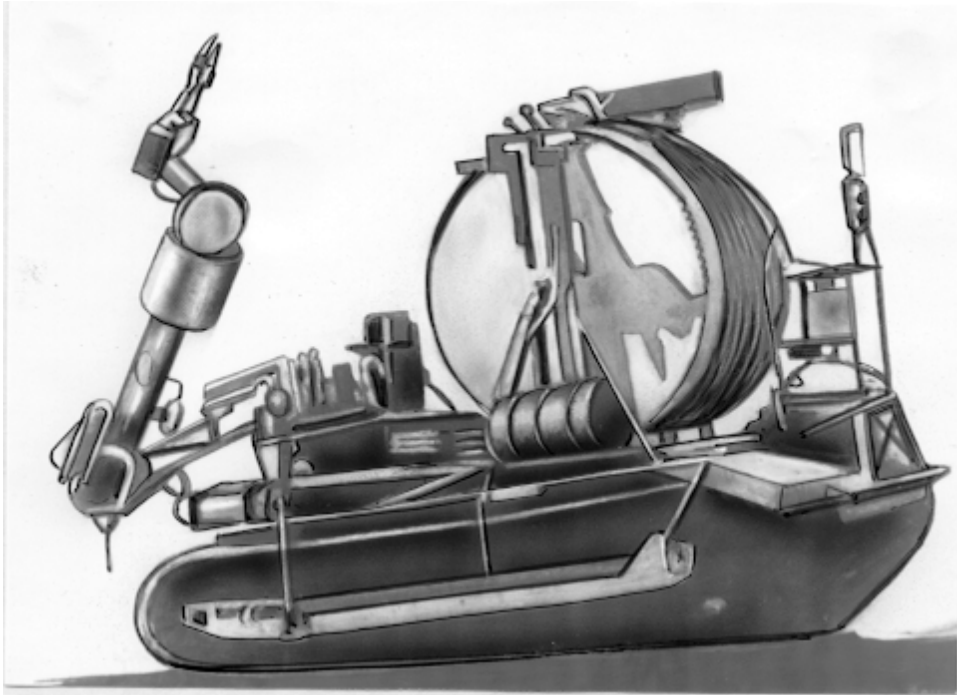


Рис.12.9. Подвижный робот РАМ (США) на гусеничном ходу для передвижения по грунту.

Основными специфическими видами средств робототехники для вооруженных сил являются:

- мобильные роботы наземного, воздушного и водного базирования,
- роботы-водители и пилоты для различных видов боевых и транспортных машин,
- роботы и другие средства робототехники для обслуживания вооружений и военной техники.

Основными факторами эффективности применения робототехники в вооруженных силах являются:

- применяемость в экстремальных условиях, не допускающих участие людского персонала,
- повышение быстродействия, точности и стабильности основных характеристик вооружения и военной техники,
- исключение ошибок операторов (от усталости, влияния неблагоприятных факторов внешней среды, стрессовых ситуаций, перерывов в тренировках и т.п.),
- сокращение численности личного состава и выведения его из зон опасных для жизни и здоровья,
- снижение потерь личного состава,
- упрощение собственно вооружения и военной техники,
- меньшая ее стоимость.

Важным условием повышения эффективности военной робототехники является комплексная унификация номенклатуры требуемых средств робототехники и их основных комплектующих систем.

Хотя на вооружении армий в мире находятся десятки образцов военных робототехнических систем, широкому применению робототехники в вооруженных силах препятствуют следующие недостатки современной робототехники с точки зрения требований вооруженных сил:

1. Исполнительные системы и прежде всего манипуляционные имеют неудовлетворительные массо-габаритные параметры, во много раз уступающие аналогичным параметрам человека.
2. Неудовлетворительные интеллектуальные возможности информационных и управляющих систем.

Развитие интеллектуальной робототехники позволит повысить эффективность вооружений и военной техники не менее чем в 2-3 раза.

Сегодня первоочередными направлениями применения робототехники в вооруженных силах являются:

- Создание первого поколения мобильных роботов-разведчиков, саперов, охранников и т.п. легких роботов.
- Создание стационарных роботов для обслуживания вооружения и военной техники.
- Применение средств робототехники для обеспечения безэкипажного функционирования традиционных подвижных средств военной техники.

На первом этапе этой работы осуществляется переход к их дистанционному управлению с последующим наращиванием автоматически выполняемых операций.

## **ГЛАВА 13. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОБОТОТЕХНИКИ**

### **13.1. Социально-экономическая эффективность применения средств робототехники.**

Рассмотрение вопроса об эффективности и, соответственно, перспективности какого-либо нового научно-технического направления или нового вида техники необходимо начинать с сопоставления его с основными целями общества, а затем уже переходить к оценке его чисто экономической эффективности. Действительно, могут быть такие научно-технические идеи, которые, давая определенное и даже очень большое повышение эффективности конкретного производства, принципиально несовместимы с общей целью и принципами нашего общественного производства или в чем-то противоречат им. Например, применение конвейера и полуавтоматического оборудования, повышая производительность, резко ослабляет творческий характер труда.

Организация производства на конвейере ведет к такой дифференциации операций, при которой работающие не только выполняют однообразные, монотонные движения фактически без необходимости приложения каких-либо интеллектуальных усилий. Тем не менее дифференциация и упрощение трудовых операций имеют важное положительное следствие: именно они создают предпосылки перехода к полностью автоматическому производству в том числе с использованием промышленных роботов, что позволяет вообще исключить труд человека при их выполнении.

Итак, рост производительности труда и, соответственно, расширение объема производимого совокупного продукта в целом ряде случаев ведут к объединению содержания труда и соответственно снижению его престижности. Выход из указанного противоречия заключается в переходе к принципиально новым техническим решениям, позволяющим освободить человека от однообразных, физически тяжелых и лишенных интеллектуального содержания операций. Дальнейший рост производства на основе использования достижений современной науки и техники связан еще с другими ограничениями, которые вызваны ограниченными возможностями человека. Они касаются увеличения интенсивности технологических процессов, возрастания числа процессов, протекающих в агрессивной и вредной для человека среде (химия, атомная энергетика и др.). Чтобы снять все указанные ограничения, опять-таки, необходимо передать часть трудовых операций новым техническим средствам. Не менее существенные ограничения возникают и в отношении управления качеством производимой продукции. Практика показывает, что в производстве с преобладанием ручного труда практически невозможно гарантировать стабильно высокое качество продукции.

Робототехника относится именно к тем научно-техническим направлениям, с помощью которых могут быть преодолены указанные объективные противоречия в

развитии современного производства между растущей специализацией трудовых операций и необходимостью усиления содержательности труда. Она освобождая человека от тяжелого и опасного труда с другой стороны освобождает производство от непосредственного участия в нем людей и тем самым снимает связанные с ними ограничения на дальнейшую интенсификацию производственных комплексов и внедрения новых технологических процессов принципиально не допускающих присутствие людей.

Рассмотрим конкретные особенности оценки эффективности применения средств робототехники в производстве. Анализ результатов использования роботов в различных отраслях промышленности и типах производств подтверждает, что они могут быть эффективно применимы в условиях как мелкосерийного, так и массового производства. В массовом и крупносерийном производстве с быстрой сменой объекта производства (автомобилестроение, радиопромышленность, производство электробытовых приборов и т.п.) перспективным является использование роботов для обслуживания агрегатных станков и переналаживаемых автоматических линий на операциях загрузки-выгрузки технологического оборудования на начальных и конечных позициях линий, для внутрицехового транспортирования. Применение роботов позволяет осуществлять комплектацию и запуск таких линий в более короткие сроки. Роботы можно эффективно применять, в частности, для замены специального вспомогательного оборудования на отдельных операциях в автоматических технологических комплексах в период модернизации или замены этого оборудования. В этом случае отпадает необходимость останавливать комплекс на длительный период, а затраты на переоснащение роботов оказываются значительно ниже потерь вследствие простоя комплекса в течение всего периода модернизации или замены специализированного вспомогательного оборудования на конкретных операциях. В серийном и мелкосерийном производстве наиболее перспективным является применение роботов в сочетании с оборудованием с ЧПУ. Это позволяет полностью решить на базе групповой организации производства проблему изготовления изделий малыми партиями.

В любой области применения роботов их необходимо рассматривать как компонент всего производственного комплекса, включающего другое основное и вспомогательное технологическое оборудование, объединенное общей системой управления. Использование роботов оказывает существенное влияние на такие важные экономические характеристики, как производительность труда, объем производства продукции, себестоимость, рентабельность, фондоотдача.

Рост производительности труда обеспечивается, с одной стороны, увеличением объема производства, а с другой сокращением численности производственных рабочих. Рост объема производства происходит вследствие улучшения использования оборудования, повышения его производительности и снижения брака. При этом улучшение использования оборудования достигается за счет как факторов экстенсивного, так и интенсивного характера. Факторы интенсивного характера предусматривают улучшение использования оборудования в единицу времени вследствие сокращения трудоемкости вспомогательных операций (загрузки-выгрузки

деталей, транспортировки и т.п.). Повышение экстенсивного использования оборудования обусловлено увеличением времени его работы. В условиях роботизации это обеспечивается сокращением различного рода потерь рабочего времени и повышением сменности работы оборудования

Снижение брака продукции является следствием устранения влияния таких индивидуальных и субъективных факторов, как квалификация, опыт, утомляемость рабочего, его состояние.

В условиях роботизации происходит абсолютное и относительное сокращение численности производственных рабочих. Под относительным сокращением численности понимается возможность повысить объем производства при той же численности производственных рабочих благодаря увеличению годового эффективного фонда времени работы оборудования в результате использования роботов.

Увеличение объема производства в условиях роботизации приводит к снижению себестоимости продукции в результате уменьшения доли условно-постоянных накладных расходов на единицу продукции, сокращения непроизводительных расходов, таких, как оплата сверхурочных работ, оплата простоев рабочих, снижение потерь от брака, а также удельных затрат по содержанию и эксплуатации оборудования. Снижение себестоимости продукции достигается за счет экономии заработной платы рабочих, высвобождаемых абсолютно и относительно. Эта составляющая является одной из самых очевидных и значительной при оценке экономической эффективности ПР. Экономия на заработной плате образуется также вследствие опережающего темпа повышения производительности труда по сравнению с темпом роста заработной платы.

Применение роботов позволяет улучшить использование производственных фондов, которое характеризуется показателями рентабельности и фондоотдачи. При этом рентабельность увеличивается вследствие возрастания общей суммы прибыли, получаемой в результате роста объема производства.

Для оценки экономического эффекта от применения роботов в конкретном технологическом комплексе необходимо провести комплексный технико-экономический анализ с учетом технических параметров всех агрегатов, входящих в комплекс, основных характеристик и особенностей технологического процесса, частных организационных и технико-экономических показателей, а также социальной значимости роботизации данного процесса. В целом объектами такого анализа должны послужить:

- оборудование, на котором выполняются операции технологического процесса;
- роботы;
- вспомогательное оборудование, которое требуется для эксплуатации комплекса;
- транспортно-складские системы для материалов, заготовок, готовых изделий, инструмента, оснастки, отходов производства;
- запас материалов, заготовок, представляющих различного вида заделы, инструмента, технологической оснастки;



- постоянный гарантийный ремонтный запас деталей и элементов требуемый для нормальной эксплуатации комплекса;
- устройства обеспечения других необходимых условий нормальной эксплуатации комплекса (вентиляционные, защитные и др.);
- система управления комплексом в целом;
- производственные площади, занимаемые комплексом;
- прочие элементы, которые выявляют при изучении материального состава комплекса как объекта экономического анализа.

Все расчеты экономического характера для оценки целесообразности и эффективности применения роботов следует выполнять с учетом этого полного состава объекта исследования. Кроме того, одним из важных факторов, который следует учитывать при экономическом обосновании роботизации, является надежность. Недостаточная надежность технических устройств комплекса соответственно снижает эффективность роботизации производства. В связи с этим возникает необходимость в исследовании экономической эффективности различных мероприятий по повышению надежности и выявлению оптимальной в этом смысле структуры роботизируемого комплекса. Например, чем универсальнее робот, тем он сложнее и менее надежен. В то же время использование в составе роботизируемого технологического комплекса более простых и дешевых, но менее универсальных роботов приводит к необходимости включать в состав комплекса дополнительное специальное оборудование и приспособления, компенсирующие снижение функциональных возможностей роботов. Проектирование и изготовление такого специального оборудования связаны с дополнительными затратами, а его размещение приводит, как правило, к увеличению производственных площадей, занимаемых комплексом.

Каждому сочетанию технических средств технологического комплекса в свою очередь соответствует вполне определенный состав системы управления. Различными будут для рассматриваемых вариантов как капитальные, так и эксплуатационные затраты на весь срок службы комплекса. В связи с этим возникает задача определения такого состава технических устройств, входящих в комплекс, и соответствующего программного обеспечения, который дает минимум затрат на его проектирование, изготовление и эксплуатацию за весь срок службы комплекса.

Социальные аспекты роботизации, связанные с улучшением условий труда, ликвидацией тяжелых, опасных и вредных для здоровья видов работ, с повышением общей культуры производства, должны быть количественно измерены и учтены в расчетах экономической эффективности применения роботов. Например, внедрение роботов уменьшает текучесть кадров, что выражается в конкретной экономии расходов на прием-увольнение, учебу и т.п.

Необходимо учитывать и экономический эффект, связанный с тем, что роботизация позволяет уменьшить количество профессиональных заболеваний, снизить травматизм, сократить затраты на лечение и мероприятия по охране труда и технике безопасности. Учет социальных факторов в экономических расчетах позволяет более точно определять области эффективного применения роботов.

Обычно экономическую эффективность создания и применения роботов и основанных на них технологических комплексов оценивают по годовому экономическому эффекту, который представляет собой экономию приведенных годовых затрат, получаемую в результате использования роботов в составе определенного технологического комплекса или комплекса в целом. Эту экономию определяют из сравнения предлагаемого (нового) варианта с базовым, в качестве которого принимается лучший аналог, который может быть приобретен или воспроизведен на основе лицензии. Затем по этой величине определяют срок окупаемости затрат.

### **13.2. Техника безопасности в робототехнике.**

В проблеме безопасности труда при использовании роботов можно выделить следующие два аспекта:

- применение роботов как средства повышения безопасности производства;
- обеспечение безопасности при эксплуатации самих роботов.

Первый аспект соответствует одному из первоочередных назначений роботов – высвобождение людей от травмоопасного, вредного и тяжелого физического труда. При планировании внедрения роботов в производство такого рода технологические операции получают приоритет, и на таких операциях роботы внедряют наиболее успешно. В машиностроении к этим операциям относятся, в частности, обслуживание кузнечно-прессового оборудования и металлорежущих станков (особенно при обработке тяжелых заготовок), оборудования в гальваническом и литейном производствах, в производстве изделий из пластмасс, а также такие основные технологические операции, как сварка, окраска, погрузочно-разгрузочные и транспортные работы. В немашиностроительных отраслях такими операциями являются установка крепи в забое, обслуживание отбойных и бурильных агрегатов, в горнодобывающей и угольной промышленности, обслуживание оборудования и фасовка продукции во вредной для здоровья атмосфере в химической и нефтехимической промышленности, различные манипуляционные операции в металлургической промышленности, атомной энергетике и других производствах в экстремальных условиях (вредные излучения, взрывоопасность, предельные температуры, загазованность, запыленность и т.п.). В мире накоплен определенный положительный опыт повышения безопасности труда с помощью роботов прежде всего в машиностроении (на штамповке, в гальваническом производстве, в производстве пластмассовых изделий, на термообработке, погрузо-разгрузочных и транспортно-складских операциях).

Второй названный выше аспект робототехники с точки зрения безопасности труда – это обеспечение безопасной работы самих роботов, которые при определенных условиях могут представлять собой источник повышенной опасности для человека, а также для работающего с ними оборудования. Опыт свидетельствует о возможности несчастных случаев, в том числе со смертельным исходом, при работе с роботами. В

Японии, где применение роботов достигло наибольших размеров, по данным статистики почти каждый третий рабочий так или иначе сталкивается с опасностью, создаваемой роботами. В основном такая опасность вызывается следующими причинами:

- неисправность собственно робота из-за нарушения его механической прочности или отказов в системе управления;
- ошибки программирования и настройки, вследствие чего при эксплуатации возможны непредвиденные движения с выходом из огражденной рабочей зоны или механические повреждения робота;
- потери объекта манипулирования и другие аварийные ситуации из-за превышения допустимых динамических режимов и перегрузок;
- нарушение персоналом условий эксплуатации робота (вход в рабочую зону, особенно при отключенных средствах безопасности, отсутствие личных средств безопасности, включая каску, превышение допустимой грузоподъемности, несоответствие исполнения робота реальным условиям эксплуатации, другие нарушения технических условий на робот или технологический комплекс, в составе которого он работает);
- неправильная работа средств безопасности, которыми оборудованы робот и его рабочая зона (устройства блокировки, сигнализации, защитные ограждения и т.п.).

Статистика показывает, что большая часть несчастных случаев с обслуживающим персоналом связана с нахождением в рабочей зоне при программировании, настройке и ремонте роботов. Несчастные случаи во время работы робота в автоматическом режиме составляют всего единицы процентов.

Мероприятия по обеспечению безопасности роботизированных производств должны быть предусмотрены на всех этапах их создания и эксплуатации, начиная с формулирования технических требований, и регламентированы соответствующими нормативно-техническими документами, а также специальными документами по технике безопасности в робототехнике. Общие требования по безопасности при проектировании и эксплуатации роботов стандартизированы. В этих требованиях, в частности регламентированы следующие позиции:

Если при программировании и наладке робота требуется пребывание персонала в его рабочей зоне, то в этих режимах должно быть предусмотрено снижение скорости его исполнительных устройств до 0,3 м/с.

Пульт управления робота должен выдавать информацию о режиме его работы, срабатывании блокировок и работающего с ним технологического оборудования, наличии сбоя в работе, начале движения робота.

Регламентированы также требования к предохранительным, блокирующим и защитным устройствам, которыми должны быть оснащены роботы.

Применительно к организации технологических комплексов регламентированы:

- необходимость комплексной автоматизации всех основных и вспомогательных операций с допустимостью сохранения за оператором в основном только некоторых функций управления и контроля;

- наличие блокирующих устройств и ограждений, требования к ним;
- планировка комплекса с учетом размеров рабочих зон роботов;
- требования к организации рабочих мест операторов, к пультам управления и расположенным в других местах дополнительным органам аварийного отключения.

Применительно к эксплуатации роботов разработаны:

- требования, предъявляемые к обслуживающему персоналу, и перечень их обязанностей;
- инструкции по охране труда.

В обязанности обслуживающего персонала, в частности, входят проверка оборудования и блокировочных устройств перед началом работы, обязательная регистрация в специальном журнале всех неполадок и аварийных ситуаций.

## ГЛАВА 14. РОБОТОТЕХНИКА ЗАВТРА.

Современная робототехника как новое научно-техническое направление идейно сформировалась через несколько лет после провозглашения Н.Винером концепции кибернетики под ее влиянием.

Робот как нового типа машина-автомат ворвался в сложившуюся классификацию машин как что-то инородное: он может быть и технологической машиной и транспортной и информационной, а может и вообще выпадать из этой категории, выполняя функции технологического устройства, приспособления или средства автоматизации. Правда, и в последнем робот тоже сразу же стал «возмутителем спокойствия» и породил новый термин «роботизация», который никак не вписывается в понятие «автоматизация». До этого были известны манипуляторы, управляемые человеком, однопрограммные автоматические манипуляторы-автооператоры, механические руки. Но, вот, появились манипуляторы с ЧПУ, их назвали роботами и родилось новое научно-техническое направление – робототехника.

С самого начала в развитии робототехники определялись две, правда, сперва довольно слабо связанные цели – прикладная и фундаментальная. Прикладная цель была объективно обусловлена развитием современного производства, а именно переходом к комплексной гибкой автоматизации, к гибким автоматизированным производствам. Здесь одной из первоочередных задач стало создание выявленного в ходе этих работ недостающего звена в перечне компонентов таких производств, которое должно заменять человека, выполняющего различные манипуляционные операции – основные технологические и вспомогательные. Из этой задачи сразу же выделилась как отдельная задача высвобождения людей от опасных и вредных работ. Затем по мере развития робототехники, естественно, возникла задача создания средств робототехники, предназначенных для работ, которые принципиально не могут выполняться с помощью или даже просто в присутствии людей (дальний космос, глубины океана, новые интенсивные безлюдные технологии и т.д.). Возникли экстремальная робототехника, медицинская микроробототехника, биоробототехника, шагающие машины и другие специальные разделы робототехники. Появилось роботостроение с международной кооперацией и специализацией. Постепенно сложились определенные принципы построения, проектирования и применения средств робототехники и основанных на них технических систем. Определились основные области применения и перспективы их расширения, основанные на реальных технических и экономических характеристиках этой техники.

Принципиальный вопрос – по какому пути идти робототехнике – в сторону повышения универсальности роботов или, наоборот, их специализации разрешился признанием в качестве основного модульного принципа их построения. Этот принцип позволяет промышленности оперативно поставлять даже в единичных количествах роботы, собранные из хорошо отработанных унифицированных модулей, для выполнения самых разнообразных технологических операций. Таким образом, заманчивая идея создания сравнительно небольшого семейства

универсальных роботов, такая близкая их прототипу – человеку, была заменена идеей универсального набора компонентов роботов – модулей.

Сегодня роботы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, а уровень робототехники является важным показателем научно-технического, промышленного и оборонного потенциалов каждой страны.

Вторая указанная выше фундаментальная цель робототехники – это экспериментальное изучение и воспроизведение феномена разумного поведения живых существ. В дальнейшем эта проблема развилась в самостоятельное научно-техническое направление, получившее название «искусственный интеллект». То, что эта проблематика наиболее остро встала именно в робототехнике, вытекает из самой ее исходной сущности, как альтернативы занятого физическим трудом человека. Первый же опыт создания таких машин показал недостаточность, и даже примитивность современной теории и техники автоматического управления и теории информации по сравнению с задачами, решаемыми человеком при выполнении даже самых простых манипуляционных операций.

В связи с этим были развернуты интенсивные экспериментальные исследования с объектами типа «глаз-рука» и различными оцувствленными мобильными объектами – тележками, которые продолжают и сегодня. В последнее время к ним добавились исследования группового поведения подобных объектов (мультиагентные системы, игры роботов и т.п.).

Это направление в робототехнике непосредственно соответствует основной идее кибернетики об общности информационно-управляющих процессов в технике и в живом мире. Одна из конечных целей этого направления в робототехнике – воспроизведение процесса эволюции живой природы, поскольку именно робот является технической системой, которая реализует триаду «сенсоры – мозг – активаторы (эффекторы)», замкнутую в кольцо через внешнюю среду. Именно на базе роботов представляется возможным реализовать и исследовать известный тезис «рука создала человека». Конечным научно-техническим результатом этих исследований должны стать принципы и методика самоусовершенствования интеллектуальных технических систем типа робот. Это позволит спустить курок эволюционного совершенствования роботов, пределом которого, разумеется, не будут интеллектуальные способности человека. Конечно, это эмпирика, но она даст результат, гарантированный опытом развития живой природы. Ведь ее эволюционное развитие – это тоже эмпирика, метод проб и ошибок.

Однако решить эту проблему в рамках одной робототехники нереально. Здесь необходимо скоординированное взаимодействие со многими смежными научно-техническими направлениями, хотя бы потому, что для этого требуется создание принципиально нового материально-технического обеспечения не только для информационно-управляющих систем (технические нейророботные структуры и т.д.), но и для остальных компонентов названной выше триады – исполнительных систем и сенсоров.

Что касается первых, то подобно тому как робототехника явилась одной из побудительных причин и полигоном развития работ по проблеме искусственного интеллекта, она же инициировала проблему «искусственной мышцы», как

проблему создания принципиально новых приводных исполнительных систем с по крайней мере на порядок лучшими массо-габаритными характеристиками, чем у таких систем, основанных на современных электрических, гидравлических и пневматических приводах. Последние именно более чем на порядок уступают по указанным характеристикам поперечно-полосатым мышцам животных. Речь идет о принципиально новом подходе к построению приводов, так же заимствованном у живой природы и основанном на параллельно-последовательной работе сотен и тысяч элементарных микроактиваторов. Аналогичная проблема перехода к микромодульному построению стоит и перед сенсорными системами. Успешное решение этих проблем будет иметь революционизирующее значение не только для робототехники, но и для всего машиностроения.

Что касается собственно робототехники, то, как отмечено выше, прикладная робототехника в своем развитии практически быстро исчерпала научный задел, который был предоставлен ей, прежде всего теорией автоматического управления и информатикой, а также технический задел в виде приводов и систем ЧПУ, заимствованный у станкостроителей. И сегодня ее дальнейший прогресс почти целиком зависит от успехов в решении названных выше фундаментальных проблем. Так сомкнулись первоначально почти не связанные два направления развития робототехники – прикладное и фундаментальное. Конечно, это признак ее зрелости и становления как самостоятельной науки.

В начале своего развития робототехника пережила период романтизма, период «бурь и натиска», когда казалось, что еще немного и мы «схватим бога за бороду» – наступит «роботовладельческий» строй. На смену порожденных кибернетикой споров о том может ли машина мыслить и превзойти в этом человека, разогрелись дискуссии об опасностях, которые могут принести роботы, вплоть до их бунта против человека. Затем наступили зрелость и прозрение: определился целый комплекс серьезнейших научно-технических проблем, которые стоят на пути к царству роботов. Основные из них были названы выше и, как следует из изложенного, генеральное направление дальнейшего развития робототехники – это прежде всего комплексная миниатюризация компонентов и интеллектуализация в виде распределенного интеллекта, понижающего все системы роботов от сенсорики до приводов и даже до конструктивных материалов и «кожи» роботов (интеллектуальные материалы) и искусственные мышцы.

Решение проблемы комплексной миниатюризации в машиностроении – это одна из основ машиностроения XXI века в целом. Этот процесс начался в шестидесятые годы в наиболее молодой отрасли машиностроения – электронном машиностроении. Традиционное машиностроение основано на идеях, возникших в XVIII веке вместе с созданием первых машин. В ее основе лежит концепция повышения мощности машинных единиц как путь повышения удельной мощности, КПД и других основных показателей. Машины XXI века в значительной степени будут построены на других принципах, еще совсем недавно не прогнозируемых даже в научной фантастике. Это базирование, подобно живым организмам, на распределенные десятки тысяч адаптивных и интеллектуальных ячейки типа «сенсор-процессор-активатор». Они получили название **микроэлектронно-**

**механических систем (МЕМС)** и представляют собой электромеханические приборы размером в единицы миллиметров. Переход на такую элементную базу позволит не только на порядки улучшить основные характеристики машин, но и кардинально расширить их функциональные возможности и создать принципиально новые типы машин. Достаточно назвать подводные корабли с возможностями дельфинов, многотысячные группы миниатюрных летательных аппаратов, контролирующих среду и выполняющих другие, например, военные задания, микроробототехнические системы для хирургии и внутреннего контроля различных технических объектов, массовые микросистемы для переработки отходов, обработки сельскохозяйственных угодий, разрушения сооружений и т.п., «умные» материалы (smart materials) и конструкции, адаптирующиеся к внешним условиям.

Неизбежность этой научно-технической революции обусловлена, как и в робототехнике, в частности, с одной стороны все большим приближением в ходе эволюционного освоения потенциальных возможностей традиционных типов машин к пределу, а с другой появлением и быстрым развитием научно-технического и технологического задела для формирования новой концепции построения машин на микротехнической базе. Исходной технологической основой при этом является современное производство микроэлектроники. Однако в ближайшем будущем предстоит перейти от этой в основном плоскостной технологии к новым **трехмерным технологиям** изготовления пространственных структур и подвижных микросоединений в виде микроэлектронно-механических преобразователей типа сенсоров, датчиков и исполнительных устройств (активаторов). По существу, предстоит создать основу **новой индустрии микротехники** подобно тому, как в свое время это было сделано в микроэлектронике.

Что касается собственно робототехники, то по мере решения проблемы комплексной микроминиатюризации неизбежно будет пересматриваться и общая концепция построения роботов. Уже сегодня назрела необходимость создания на базе единого системного подхода нового поколения модулей – интеллектуальных, основанных на новой микроэлектромеханической элементной базе. За этим в свою очередь неизбежно последует корректировка самого принципа модульного построения роботов с кардинальным расширением их функциональных возможностей, а, следовательно, и сфер применения. И не исключено, что на этом новом витке развития технической базы может возродиться идея универсальных роботов. Основной предпосылкой для этого, как раз, будет успешное решение проблемы создания приводов типа искусственная мышца по универсальности близких мышцам животных. Дело в том, что основным препятствием для расширения степени универсальности роботов являются их силовые, исполнительные системы. Они не допускают избыточности как с точки зрения экономических, так и массо-габаритных и энергетических показателей, подобной избыточности, реализованной в вычислительной технике на базе микропроцессоров. Идея искусственной мышцы может стать основной для преодоления этого препятствия.



В заключении перечислим основные области применения робототехники, где в первую очередь должны будут реализовываться достижения в решении рассмотренных научно-технических проблем:

1. Космическая робототехника. Сегодня это важнейший компонент очередного этапа развития космонавтики. К нему относится, прежде всего, конечно, освоение дальнего космоса и ближайших планет, включая Луну. Космическая робототехника открывает перспективы создания принципиально новых космических объектов и систем, в том числе и в околоземном пространстве, ориентированных на новые возможности, которые предоставляет робототехника.
2. Подводная робототехника. Наряду с космосом это второе направление «экспансии» человечества, где решающую роль должна играть робототехника нового поколения. Если человек-амфибия – это фантастика, то роботы-амфибии – это уже реальность. Достаточно напомнить их работу по обследованию «Титаника» и затонувших подводных лодок, использование подводных роботов-геологов. А, ведь, это, по существу, еще только предыстория подводной робототехники.

В настоящее время еще нет ни лунных и других космических баз, обслуживаемых саморемонтирующимися роботами, нет и подобных подводных сооружений. Однако если сегодня основное направление развития современного машинного производства – это безлюдные комплексно-роботизированные предприятия, то тем более это должно относиться к освоению космоса и глубин океана и развитию соответствующих технологий.

3. Мобильная робототехника наземного и воздушного базирования. Сюда относятся робототехнические системы для действий в экстремальных условиях, в том числе для вооруженных сил и других силовых структур, групповое применение роботов, в том числе в конфликтных ситуациях, и создание следующих интеллектуальных поколений таких роботов, принципиально ориентированных на автономное функционирование.

Особенно большие перспективы связаны при этом с микроробототехникой. Летающие, плавающие, ползающие и т.п. микророботы произведут революцию во многих важнейших сферах человеческой деятельности.

4. Био- и медицинская робототехника. Сюда входит как рассмотренная выше проблематика заимствования бионических решений, так и обратный процесс внедрения робототехники в живые организмы. Начало последнему положило протезирование конечностей, затем усиление физических возможностей человека для функционирования в экстремальных условиях (активные скафандры, биоуправляемые шагающие машины и т.п.). Наконец, появились новые поколения интеллектуальных протезов и экзоскелетов, роботы-сиделки, робототехнические системы для реабилитации инвалидов, массажисты и т.п. Однако, прежде всего – это такие новые области применения робототехники как хирургия, в том числе

дистанционная, роботы-ассистенты, микророботы для внутрисосудистой и внутривидовой диагностики и хирургии.

Среди перечисленных перспективных областей применения робототехники отсутствует промышленная робототехника. Объясняется это тем, что хотя в обозримом будущем основной мировой парк роботов, по-прежнему, будут составлять промышленные роботы, не этот уже сложившийся раздел робототехники определяет ее развитие в рассмотренных выше направлениях, а именно перечисленные выше бурно развивающиеся области применения.

Как уже отмечалось, для решения вышеуказанных проблем необходима консолидация сил робототехники со смежными научно-техническими направлениями. И в этой связи назрела потребность в анализе самой сложившейся системы таких направлений, которые так или иначе тоже порождены идеями кибернетики и соответственно близки робототехнике. Основой и символом такой консолидации может стать названная выше триада «сенсорика – процессор – активатор». Она появилась в технике вместе с первыми автоматами древности, затем составила основу теории автоматического управления и кибернетики, а в последние годы начинает пронизывать буквально все направления научно-технического прогресса, начиная с материаловедения (интеллектуальные материалы) и кончая компьютерно-сетевыми технологиями (мультиагентные системы). Заметим, что если в первом случае эта триада реализуется полностью на материальной основе, то во втором – на программной, когда даже объект управления является программным продуктом.

Другим важным принципом для указанной консолидации может стать и тот системный подход к реализации названной выше триады, который заключается в отказе при изучении и создании технических систем от декомпозиции их на объект управления и управляющую систему. Перспективность этого принципа для робототехники очевидна и он прогрессивно внедряется, в частности, в ходе распределенной интеллектуализации роботов и их модулей. Этот принцип, основанный на использовании общесистемных критериев, начал применяться в технике давно еще при создании первых статически неустойчивых объектов, например, в электроэнергетике («искусственная устойчивость»), в авиации. В частности, он лежит в основе мехатроники, которая тоже входит в родственные робототехнике научно-технические направления.

В этой связи остановимся на связях робототехники и мехатроники. Формально они объединены в научное направление «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» и в учебное направление «Мехатроника и робототехника».

Вместе с тем мехатронику и робототехнику нельзя сопоставить как самостоятельные научно-технические направления, поскольку они определены по разным квалификационным признакам. Робототехника определена по функциональному назначению, а мехатроника по физическому составу. Однако, действительно, мехатроника и робототехника имеют много общего и довольно тесно взаимосвязаны. Многие компоненты средств робототехники – приводные и сенсорные можно отнести к мехатронным. В свою очередь мехатронные

устройства в наиболее развитом виде реализуют как и все робототехнические системы замкнутую на внешнюю среду триаду «сенсорика-процессоры-активаторы». Из этого следует, что мехатроника, действительно, должна иметь много общего с робототехникой в принципах построения и методах проектирования. Сюда прежде всего относятся лежащий в основе построения средств робототехники модульный принцип построения и упомянутый выше системный подход к проектированию.

Мехатроника как новое научно-техническое направление возникла в результате органического слияния электромеханики и микроэлектроники в виде прежде всего автоматических технических объектов и систем.

Аналогичным образом в свое время возникла электромеханика в результате интеграции механики и электротехники. Типичные объекты электромеханики – электрическая машина, реле и т.п. динамические объекты не могут быть созданы путем сотрудничества механиков и электротехников. Для этого необходимы принципиально новые синтетические специалисты – электромеханики. И технические требования, соответственно, критерии оптимизации для таких объектов не могут быть разбиты на механические и электротехнические.

Главным обоснованием мехатроники, как самостоятельного научно-технического направления, должно являться аналогичное наличие именно таких объектов нового типа, которые требуют системного подхода и критериев, охватывающих образующие ее науки – механику и выросшую из электротехники электронику. В этой связи в соответствии с общей тенденцией развития техники одним из основных направлений развития мехатроники в ближайшие годы станет микротехника на основе развития микроэлектроники в трехмерные структуры с подвижными частями. Именно в микротехнике электромеханика превратилась в микроэлектромеханику, т.е., по существу, в мехатронику. Из микротехники уже сегодня можно назвать целый ряд истинно мехатронных объектов. К ним относятся некоторые типы гироскопов, аксельрометров и других микромеханических сенсорных систем, микроэлектромашин, микротурбины и т.п. изделия микротехники.

Наряду с такого типа изделиями мехатроники ее объектами, очевидно, могут быть и близкие им по физической природе и принципу действия устройства, которые допускают декомпозицию при проектировании и, поэтому, строго говоря, не являются мехатронными в указанном выше смысле, однако именно специалисты по мехатронике могут их наиболее качественно создавать. Таким образом, с точки зрения предмета мехатроники можно говорить о ее объектах в указанном выше узком и в широком смысле.

Аналогичное положение существует в робототехнике. Ее объектами, как было показано выше, наряду с роботами являются различные транспортные машины, манипуляторы и другие компоненты роботов, применяемые как самостоятельные изделия.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Основные этапы развития движений в живой природе.

В табл.П.1 приведены основные этапы эволюции движения, начиная с первых возникших на Земле живых организмов и кончая человеком [17]. Около 1 млрд. лет тому назад случайное соединение молекул в Мировом океане дало начало жизни — живую, т.е. размножающуюся клетку. Примерно через 200 млн. лет после этого появились первые многоклеточные, у которых со временем начался эволюционный процесс специализации клеток. Из наружных клеток, развивших способность реагировать на внешние раздражения (механические, химические, температурные и др.), возникли сенсорные клетки — рецепторы. Внутренние клетки, развив способность сокращаться, превратились в мышечные. В результате возникли первые еще беспорядочные рефлекторные движения прежде всего как реакция на внешние воздействия. Необходимая для этого связь между рецепторными и мышечными клетками была сперва реализована химическим путем (с помощью специальных веществ — медиаторов), а затем с помощью электрических сигналов. Последнее позволило повысить быстродействие, хотя в начале эти сигналы тоже были ненаправленными, диффузно распространявшимися по всему телу. Затем постепенно оформились определенные пути для этих сигналов и появились соответствующие специальные нервные клетки.

Следующим принципиальным этапом эволюции было развитие специализации частей тела животных. Появились продолговатые животные, один конец тела которых, где помещался рот, постепенно обогащаясь рецепторами, стал главным, т.е. головой. Развитие чувствительности этих рецепторов привело к появлению дистанционных рецепторов — телерецепторов (обонятельных — из вкусовых, слуховых — из механических, зрительных — из температурных). Такая дистанционная чувствительность в определенных направлениях дала толчок к организации локомоций, т.е. к целенаправленному передвижению всего тела. В связи с этим потребовалась координация частей тела, в результате чего появился такой центр управления, как головной мозг, задачами которого стали сбор информации от рецепторов, обработка ее и на этой основе выработка сигналов управления мышцами, т.е. движением тела, как реакция на зарегистрированные внешние раздражения.

Следующий этапный момент в развитии движения животных — появление поперечнополосатой мышцы, которая в сотни и тысячи раз мощнее и динамичнее ранее возникшей гладкой мышцы. С появлением такого мощного двигателя потребовался жесткий скелет (до этого все живые существа были мягкотелыми). Эволюция пошла здесь двумя путями:

- 1) наружный скелет в виде панциря, состоящий из отдельных пластинок, соединенных внутри мышцами, у членистоногих;
- 2) скелет из костей внутри, а соединяющие их мышцы снаружи, у хордовых (позвоночных).

## Этапы развития движений в живой природе.

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
Зарождение живой клетки в океане.	Одноклеточные	1 млрд.
Специализация клеток у многоклеточных с возникновением рецепторных, мышечных, а затем и нейронных клеток, осуществляющих связь между клетками, которая привела к возникновению рефлекторности.	Губки	800 млн.
Формирование головы со ртом и развитие на ней телерецепторов, ориентированных на внешнюю среду и, соответственно, появление возможности целенаправленного движения всего тела в сторону определенных объектов внешней среды, т.е. локомоций.	Черви	
Головной мозг как центр координированного управления движением всех частей тела.	Высшие моллюски (осьминоги, каракатицы и др.)	500 млн.
Поперечнополосатая мышца и скелет, сперва наружный.	Членистоногие (ракообразные и др.)	
Внутренний скелет — основа дальнейшего совершенствования двигательных способностей.	Рыбы и далее все другие хордовые (позвоночные)	
Развитие сенсорной коррекции движений как нового уровня управления движением в функции от текущей информации о внешней среде и соответствующее совершенствование головного мозга.		
Конечности, возникшие из парных плавников рыб при переходе от водного к водно-наземному образу жизни.	Земноводные	

## Продолжение таблицы П.1.

Новое появившееся качество	У кого возникло	Сколько лет тому назад
<p>Экстрапирамидная двигательная система — иерархическая система управления движением, включающая как древние нижние уровни сегментарного управления туловищем, так и новые уровни управления конечностями, развившиеся в головном мозгу и совершенствующиеся у пресмыкающихся, а затем птиц. У последних эта иерархическая система рефлекторного управления достигла наибольшего совершенства. Развился мозжечок, обеспечивающий координацию движений, равновесие.</p>	Земноводные, пресмыкающиеся, птицы	
<p>Пирамидный путь управления мышцами от коры головного мозга, возникший параллельно с иерархическим экстрапирамидным путем. Этот качественный скачок произошел на фоне эволюционно усложняющегося экстрапирамидного пути в результате развития коры головного мозга (зачатки которой появились еще у пресмыкающихся) и явился базой для освоения новых более совершенных (по сложности, быстродействию, точности) движений и развития самообучения как основы уже не инстинктивного, а разумного поведения.</p>	Млекопитающие	100 млн.
<p>Рука для манипуляций в процессе трудовой деятельности человека с использованием орудий труда. В результате развилась современная кора полушарий головного мозга.</p> <p>Робот выступает как качественно новый тип орудия труда, который, взаимодействуя с другими машинами и другими орудиями труда, реализует вместо человека трудовой процесс принципиально способен лучше человека осуществлять необходимые для этого манипуляции и иметь интеллект, включая подобно человеку способность к самообучению и самоусовершенствованию.</p>	<p>Человек</p> <p>Специализация людей в трудовом процессе</p> <p>Робот</p>	<p>3 млн.</p> <p>2 млн.</p> <p>30-35</p>

Второй путь был сложнее первого, так как помимо собственно движения тела требовалось еще поддержание позы и устойчивость тела. Однако именно этот путь обеспечил возможность реализовать значительно более сложные, быстрые и точные движения. В связи с этим, если первый путь завершился на насекомых, то второй привел к млекопитающим и человеку.

Появление поперечнополосатой мышцы и жесткого скелета стимулировало дальнейшее совершенствование управления движением путем развития оперативной сенсорной коррекции движений по текущей информации о внешней среде, т.е. адаптивного управления. Это в свою очередь вызвало дальнейшее совершенствование головного мозга.

Следующий важный для нашей темы этап эволюции — появление у земноводных конечностей, которые образовались из парных плавников при переходе к водно-наземному образу жизни. Это привело к дальнейшему усложнению и совершенствованию системы управления. К возникшей ранее системе управления локомоциями, построенной по сегментарному принципу, когда каждая часть туловища управляется соответствующей частью спинного мозга, добавилась система управления конечностями посредством импульсов от головного мозга (который управляет при этом и локомоциями в целом). Постепенно развилась сложная иерархическая система управления — экстрапирамидная двигательная система, в которой образовывались новые уровни управления, решающие все более сложные задачи и действующие через ранее возникшие уровни, вплоть до сегментарного управления через спинной мозг. Пределом совершенства такого управления являются птицы, которые обладают по сравнению с предшествующими им пресмыкающимися исключительной динамичностью и координацией движения. Однако это управление в целом является рефлекторным, т.е. инстинктивным. Соответственно, и кора полушарий головного мозга у них осталась в зачаточном состоянии.

Следующим качественным этапом явилось возникновение прямого, так называемого пирамидного, пути управления мышцами от коры головного мозга параллельно многоуровневому и поэтому довольно медленно действующему экстрапирамидному пути. Этот канал управления движением взял на себя осуществление новых более сложных, быстрых и точных движений и привел в свою очередь к интенсивному развитию коры головного мозга. В результате возник качественно новый тип управления – интеллектуальное управление, основанное на обучении на основании наблюдений, собственного опыта и выработки соответствующих новых алгоритмов поведения. Это достижение принадлежит млекопитающим.

Ниже приведены основные типы локомоции, возникшие в живом мире в процессе эволюции.

## 1. В воде.

### 1.1. Передвижение по дну:

- путем подтягивания конца туловища к голове, затем перемещение вперед головы с выпрямлением туловища и т.д.;
- с помощью щупалец, присасывающихся к поверхности и затем сокращающихся по длине.

## 1.2. Реактивное движение:

- путем быстрого захлопывания створок раковин;
- путем забора и резкого выброса воды (каракатицы, гребешки).

## 1.3. Гребки хвостом у рака.

1.4. Плавание рыб за счет волнообразных изгибаний тела и движений хвоста с использованием парных плавников как рулей глубины.

1.5. Плавание на поверхности воды (животные).

1.6. Передвижение по поверхности воды (коллемболы и некоторые другие насекомые).

## 2. В воздухе.

2.1. Махание крыльями (птицы)

2.2. Планирование.

2.3. Парашютирование.

## 3. Под землей.

3.1. Путем раздвижения (уплотнения) земли (червь расширяет всунутую в землю голову).

3.2. Путем выбрасывания земли назад (кроты, мыши и др.).

## 4. По земле.

4.1. Ползание (змеи и др.).

4.2. Лазанье.

4.3. Хождение (с использованием разного количества ног).

4.4. Прыганье (на двух и четырех конечностях).

4.5. Бег симметричный, несимметричный, прыжковый, галоп и т.д. (с использованием разного количества конечностей).

Последним этапом эволюции движения в живом мире явилось развитие манипуляционных способностей. Самым совершенным универсальным средством для этого стали руки человека. С этого момента в дальнейшем развитии движений на первое место выступает уже не биологическое совершенствование отдельного человека, а значительно более интенсивное во времени его общественное развитие, включая разделение труда, с доведением до все большего совершенства профессиональных навыков, и развитие орудий труда.

И, наконец, завершением этого процесса явилось создание заменяющих человека роботов как универсальных устройств для манипуляционных и локомоционных действий в общественном производстве и других сферах человеческой деятельности. Дальнейшее совершенствование манипуляционных движений будет происходить, следовательно, уже в результате развития робототехники с преодолением, соответственно, тех принципиальных ограничений, которые присущи человеку и живой природе в целом.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегральные роботы. Сборник статей под ред. Е. Поздняка, М., Мир, 1973, вып.1, 1975, вып.2.
2. Е.И. Юревич. ЦНИИ РТК. История создания и развития. Санкт-Петербург, СПбГТУ, 1999.
3. Планетоходы. Под ред. А.Л. Кемурджиана. М., Машиностроение. 1993.
4. М. Вукобратович. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. М., Наука, 1961.
5. С.В. Першин. Основы гидробионики. Л-д, Судостроение, 1982.
6. А.Н. Радченко. Ассоциативная память. Нейронные сети. Оптимизация нейропроцессоров. Санкт-Петербург. Наука, 1998.
7. Манипуляционные системы роботов. Под ред. А.И. Корендясева. М., Машиностроение, 1989.
8. А.И. Корендясев, С.В. Левин. Принципы построения захватных устройств с рекуперацией энергии. Проблемы машиностроения и автоматизации, 1990, № 3.
9. И.М. Макаров, В.М. Лохин, М.П. Романов. Система управления транспортным роботом с рекуперацией энергии. Проблемы машиностроения и моделирования в сложных технологических системах. М. МИРЭА. 1995.
10. С.Г. Аграновский, А.Б. Кизилов, Б.И. Морозов. Искусственная мышца. Сборник научных работ “Вычислительные, измерительные и управляющие системы”. Труды ЛПИ № 423. Ленинград, ЛПИ, 1988.
11. Shahinpoor M. Artificial Muscles. ERI Press, Albuquerque, New Mexico, Pending Publications. 1997.
12. Динамика управления роботами. Под ред. Е.И. Юревича. М., Наука. 1984.
13. П.Д. Крутько. Управление исполнительными системами роботов. М., Наука, 1991.
14. Е.С. Пятницкий. Принципы декомпозиции в управлении механическими и электромеханическими системами. Сборник трудов “Синтез систем управления манипуляционными роботами на принципе декомпозиции”. М., ИПУ, 1987.
15. Е.И. Юревич. Перспективы развития модульного принципа построения средств робототехники. Стандарты и качество. М., № 5, 1989.
16. Н.М. Довбня, А.Н. Кондратьев, Е.И. Юревич. Роботизированные технологические комплексы В ГПС. Ленинград, Машиностроение, ленинградское отделение. 1990.
17. Н.А. Бернштейн. О построении движений. М., Машиностроение, 1975.