

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

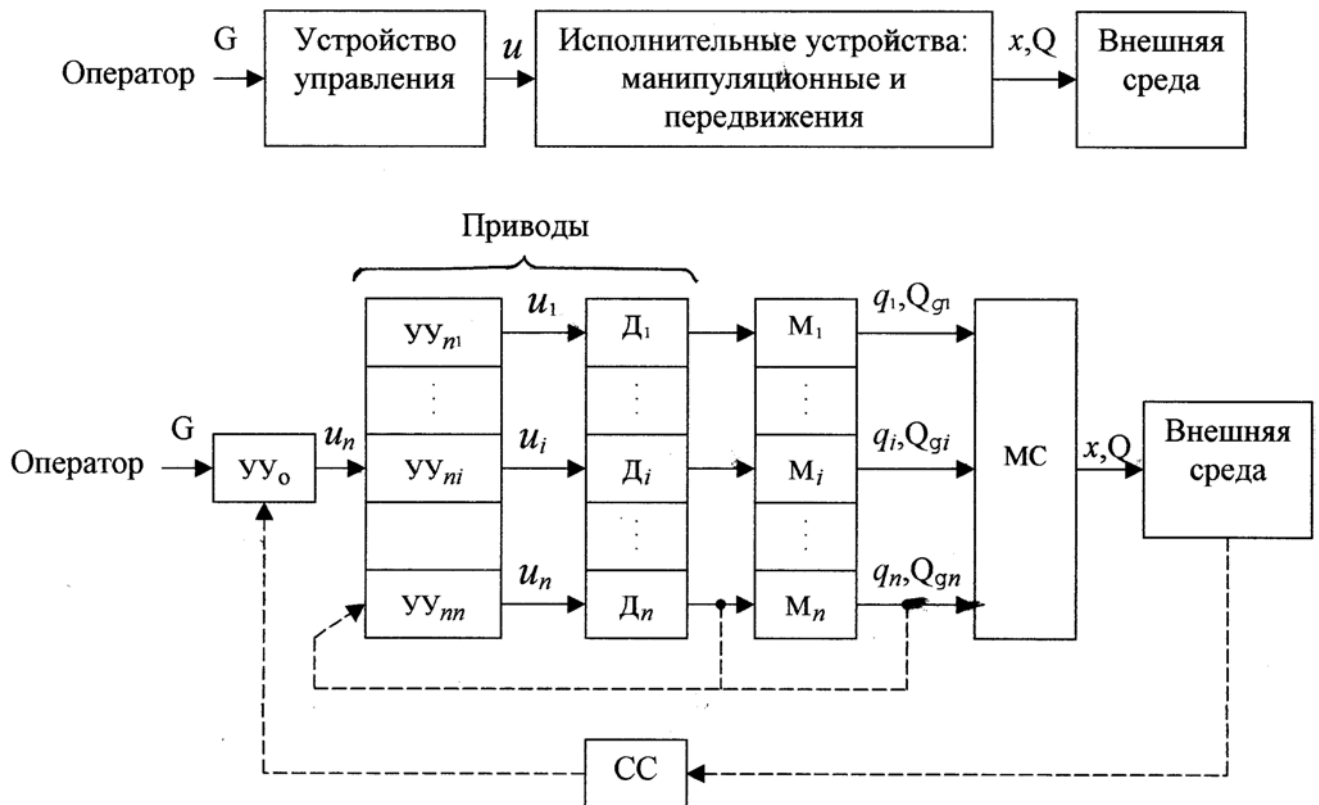


Рис. 6.1. Функциональная схема робота: УУ_о — общее (центральное) устройство управления, УУ_{*n*} — УУ привода, Д — двигатель, М — механизм, МС — механические системы — манипуляционная и передвижения, СС — сенсорные системы

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.

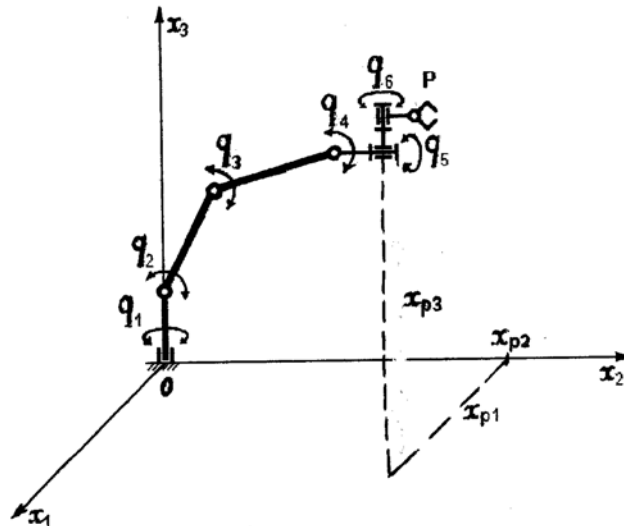


Рис. 6.2. Кинематическая схема трехзвенного шарнирного манипулятора: P — рабочий орган, q_1, q_2, q_3 — переносные степени подвижности, q_4, q_5, q_6 — ориентирующие степени подвижности

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:

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

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 $Q_\theta(Q_{\theta1}, Q_{\theta2}, \dots, Q_{\theta n})$ — 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 φ , 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

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

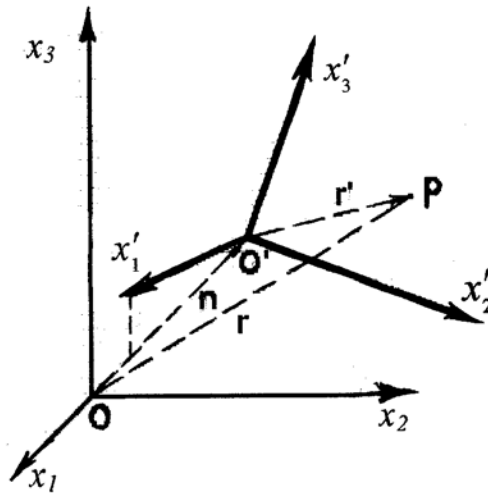


Рис.6.3. Схема пересчета координат

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

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

i_s, i_k - орты двух рассматриваемых систем координат.

Для матрицы A справедливы равенства

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

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

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

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

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

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 $q=A_m(Q_g, Q_{\theta})$, которое связывает относительные координаты звеньев q_i с действующими на систему движущими Q_{gi} и противодействующими $Q_{\theta i}$ 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 Π – соответственно кинетическая и потенциальная энергии звена; $Q_i=Q_{gi} - Q_{\theta i}$ – 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 $\ddot{q}_j$ характеризуют инерцию звена); второй – скоростные силы (центробежные, кориолисовы, 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:

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

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 ; ℓ – длина стрелы; J_φ – момент инерции массы колонны m_z , приведенный к оси φ ; J'_φ – момент инерции частей колонны, участвующих только в угловом движении, приведенный к оси φ ; 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 Π 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_φ – момент, действующий по координате φ ; 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_φ описывает кореолисову силу, вектор b_r – центробежную, а вектор c – силу тяжести.

Уравнение (6.10) можно представить системой следующих трех уравнений:

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

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

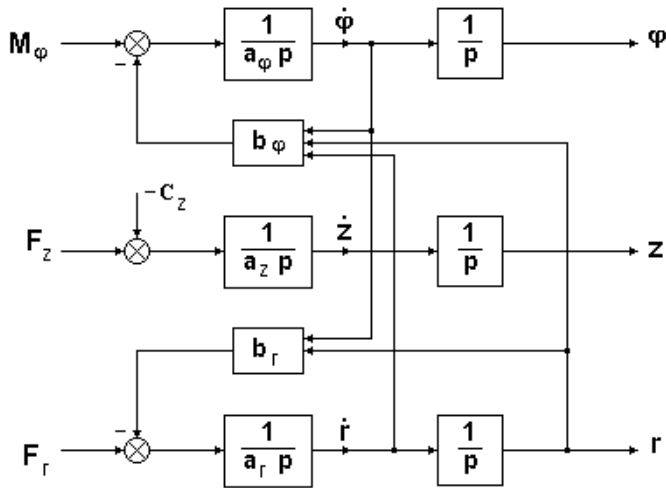


Рис. 6.4. Структурная схема механической системы трехзвенного манипулятора

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 $a'_\phi \ddot{\phi}_0; b'_\phi, b''_\phi, b'''_\phi; b'_r, b''_r$ – коэффициенты разложения в ряд Тейлора функций a_ϕ , b_ϕ 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 :

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

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:

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

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

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):

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

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:

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

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:

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

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:

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

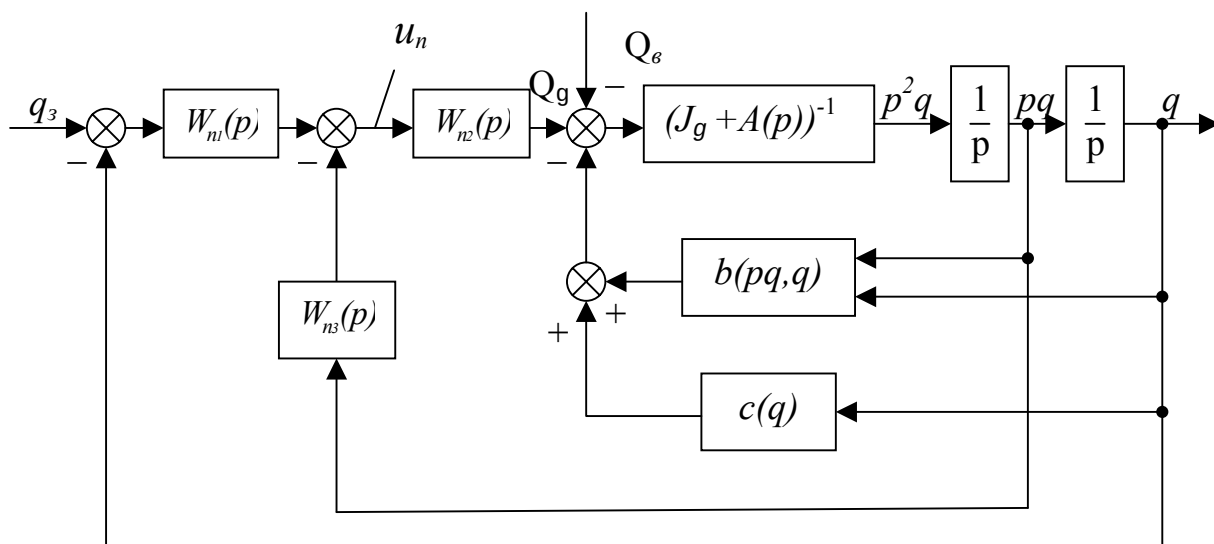


Рис. 6.5. Структурная схема манипулятора с приводами

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 $u_{n3}(t)$.

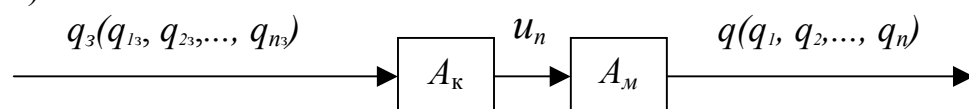
Описанный учет динамического запаздывания и других особенностей динамики роботов с непрерывным управлением возможен только при программном управлении. В остальных случаях для качественной отработки входных

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.

а)



б)

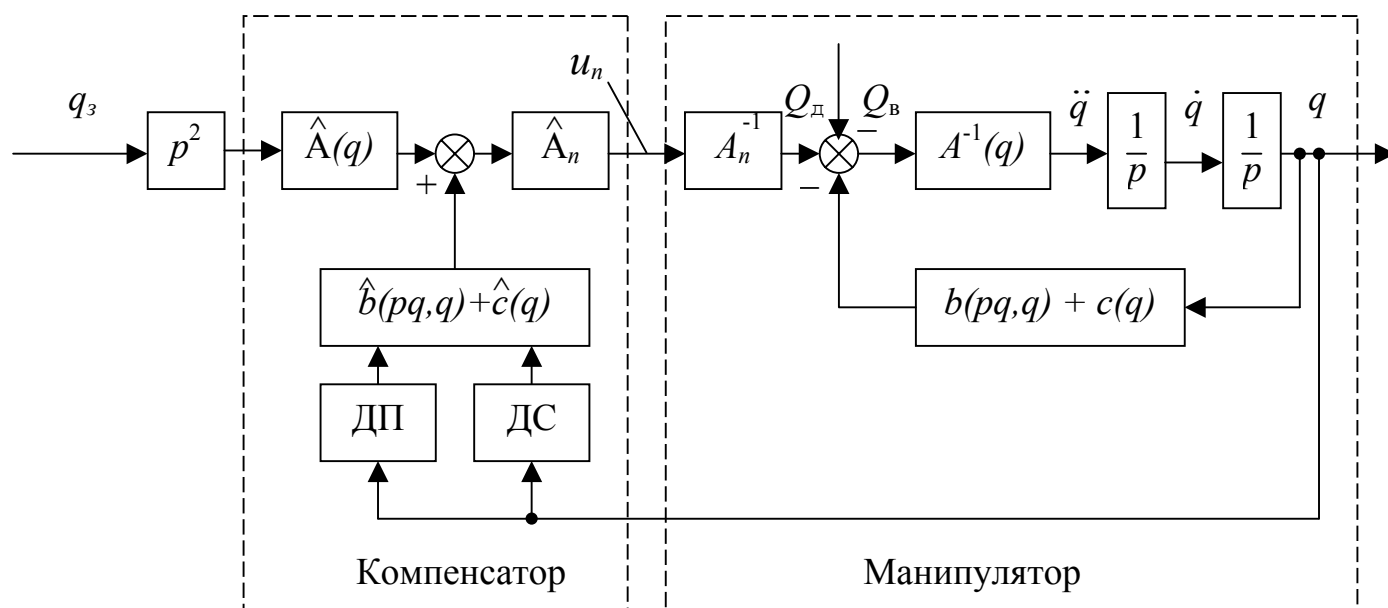


Рис.6.6. Схема манипулятора с компенсатором

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 $q=q_z$. 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

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

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

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

На рис.6.6,б значок $\wedge$ 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 $\Delta q = q - q_z$, 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].

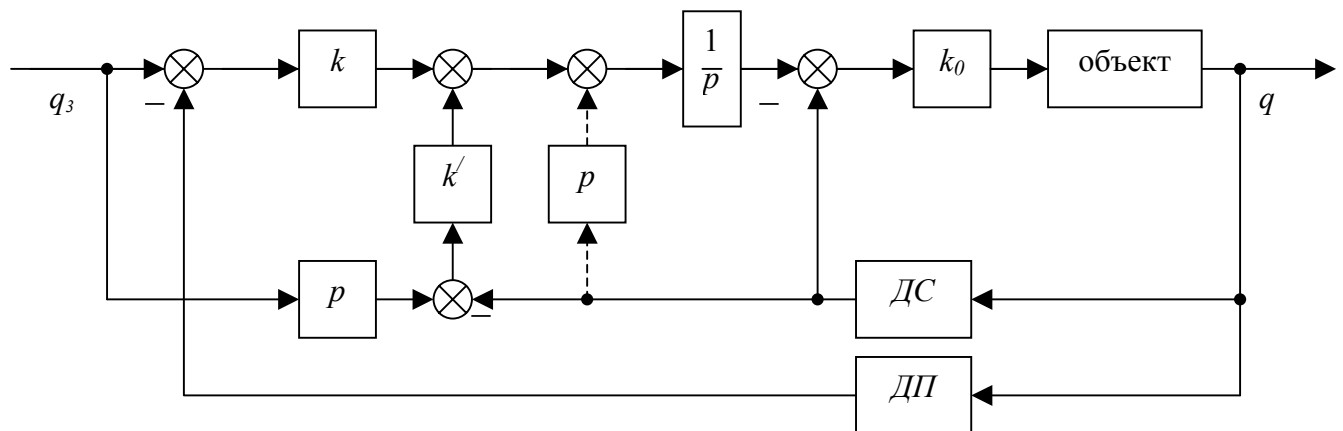


Рис. 6.7. Схема системы управления с обратной связью по ускорению.

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.).

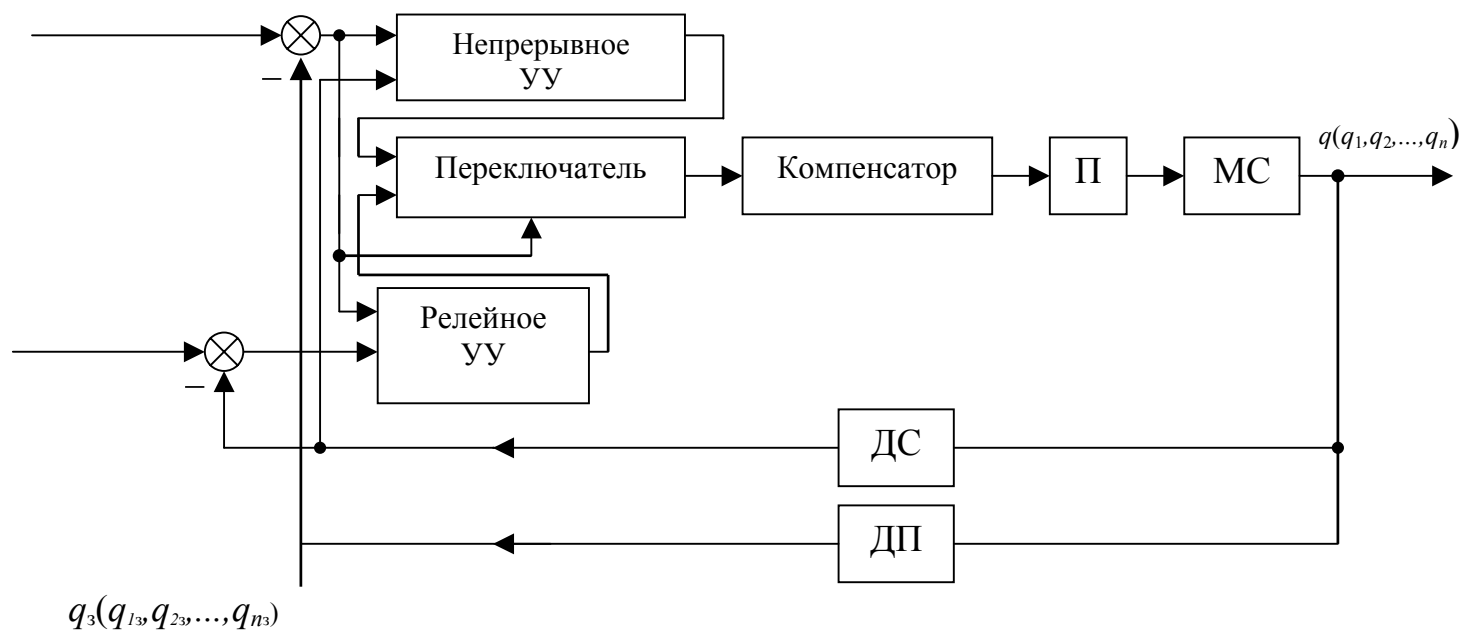
Важным свойством рассмотренных робастных систем управления применительно к приводам манипуляторов является то, что они, парируя все

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

Общим для обеих рассмотренных робастных систем управления является так же 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 подпрограмм. 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 Δ 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.).

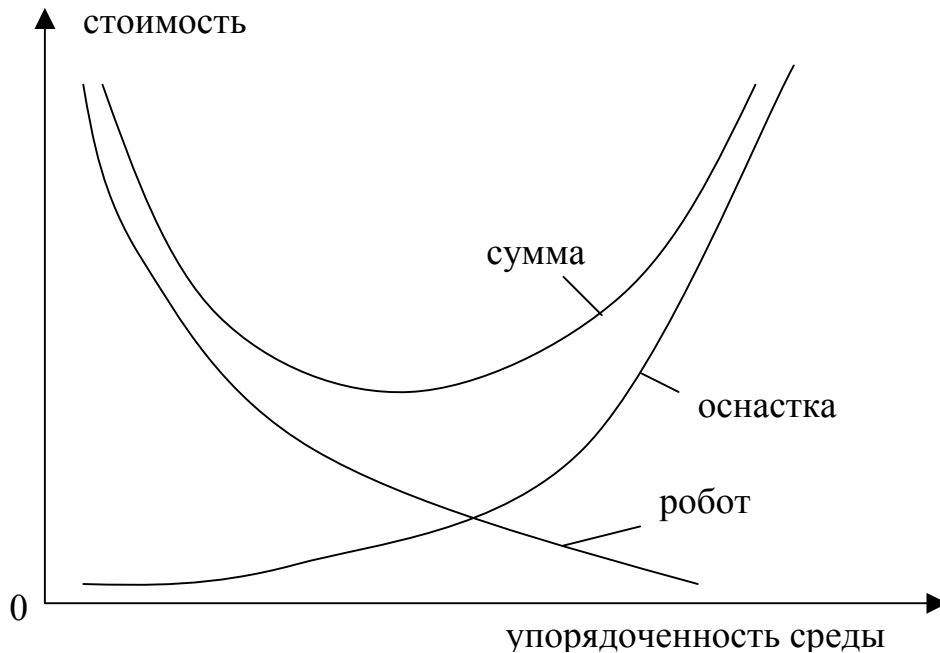


Рис.7.1. Стоимость робота и околороботной оснастки.

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 отличие 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.

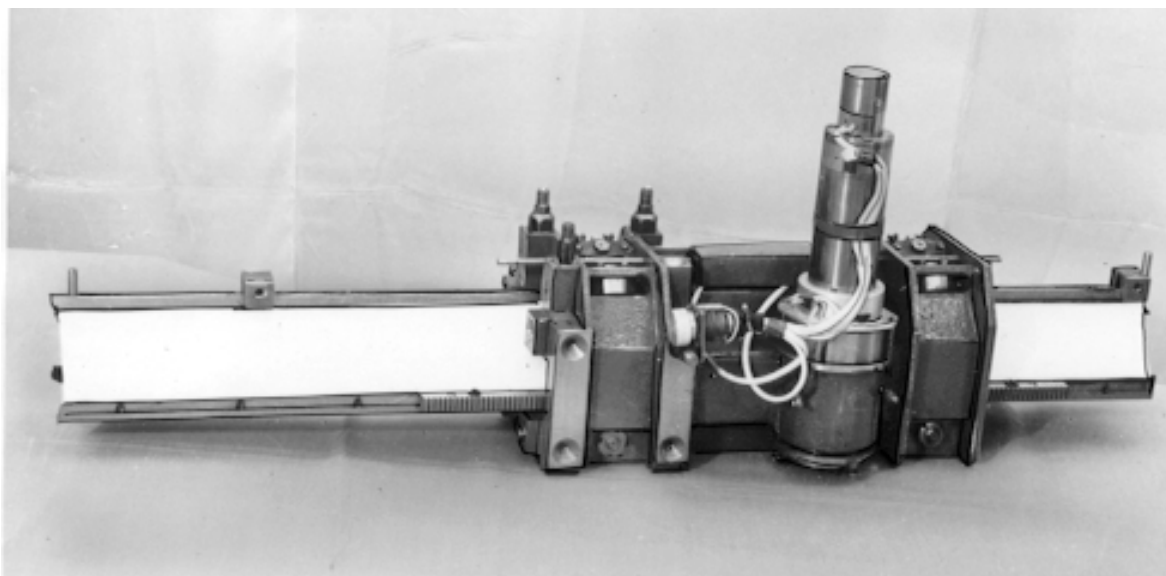


Рис.7.3. Электромеханический поступательный модуль-привод типа ПРЭМ.

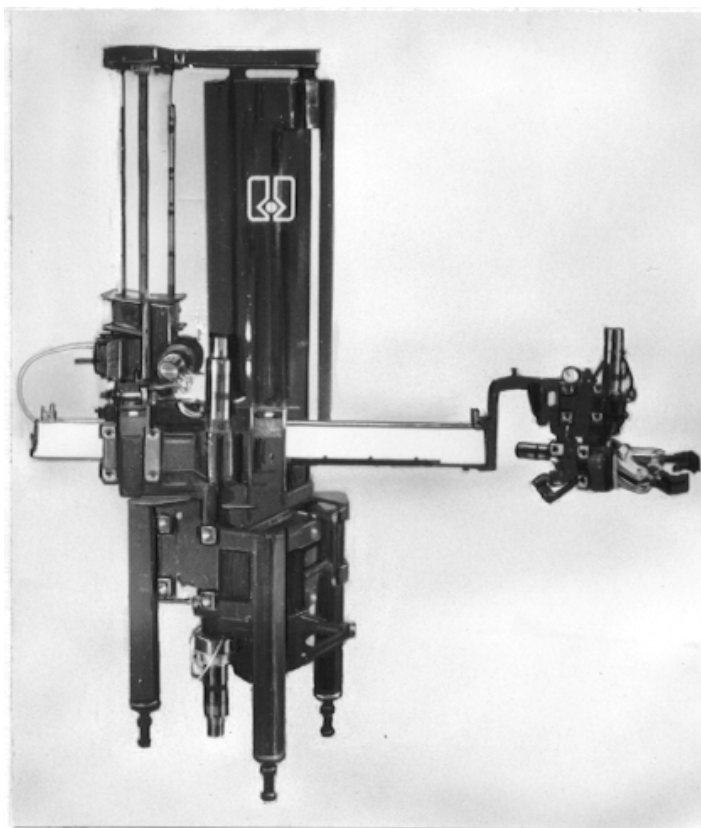


Рис.7.4. Модульный электромеханический промышленный робот ПРЭМ-5.

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), «Сиакс» (Франция), «Оливетти» (Италия), «АСЕА» и «Электролукс» (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 применения 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 отличие 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.

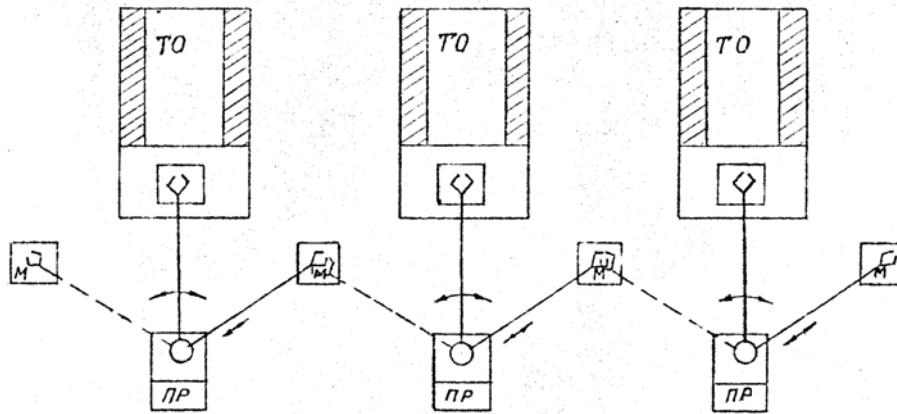


Рис.8.1. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой:

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

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

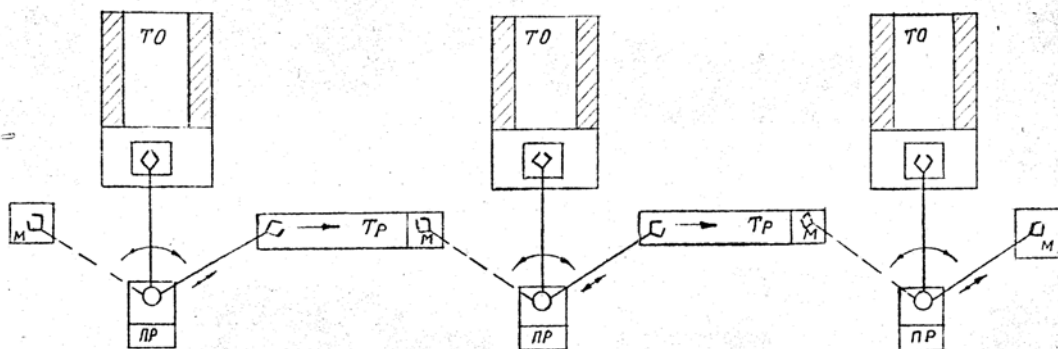


Рис.8.2. Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с транспортным устройством:

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 металлообрабатывающих станка расположенных вокруг него. Другая

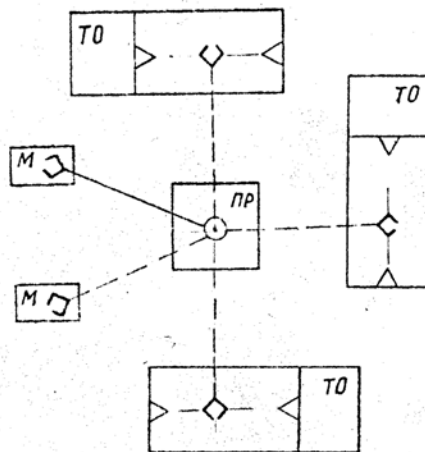


Рис.8.3. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с круговой компоновкой.

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

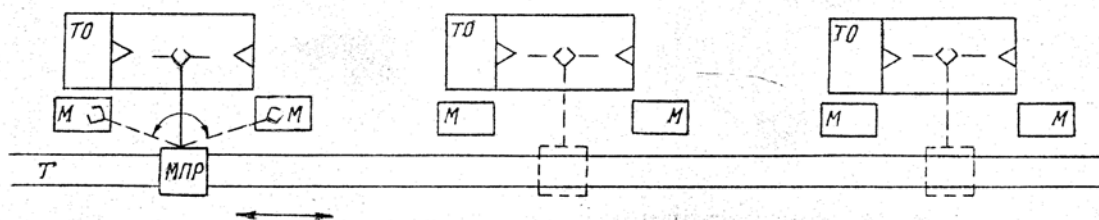


Рис.8.4. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с линейной компоновкой, обслуживаемого мобильным промышленным роботом:

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.

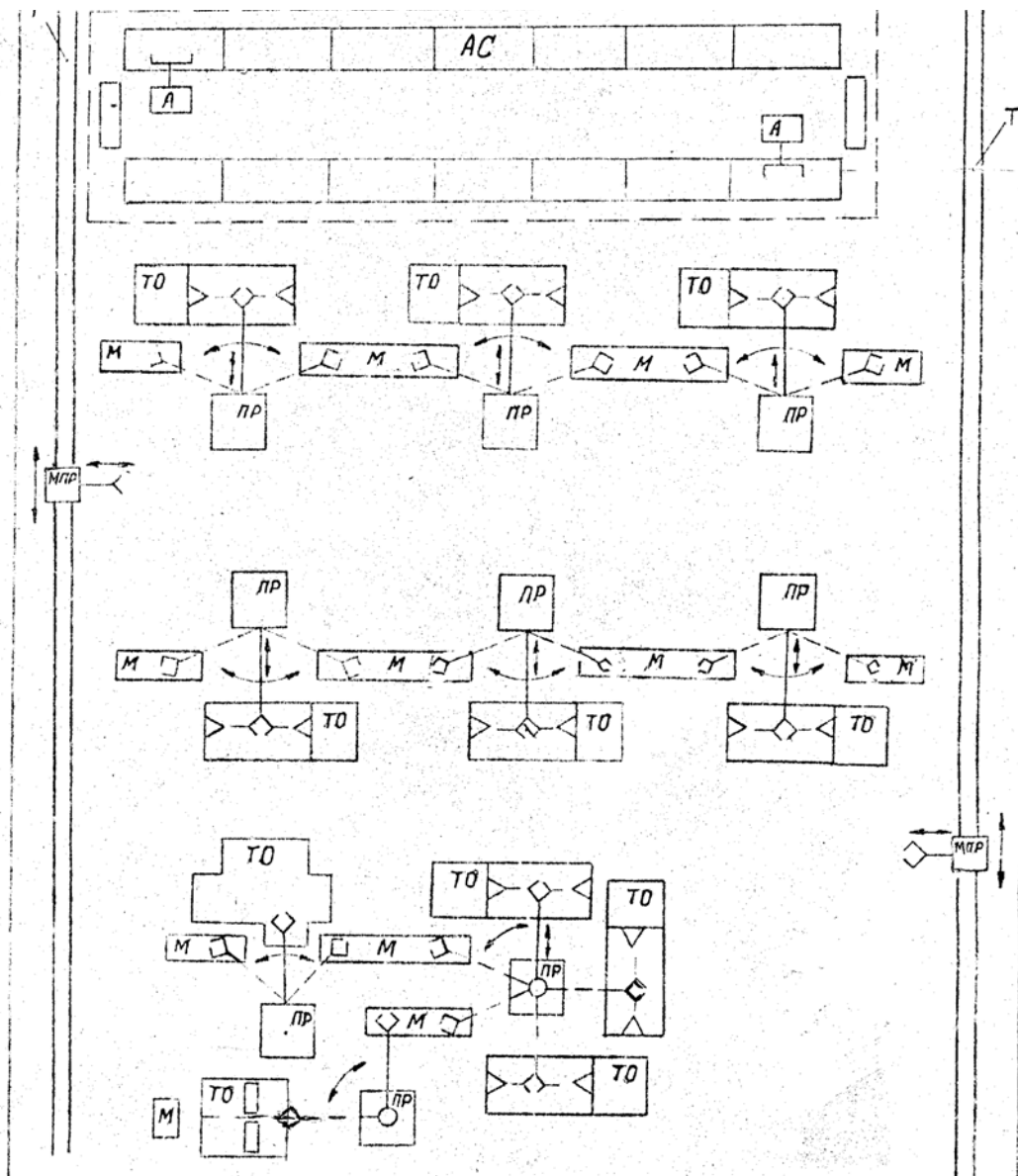


Рис.8.5. Схема роботизированного технологического участка механической обработки с компоновкой по площади:

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

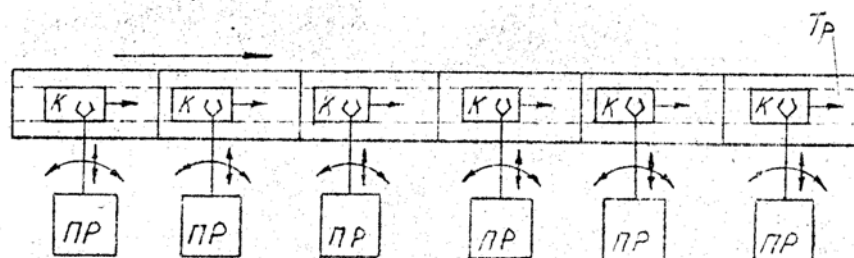


Рис.8.6. Схема сборочной робототехнической линии с линейной компоновкой:

Тр – шаговый транспортер; К – кассеты.

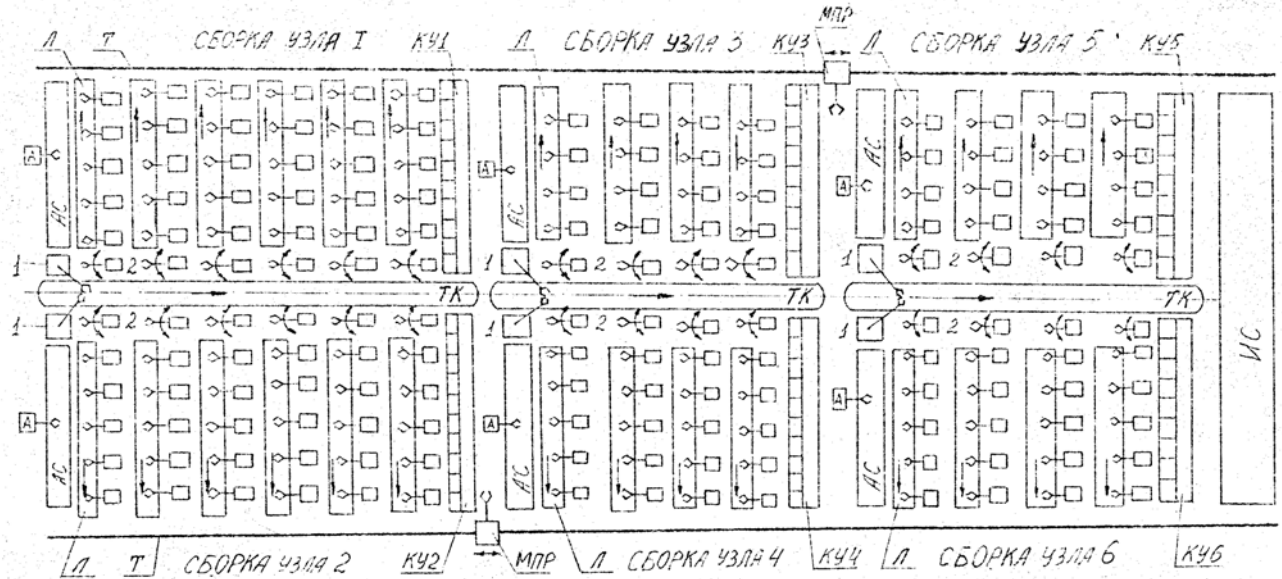


Рис.8.7. Схема сборочного цеха:

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.

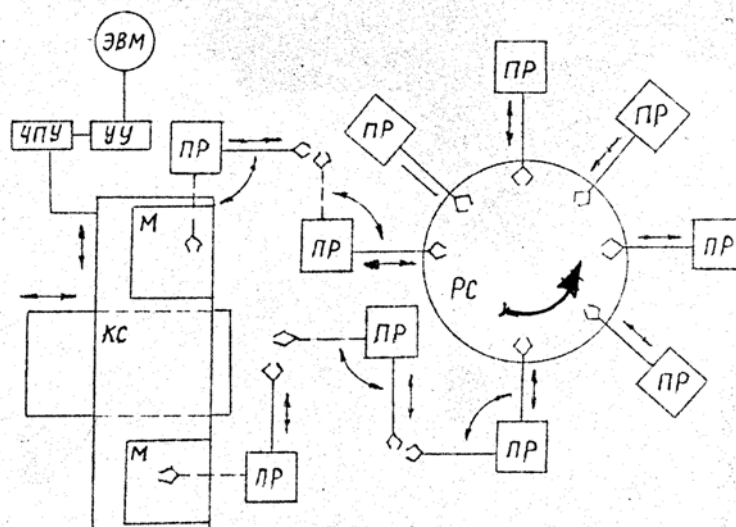


Рис.8.8. Схема робототехнического сборочного участка с круговой компоновкой:

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

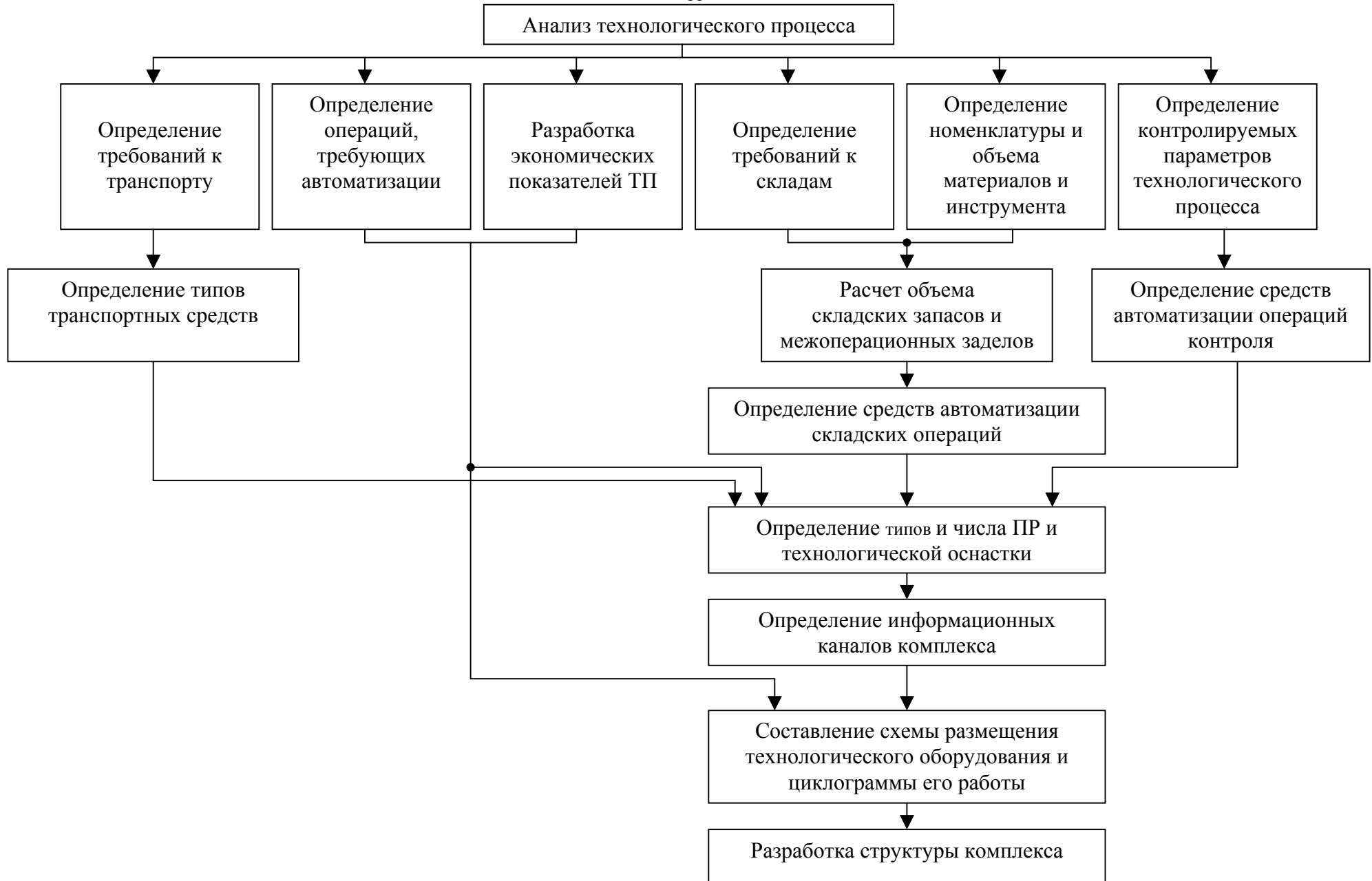


Рис. 8.9. Состав технологического этапа проектирования технологического комплекса.

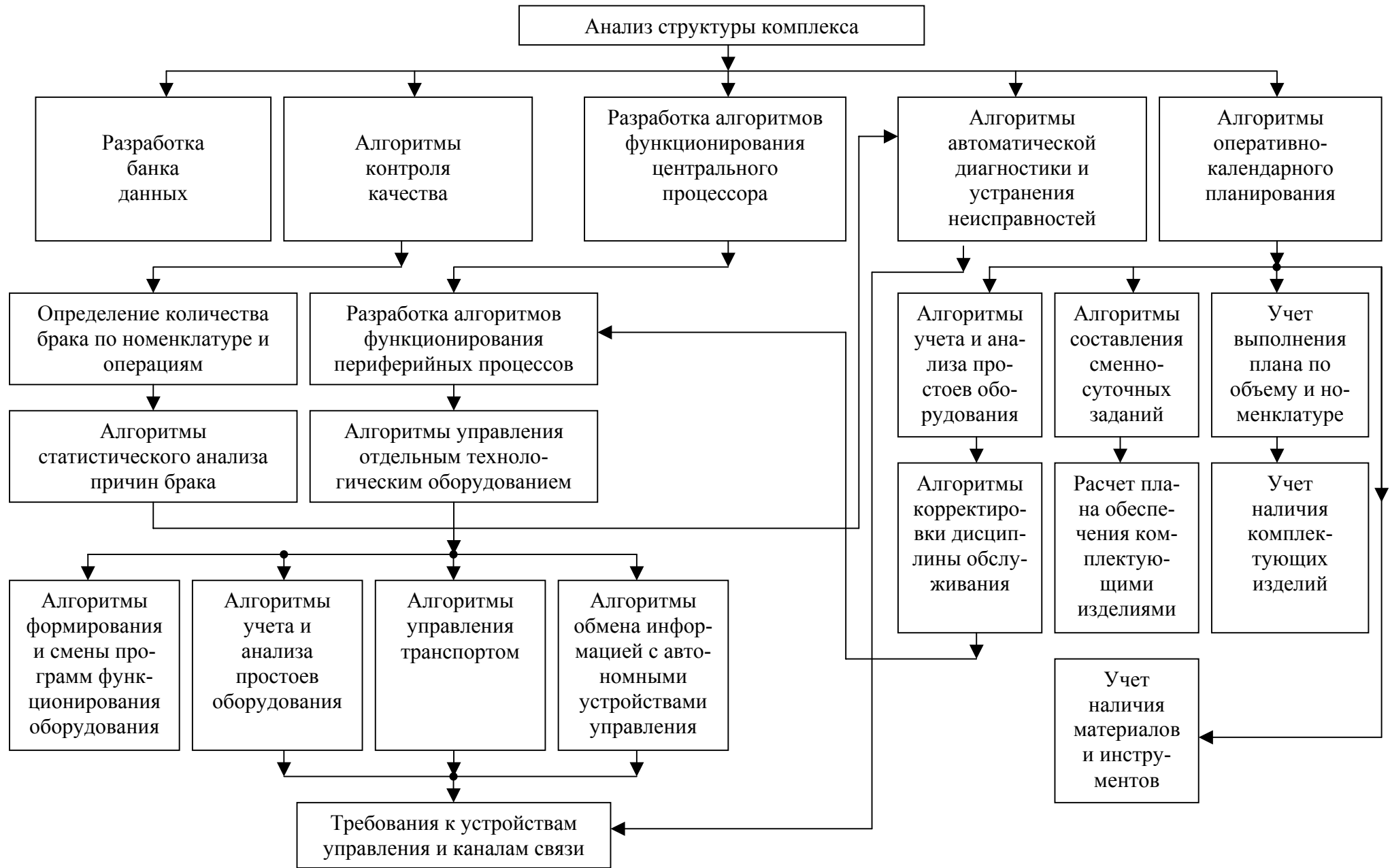


Рис.8.10. Состав алгоритмического этапа проектирования технологического комплекса.

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

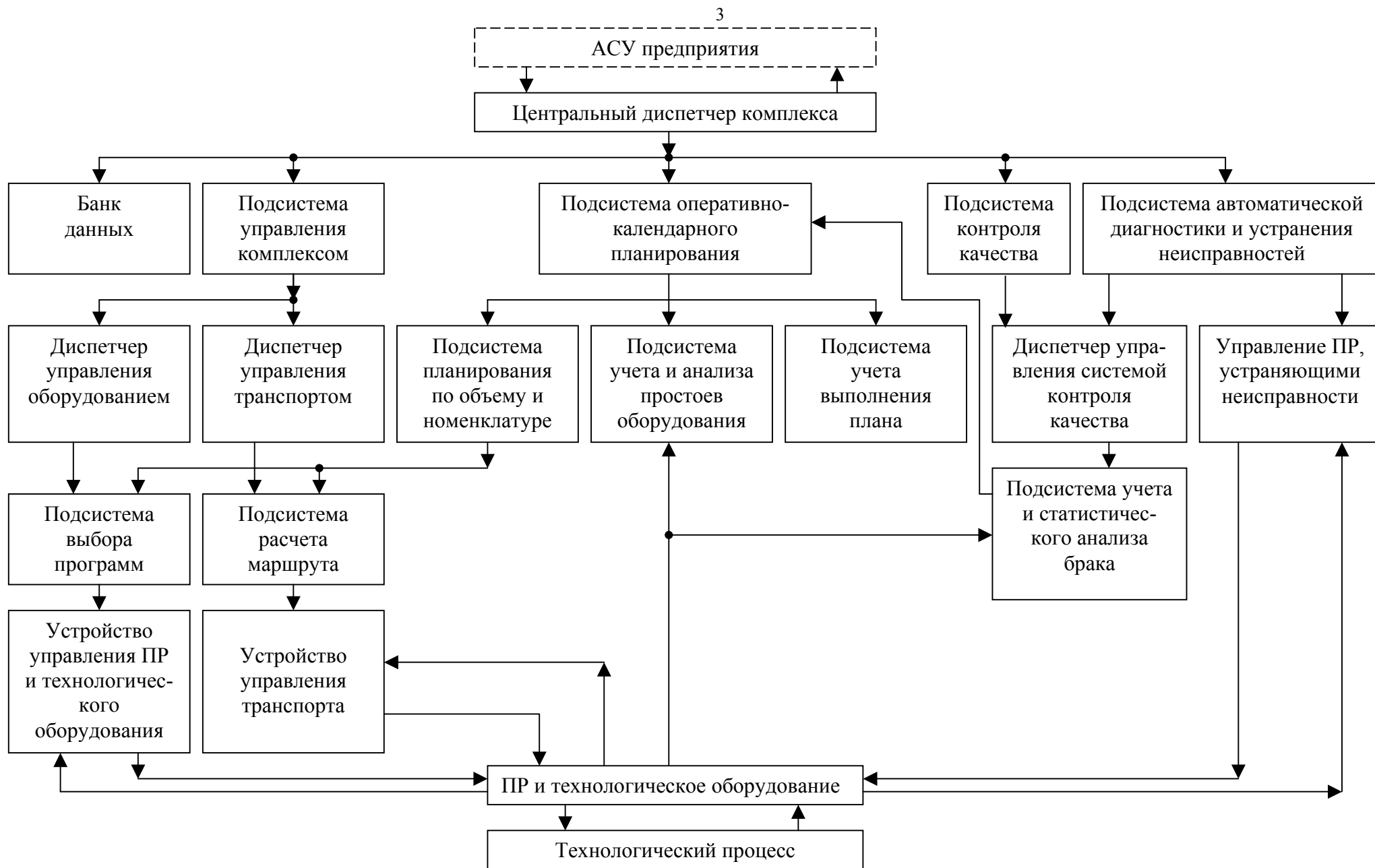


Рис.8.11. Схема управления технологическим комплексом.

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 широкое 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;

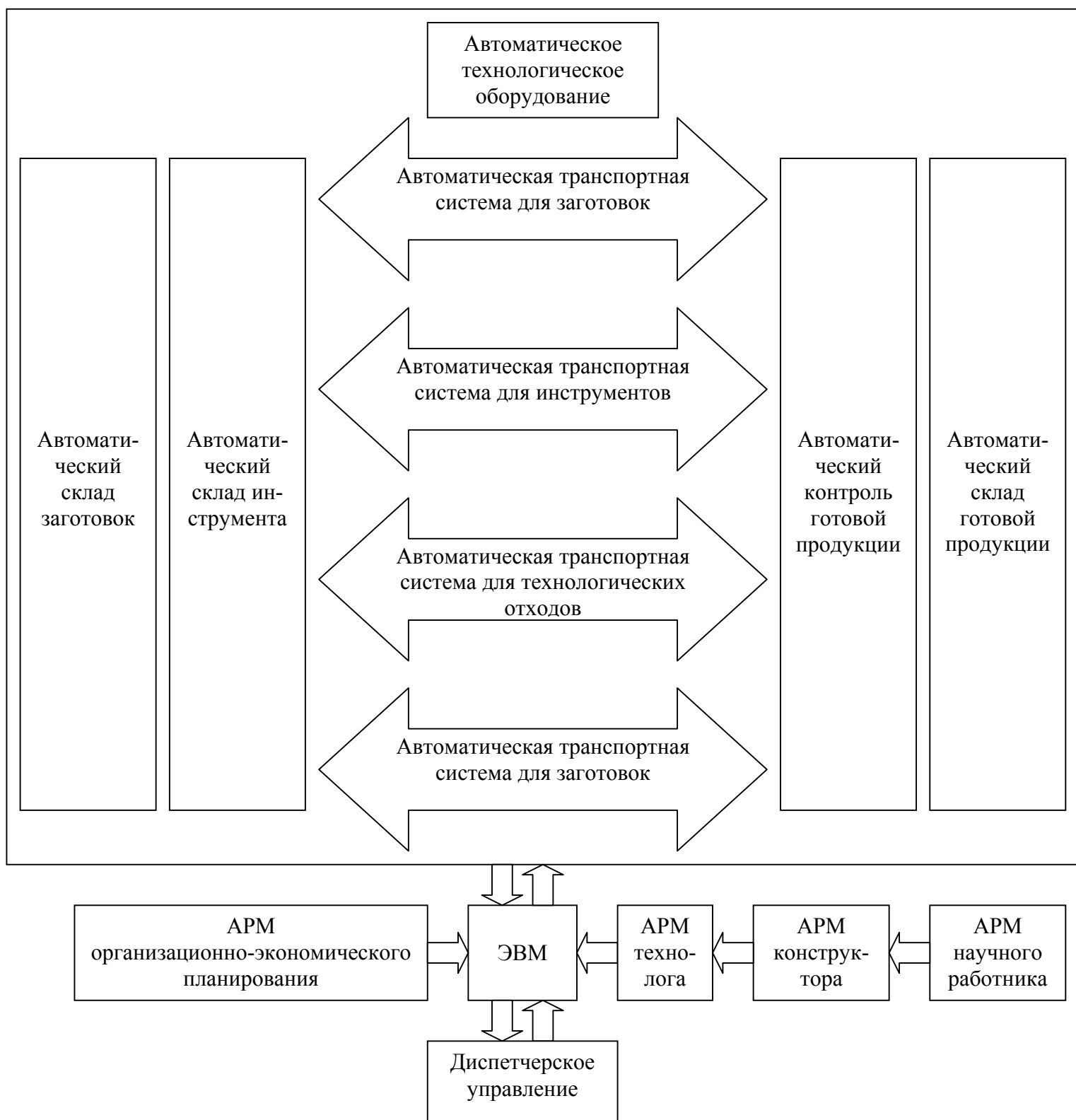


Рис.8.12. Состав гибкого автоматизированного производства.

- 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).

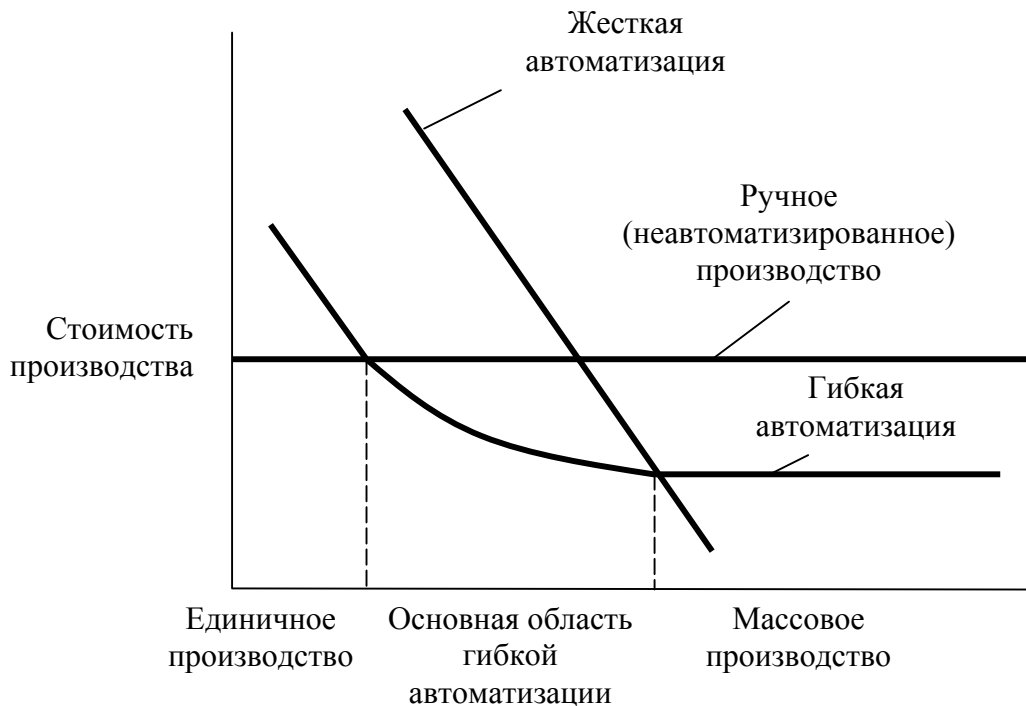


Рис.8.13. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства.

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

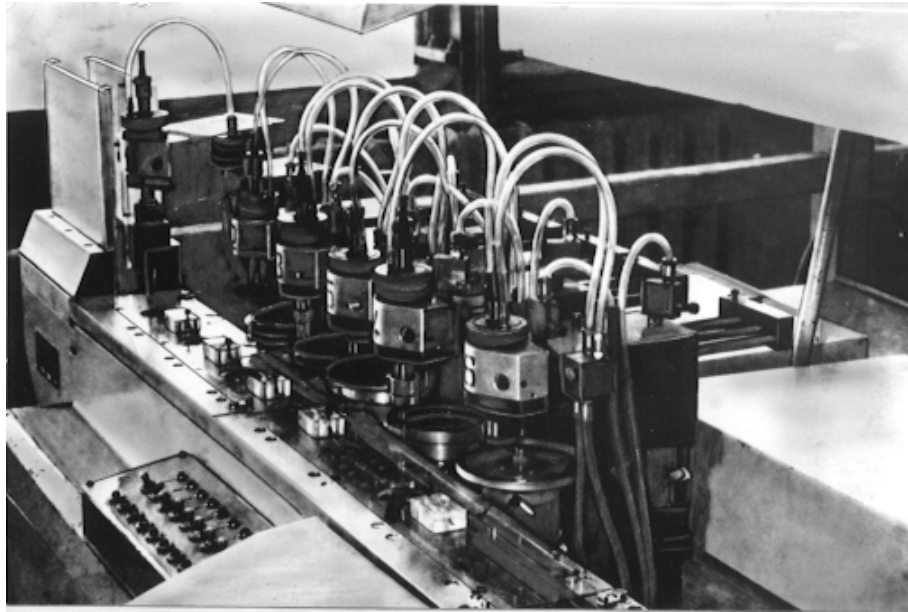


Рис.9.1. Робототехнический сборочный комплекс массового производства наручных часов.

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 различные 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

управления комплексом, блоки синхронизации и связи с ЭВМ. Для выполнения собственно операций сборки применены универсальные пневматические ПР типа

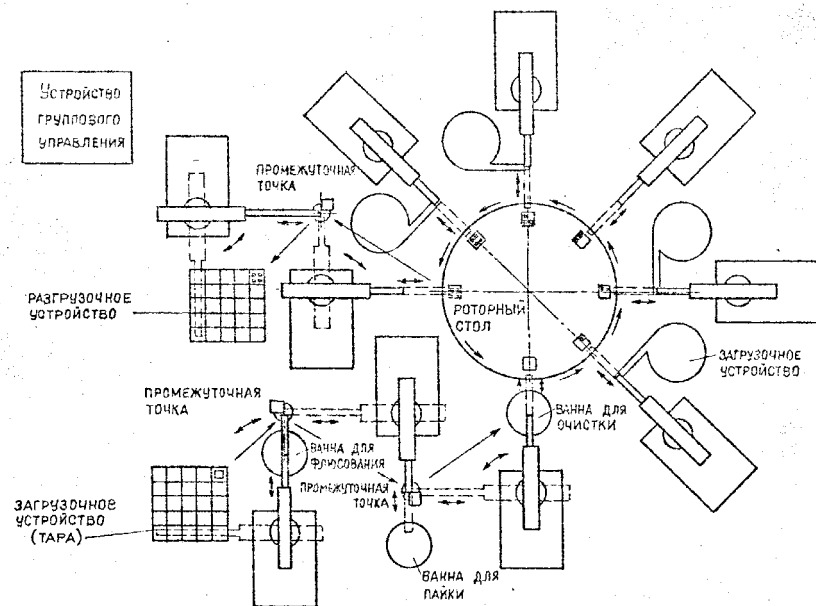


Рис.9.2. Робототехнический комплекс для сборки контурных катушек радиоприемников:

1 – загрузочное устройство (тара); 2 – промежуточная точка; 3 – разгрузочное устройство; 4 – устройство группового управления; 5 – роторный стол; 6 – загрузочное устройство; 7 – ванна для очистки; 8 – ванна для пайки; 9 – ванна для флюсования.

МПС-9С (см.рис.4.3). Комплекс предназначен для сборки контурных катушек бытового радиоприемника, где ПР выполняют следующие операции:

- выборку каркасов катушек из кассеты;
- флюсование выводов обмоток;
- пайку выводов;
- промывку выводов после мойки в специальном растворе;
- установку каркасов на ложементы поворотного стола;
- надевание кольца;
- навинчивание буксы;
- закручивание сердечника;
- надевание экрана;
- маркировку катушки;
- установку в кассеты готовой контурной катушки.

Смена кассет на рабочих позициях автоматизирована с помощью разгрузочно-загрузочных устройств. Сборочные элементы подаются на рабочие позиции с помощью вибробункеров, где происходят их ориентация, накопление и поштучная

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 (α , β , γ) ориентированы вертикально, а четыре (А, В, С, D) – горизонтально. Захватное устройство очувствленного 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.

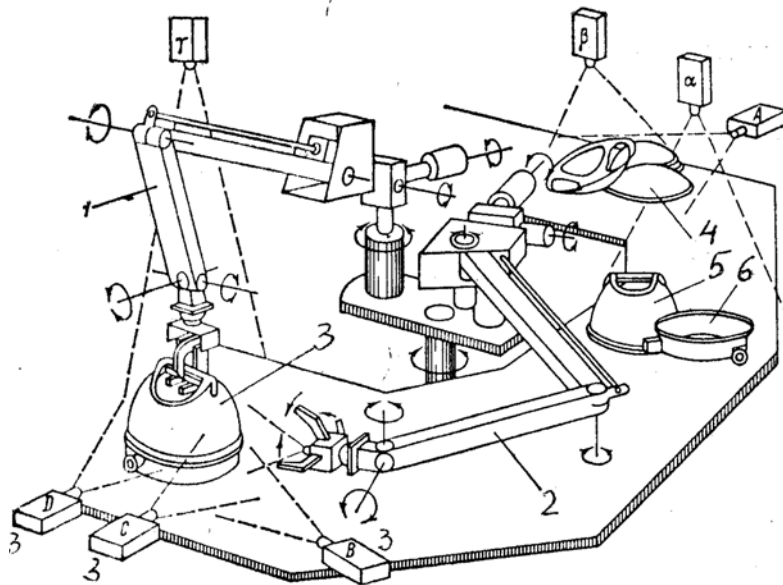


Рис.9.5. Робототехнический комплекс для сборки пылесосов.

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

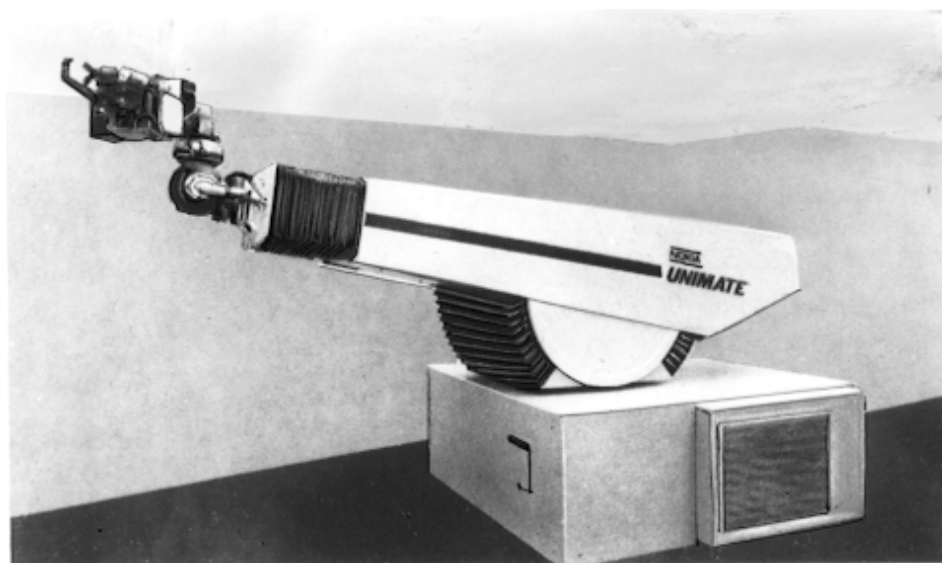


Рис.9.6. Сварочный робот Юнимейт

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