

Е.И. Юревич

**УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Санкт-Петербург 2000

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РОБОТОВ

- § 1.1. Функциональная схема системы управления роботов
- § 1.2. Математическое описание манипуляторов
 - 1.2.1. Математическое описание механической системы манипуляторов
 - 1.2.2. Взаимное влияние степеней подвижности манипуляторов
 - 1.2.3. Учет упругости звеньев манипулятора
 - 1.2.4. Математическое описание приводов
 - 1.2.5. Математическое описание манипулятора с приводами
- § 1.3. Математическое описание систем передвижения роботов
- § 1.4. Математическое описание человека-оператора
- § 1.5. Моделирование роботов на ЭВМ
- § 1.6. Классификация способов управления роботами

ГЛАВА 2. СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНОГО ЦИКЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

- § 2.1. Особенности цикловых систем управления роботов
- § 2.2. Цикловое управление отдельным приводом
- § 2.3. Совместное цикловое управление приводами манипуляторов
- § 2.4. Резонансные цикловые приводы и манипуляторы

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНОГО ПОЗИЦИОННОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

- § 3.1. Особенности позиционного управления
- § 3.2. Дискретное позиционное управление отдельным приводом
- § 3.3. Совместное дискретное позиционное управление приводами манипулятора
- § 3.4. Общий порядок исследования динамики и синтеза алгоритмов дискретно позиционного программного управления

ГЛАВА 4. СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО (КОНТУРНОГО) ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

- § 4.1. Особенности непрерывного управления роботами
- § 4.2. Непрерывное управление отдельным приводами
 - 4.2.1. Непрерывное управление приводом с последовательной коррекцией
 - 4.2.2. Непрерывное управление приводом с коррекцией с помощью обратных связей
- § 4.3. Робастные системы непрерывного управления приводами
 - 4.3.1. Системы непрерывного управления с обратной связью по ускорению
 - 4.3.2. Релейные системы управления
- § 4.4. Совместное непрерывное (контурное) управление приводами манипулятора
 - 4.4.1. Системы совместного контурного управления с последовательной коррекцией (с компенсатором)
 - 4.4.2. Системы совместного управления с динамической коррекцией с помощью обратных связей
- § 4.5. Системы управления манипулятора совместно по положению и силе (моменту)

ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

- § 5.1 Функциональная схема системы сенсорного (о чувствленного) управления роботов
- § 5.2 Системы адаптивного управления
 - 5.2.1 Адаптивное управление отдельным приводом
 - 5.2.2. Адаптивное управление манипулятором
- § 5.3 Системы интеллектуального управления
- § 5.4 Особенности управления средствами передвижения роботов

ГЛАВА 6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ РОБОТОТЕХНИКИ ЧЕЛОВЕКОМ - ОПЕРАТОРОМ

- § 6.1. Классификация систем управления средствами робототехники человеком-оператором
- § 6.2. Системы командного управления
- § 6.3. Системы копирующего управления манипулятора
- § 6.4. Системы управления с задающей рукояткой

§ 6.5. Системы супервизорного и интерактивного управления

§ 6.6. Особенности управления человеком-оператором средствами передвижения

ГЛАВА 7. ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

§ 7.1 Задачи группового управления

§ 7.2. Способы группового управления

ГЛАВА 8. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

§ 8.1. Развитие устройств управления роботов

§ 8.2 Современные устройства управления средствами робототехники

и тенденции их развития

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга является учебным по робототехнике и служит для изучения систем автоматического, автоматизированного и ручного управления роботами и другими средствами робототехники, а также техническими системами и комплексами, содержащими эти средства.

Изложение этих вопросов базируется на теории автоматического управления и прикладной механике. Изучение содержания книги должно быть дополнено практическими занятиями по исследованию систем управления с помощью компьютерного моделирования и лабораторных исследований типовых систем управления конкретных роботов различного назначения.

Пособие полезно и для студентов других специальностей, где требуется знание способов управления техническими системами любого назначения, поскольку роботы являются одним из наиболее сложных и универсальных объектов управления, для которых требуется весь арсенал современных способов и технических средств управления.

Учебное пособие написано по материалам лекций, читаемых автором в СПбГТУ.

§ 1.1. Функциональная схема системы управления роботом

Система управления робота, как и любая система управления, состоит из объекта управления, которым здесь являются исполнительные устройства робота — манипуляционные и передвижения, и устройства управления (рис. 1.1,а). Исполнительные устройства в свою очередь состоят из механической системы и приводов (см. рис. 1.1,б). Механическая система манипулятора заканчивается рабочим органом в виде рабочего инструмента или захватного устройства, с помощью которого осуществляется целенаправленное воздействие робота на объекты внешней среды. Устройства передвижения также могут иметь рабочие органы — бульдозерный нож, пылесос, лебедку, подвижную грузовую платформу и т.п.

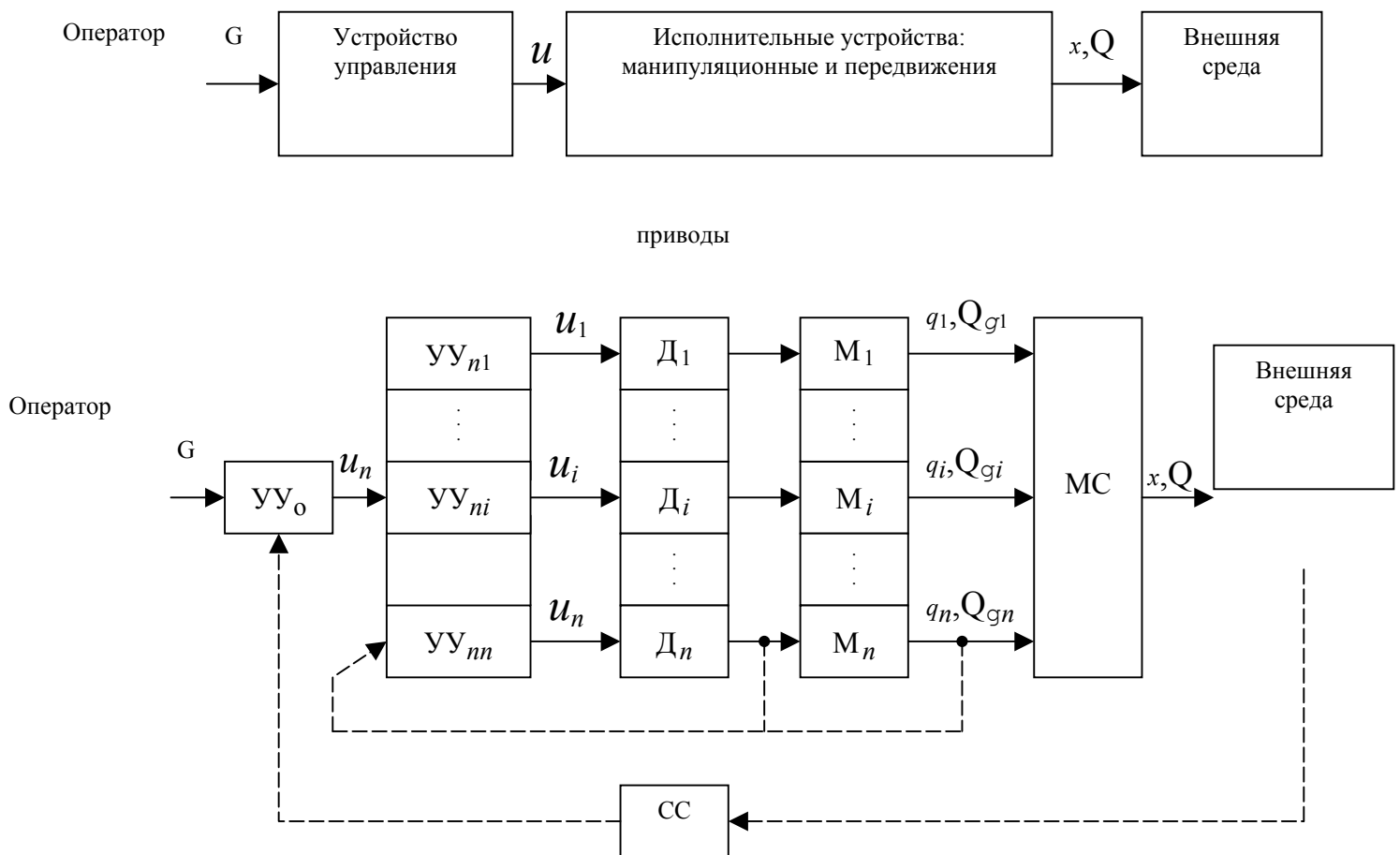


Рис.1.1. Функциональная схема робота:

УУ_о — общее (центральное) устройство управления, УУ_н — УУ привода, Д — двигатель, М — механизм, МС — механические системы — манипуляционная и передвижения, СС — сенсорные системы.

§ 1.2. Математическое описание манипуляторов

1.2.1. Математическое описание механической системы манипуляторов

Рассмотрим математическое описание роботов с важнейшей их части — манипуляционных исполнительных устройств, т. е. манипуляторов. На рис. 1.2 и 1.3 показаны типовые кинематические схемы манипуляторов с минимальным числом степеней подвижности, равным трем. Реальные манипуляторы для обеспечения большей маневренности имеют обычно комбинированные системы координат и большее число степеней подвижности. На рис. 1.4–1.8 показано устройство манипуляторов реальных роботов с различными кинематическими схемами.

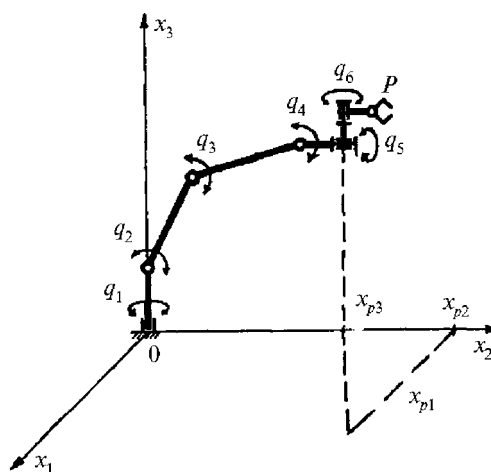


Рис. 1.2. Кинематическая схема трехзвennого шарнирного манипулятора:

P — рабочий орган, q_1, q_2, q_3 — переносные степени подвижности,

q_4, q_5, q_6 .

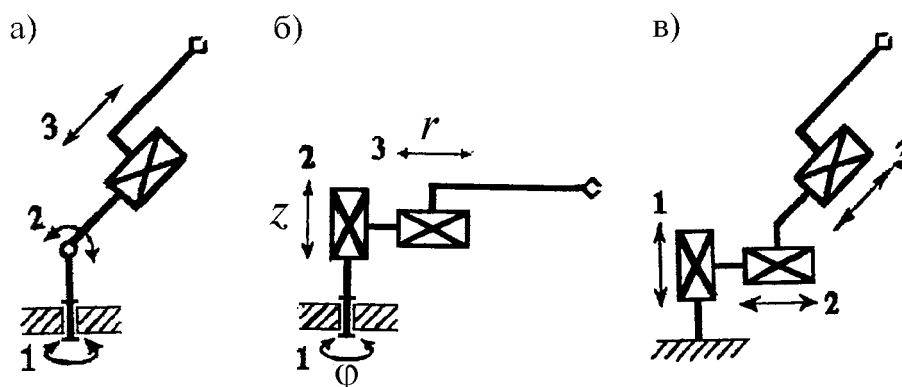


Рис. 1. 3. Кинематическая схема манипуляторов: а — сферическая, б — цилиндрическая, в — прямоугольная

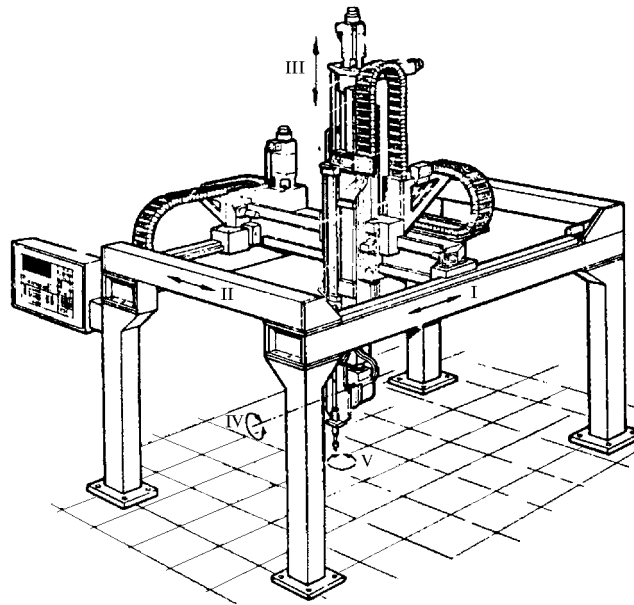


Рис. 1.4. Общий вид промышленного робота GPR с прямоугольной системой координат

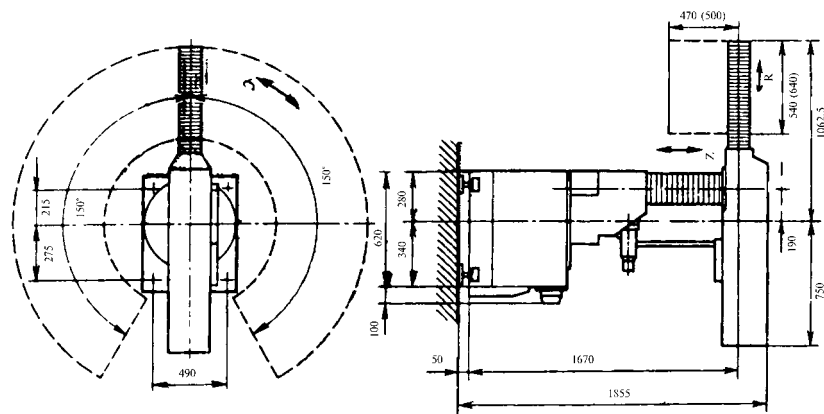


Рис. 1.5. Общий вид промышленного робота Faber C 5000 с цилиндрической системой координат

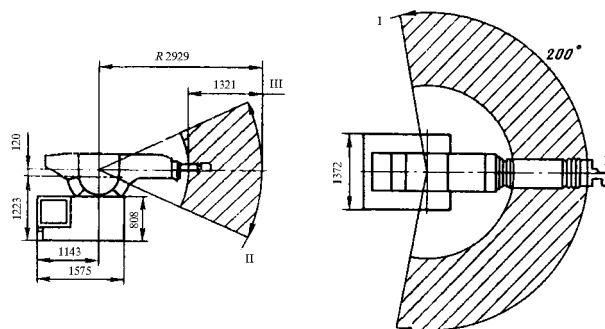


Рис. 1.6. Общий вид промышленного робота Unimate 4000 со сферической системой координат

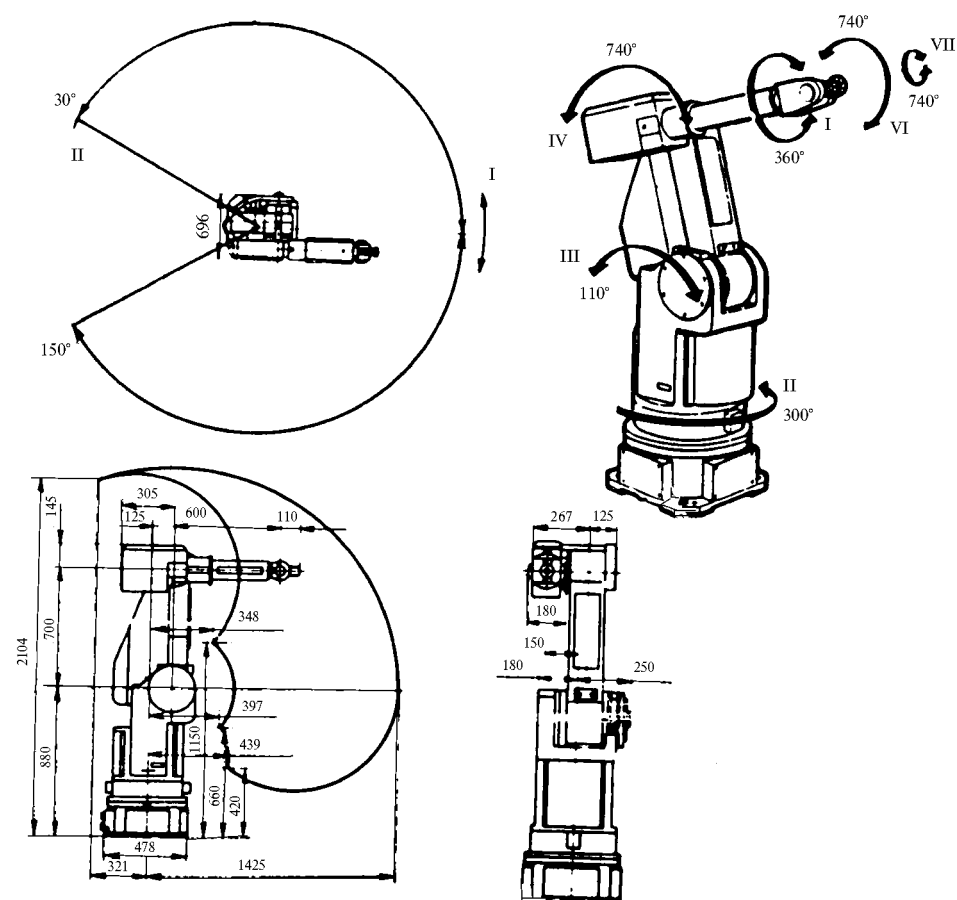


Рис. 1.7. Общий вид промышленного робота S-Model 6000 с манипулятором с угловой системой координат

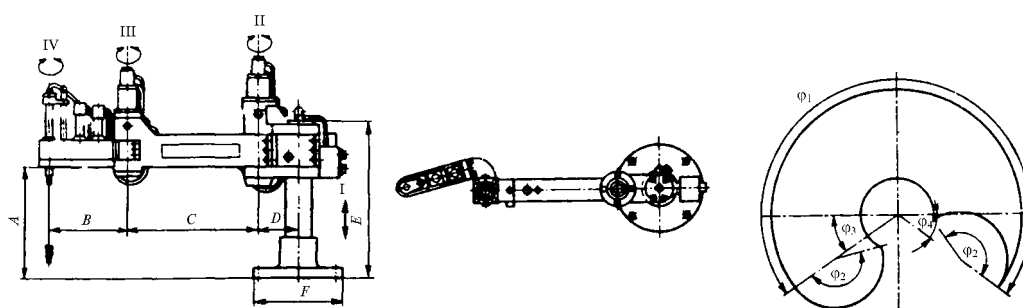


Рис. 1.8. Общий вид промышленного робота SR-1053H с угловой системой координат, работающей в горизонтальной плоскости.

В целом механическая система манипулятора как объект управления характеризуется:

типом и числом переносных и ориентирующих рабочий орган степеней подвижности (переносные могут быть поступательными и вращательными, ориентирующие — вращательные);

типом и размером рабочей зоны, в рамках которой действует рабочий орган манипулятора.

Входные переменные механической системы манипулятора — это усилия Q_g ($Q_{g1}, Q_{g2}, \dots, Q_{gn}$) от двигателей D , действующие по n степеням подвижности, а выходные x — перемещения и ориентация рабочего органа, а также усилие, с которым он воздействует на объекты внешней среды. Наибольшее число степеней подвижности рабочего органа m равно шести — три координаты, определяющие положение его центра в пространстве и три угла ориентации. Кроме координат рабочего органа могут, представлять интерес 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 (см. рис. 1.2), и называются абсолютными (опорными, инерциальными). Относительное положение соседних звеньев манипулятора соответственно определяется относительными (обобщенными) координатами q ($q_1, q_2, \dots, q_n$), где n — число степеней подвижности манипулятора.

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:

$$\left. \begin{array}{l} x = f(q), \\ q = A_m(Q_g, Q_b) \end{array} \right\} (1.1)$$

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 ,

$Q_B (Q_{B1}, Q_{B2}, \dots, Q_{Bn})$ — возмущающие и противодействующие усилия, A_M — оператор механической системы манипулятора. Уравнения для усилий, с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды, будут рассмотрены ниже в конце этого пункта.

Рассмотрим уравнения (1.1) 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 $x_p (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$. 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 же образом, дойдем до основания манипулятора, с которым связана система абсолютных координат x . В результате получим искомое выражение абсолютных координат рабочего органа $x_p (x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{p6})$ через относительные координаты всех звеньев $q (q_1, q_2, \dots, q_n)$.

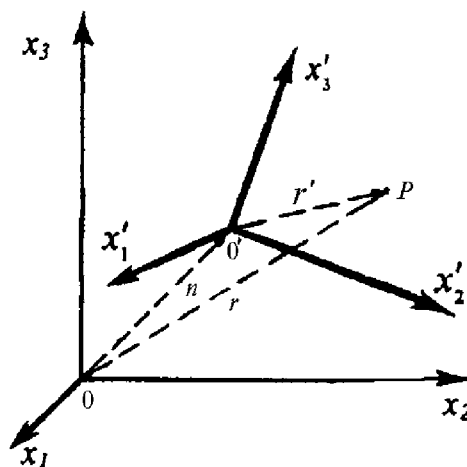


Рис. 1.9

Напомним методику такого пересчета с применением матричного исчисления (рис. 1.9). Пересчет координат точки p из системы (O', x'_1, x'_2, x'_3) в систему (O, x_1, x_2, x_3) описывается векторно-матричным уравнением

$$r = Ar' + n \quad (1.2)$$

или

$$r' = A^{-1}(r - n), \quad (1.3)$$

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

$$|A| = 1; \quad A^{-1} = A^T, \quad (1.4)$$

где индекс T означает операцию транспонирования матрицы.

Если звенья манипулятора имеют одну степень подвижности друг относительно друга, например, поворот на угол φ , то

$$\left. \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ A^{-1} &= \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

Если осуществляется только параллельное смещение при поступательном движении звена, уравнение (1.2) принимает вид

$$r = r' + n. \quad (1.6)$$

Система уравнений (1.2), составленных для всех подвижных звеньев манипулятора, дает искомое описание кинематики.

Иногда для решения рассматриваемой задачи пересчета координат используют так называемые однородные координаты путем введения векторов четвертого порядка

$r(x_1, x_2, x_3, 1)$ и $r'(x'_1, x'_2, x'_3, 1)$, связанных матрицей

$$B = \left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & n_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & n_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & n_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], (1.7)$$

т. е.

$$r = Br'. (1.8)$$

Из (1.7) следует

$$B = \left[\begin{array}{ccc|c} A & n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. (1.9)$$

Соответственно $r' = B^{-1}r$,

$$B^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|c} A & -A'n \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], (1.10)$$

где компоненты вектора $A'n$ есть проекции вектора n на ось системы координат $(0', x'_1, x'_2, x'_3)$. Таким образом, умножив вектор координат r' на матрицу B , получим известное выражение (1.2) для r через A и n . Удобство применения однородных координат состоит в том, что поворот и смещение системы координат осуществляются с помощью одной операции умножения на матрицу B . Соответственно окончательное уравнение пересчета координат рабочего органа в систему абсолютных координат, связанных с основанием манипулятора, согласно уравнению (1.6) будет иметь вид

$$r_1 = \prod_{i=1}^n B_i r_n = Br_n, (1.11)$$

где $B = \prod_{i=1}^n B_i$, а r_1 и r_n — соответственно векторы центра рабочего органа в системе

координат относительно первого звена манипулятора, т. е. его основания, и последнего звена, т. е. рабочего органа. Уравнение (1.11) представляет собой уравнение кинематики манипулятора $x = f(q)$ в векторной форме. Аналогично осуществляется вывод выражений через относительные координаты q для углов ориентации рабочего органа в абсолютной системе координат.

Необходимо отметить, что при его решении уравнения кинематики должны быть учтены различные конструктивные и прочие ограничения относительных перемещений звеньев q_i .

Перейдем к рассмотрению второго уравнения системы (1.1) — уравнения динамики $q = A_m(Q_g, Q_v)$, которое связывает относительные координаты звеньев q_i с действующими на систему движущими Q_{gi} и противодействующими Q_{vi} силами. В зависимости от решаемых задач это уравнение может быть получено 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 для исследования динамики манипулятора.

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

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1.12)$$

Здесь $L = K - \Pi$ — функция Лагранжа, где K и Π — соответственно кинетическая и потенциальная энергия звена; $Q_i = Q_{gi} - Q_{vi}$ — результирующая сила, приведенная к выходу привода звена.

Уравнение (1.12) можно представить в следующей форме:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j + c_i = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.13)$$

Первый член уравнения (1.13) описывает силы, зависящие от ускорения (соответственно коэффициенты при $\ddot{q}_j$ характеризуют инерцию звена); второй — скоростные силы (центробежные, кореолисовы, вязкого трения и т. п.), третий — гравитационные, статические.

Систему уравнений звеньев (1.13) можно более кратко записать в матрично-векторной форме:

$$A(q) \ddot{q} + b(q, \dot{q}) + c(q) = Q, \quad (1.14)$$

где $A(q)$ — симметричная матрица размерности $n \times n$, описывающая инерционные свойства системы; $b(q, \dot{q})$ — вектор скоростных сил размерности n ; $c(q)$ — вектор статических сил размерности n . Физический смысл членов уравнения (1.14) очевиден и структура уравнения не зависит от метода его вывода.

Рассмотрим в качестве примера уравнение динамики трехзвенного манипулятора с цилиндрической системой координат (см. рис. 1.3,б) [1]. Кинетическая и потенциальная энергии манипулятора соответственно равны:

$$K = \frac{1}{2} m (\dot{r}^2 + r \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2} m_r \left[\dot{r}^2 + \left(r - \frac{\ell}{2} \right)^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2 \right] +$$

$$+ m_r \frac{\ell^2 \dot{\varphi}^2}{24} + \frac{1}{2} m_z \dot{z}^2 + \frac{1}{2} (J_\varphi + J'_\varphi) \dot{\varphi}^2,$$

$$\Pi = (m + m_r + m_z) z g,$$

где m — масса рабочего органа с полезным грузом; m_z — масса вертикальной колонны, движущаяся по координате z ; m_r — масса горизонтальной стрелы, движущаяся по координате r ; 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 К и П в (1.12), получим уравнение в векторно-матричной форме

$$\begin{bmatrix} a_\varphi(z) & 0 & 0 \\ 0 & a_z & 0 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} b_\varphi(\varphi, \dot{r}, r) \\ 0 \\ b_r(\varphi, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\varphi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

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 (1.14):

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

$$b = \begin{bmatrix} b_\varphi(\varphi, r, r) \\ 0 \\ b_r(\varphi, r) \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_z + m_r + m) g \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} M_\phi \\ F_z \\ F_r \end{bmatrix}.$$

Вектор b_ϕ описывает кореолисову силу, вектор b_r — центробежную, а вектор c — силу тяжести.

Уравнение (1.15) можно представить системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_\phi(r)\dot{\phi} + b_\phi(\phi, r, \dot{r}) &= M_\phi, \\ a_z\ddot{z} + c_z &= F_z, \\ a_r\ddot{r} + b_r(\phi, r) &= F_r. \end{aligned} \right\} (1.16)$$

На рис. 1.10 показана соответствующая структурная схема, где наглядно представлены, в частности, и выявленные взаимовлияния движений по отдельным степеням подвижности.

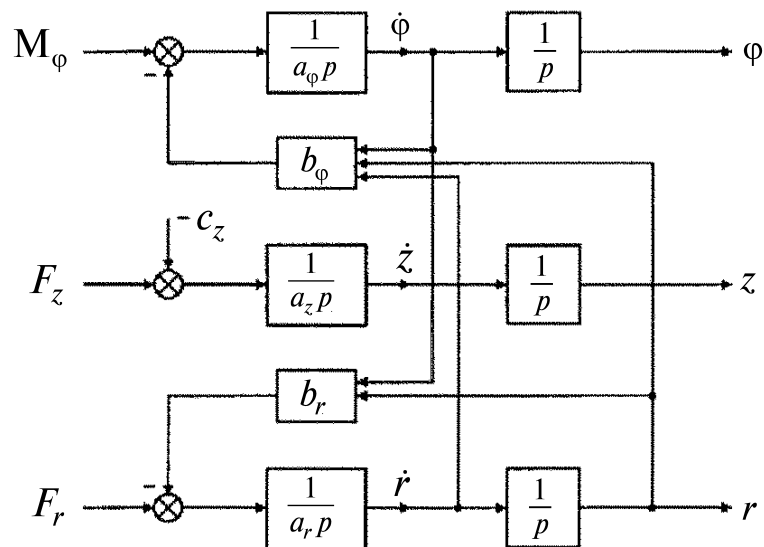


Рис. 1.10. Структурная схема механической системы трехзвенного манипулятора по рис. 1.3,б.

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

$$\left. \begin{aligned} (a_\phi p + b_\phi) p \Delta \phi + (b_\phi'' p + b_\phi''' + a_\phi' \dot{\phi}_0) \Delta r &= \Delta M_\phi, \\ a_z p^2 \Delta z &= \Delta F_z, \\ (a_r p^2 + b_r) \Delta r + b_r' p \Delta \phi &= \Delta F_z. \end{aligned} \right\} (1.17)$$

Здесь p — символ дифференцирования по времени, а $a_\phi' \dot{\phi}_0$; b_ϕ' , b_ϕ'' , b_ϕ''' ; 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 (1.14) 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 (1.14):

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

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

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

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

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

Подставив выражение для $\ddot{q}$ в уравнение (1.14) или, наоборот, подставив сюда выражение для $\ddot{q}$ из уравнения (1.14), получим следующее уравнение для x :

$$A(q) J^{-1}(q) \ddot{x} + b(q, \dot{q}) + c(q) - A(q) J^{-1}(q) D(\dot{q}, q) = Q. \quad (1.18)$$

Основной интерес представляет это уравнение для выходных переменных манипулятора — для координат его рабочего органа x_p . Заметим, что при решении

уравнения (1.18), когда число степеней подвижности манипулятора числа степеней подвижности его рабочего органа n больше m , 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 уравнения для усилий, с которыми манипулятор взаимодействует с объектами внешней среды. Здесь возможны два варианта. 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 (1.14) с подстановкой в него указанных сил, пересчитанных на эти координаты. Получаем уравнение

$$A(q)\ddot{q} + b(q, \dot{q}) + c(q) = \dot{Q}' + J^T(q)Q_{\text{внеш}}. \quad (1.19)$$

Здесь $Q' = Q_g - Q_{в1}$, где $Q_{в1}$ — 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 $Q_{\text{внеш}}\dot{x} = Q_{в2}\dot{q}$, где $Q_{в2}$ — действующие на звенья в системе относительных координат силы, вызванные силой $Q_{\text{внеш}}$.

Второй вариант — это когда сам манипулятор 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 (1.18):

$$A(q)J^{-1}(q)\ddot{x} + b(q, \dot{q}) + c(q) - A(q)J^{-1}(q)D(q, \dot{q}) + Q_p = \dot{Q}', \quad (1.20)$$

где Q_p — выделенные из вектора Q создаваемые приводами усилия на рабочем органе, действующие по $1 \leq m$ координатам, по которым осуществляется указанное силовое воздействие на среду. Для остальных $(m-1)$ координат уравнение динамики остается прежним: (1.14) или (1.18).

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 них 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 покрытия 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 измерением 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 запястье рабочего органа.

1.2.2. Взаимовлияние степеней подвижности манипуляторов

Итак, как выше показано, динамика механической системы манипуляторов может быть описана в относительных координатах следующим векторно-матричным уравнением:

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

Здесь $A(q)\ddot{q}$ — векторная функция сил инерции, пропорциональных ускорению, где $A(q)$ — симметричная $n \times n$ матрица, описывающая инерционные свойства системы, n — число ее степеней подвижности; $b(\dot{q}, q)$ — n -мерный вектор скоростных сил: центробежных, кореолисовых, трения и потерь в сочленениях, зависящих от скорости; $c(q)$ — n -мерный вектор сил тяжести; Q — вектор сил, действующих по n степеням подвижности системы.

Наличие q в скобках означает, что члены этого уравнения зависят от конфигурации манипулятора, т. е. что его механическая система является нестационарной. Важным свойством ее является также взаимосвязанность степеней подвижности, т. е. влияние их друг на друга. Существует четыре типа такого взаимовлияния: влияние на величину инерции и влияния по ускорению q , скорости $\dot{q}$ и положению q .

Первые два типа взаимовлияния учитываются матрицей

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}.$$

Влияние на величину инерции по i -й степени подвижности значений q по другим степеням подвижности учитывается в диагональных элементах a_{ii} матрицы. Так, в приведенном выше примере цилиндрической трехстепенной системы такое влияние

описывается элементом $a_\phi(r)$ в уравнении (1.15). Здесь имеет место зависимость момента инерции по координате ϕ от координаты r : с выдвижением горизонтальной стрелы манипулятора растет инерция вращения его колонны относительно вертикальной оси.

В манипуляторах со сферической системой координат (см. рис. 1.3,а) величина выдвижения стрелы 3 влияет на моменты инерции относительно осей 1 и 2. Аналогичное влияние положения звеньев на момент инерции относительно предыдущих осей существует и в манипуляторах с шарнирной системой координат (см. рис. 1.2).

Второй тип взаимовлияния по ускорению $\ddot{q}$ описывается недиагональными элементами a_{ij} матрицы $A(q)$. Оно заключается в действии по отдельным степеням подвижности сил (моментов сил) инерции, пропорциональных ускорениям по другим степеням подвижности. Такое влияние имеет место, например, в шарнирных манипуляторах от предыдущего шарнира на последующие, действующие в одной с ним плоскости.

Третий тип влияния по скорости $\dot{q}$ описывается вектором $b(q, \dot{q})$. В упомянутом примере манипулятора с цилиндрической системой координат это центробежная сила, действующая по координате r в функции скорости $\dot{\phi}$ (см. выражение для $b_r(\phi)$ в уравнении (1.15)), и кореолисова сила, действующая по ϕ в функции от произведения $\dot{\phi} r$ (см. там же выражение для $b_\phi(\phi, r, \dot{r})$).

Четвертый тип влияния по силе тяжести учитывается вектором $c(q)$. Это воздействие силы тяжести одного звена на предыдущие степени подвижности, действующие не в горизонтальной плоскости. Такое влияние, например, существует в шарнирных манипуляторах, работающих в вертикальной плоскости.

Таким образом манипуляторы как объекты управления представляют собой многомерные взаимосвязанные системы. Конечно, эта взаимосвязанность усложняет задачу управления такими объектами, однако она не обязательно оказывает отрицательное влияние на качество управления. Так, в рассмотренном примере манипулятора с цилиндрической системой координат при выдвижении его стрелы (увеличении r) наличие вращения колонны, т. е. $\dot{\phi}$, будет способствовать этому

движению стрелы за счет центробежной силы. Поэтому хотя для облегчения задачи управления желательно каким-то образом развязывать степени подвижности манипулятора, чтобы иметь возможность управлять ими независимо, в общем случае такой подход не является наилучшим в отношении качества управления. Теоретически оптимальное решение дает подход к манипулятору в качестве объекта управления как к единой многомерной взаимосвязанной системе.

С учетом этого рассмотрим способы борьбы с взаимовлиянием степеней подвижности, которые можно применять, когда от этих взаимовлияний надо освободиться. Существуют две группы таких способов:

- а) конструктивные, основанные на уравнивании масс звеньев манипулятора;
- б) алгоритмические, реализуемые системой управления.

Простейший вариант первого способа — это уравнивание масс звеньев противовесами, в том числе автоматически перемещающимися для уравнивания переменных масс, например, полезного груза. Для манипуляторов, все звенья которых перемещаются в одной плоскости, такое уравнивание может обеспечить полное устранение взаимовлияний степеней подвижности (рис. 1.11). Условие уравнивания заключается в равенстве моментов сил веса противовесов и сил веса уравниваемых ими звеньев относительно оси их вращения. Очевидный недостаток такого уравнивания — это увеличение инерции звеньев манипулятора и его общей массы. В связи с этим заметим, что для уменьшения момента инерции целесообразно уменьшать расстояние от противовеса до оси вращения за счет пропорционального увеличения его массы, так как момент инерции пропорционален квадрату этого расстояния. А для снижения массы манипулятора следует поступать наоборот.

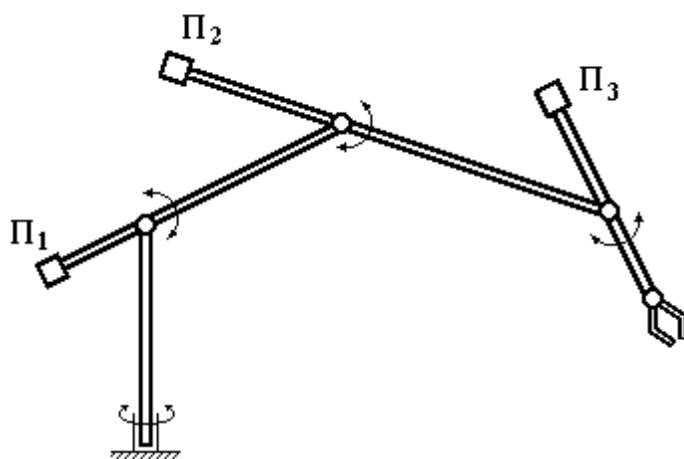


Рис.1.11. Шарнирный манипулятор с противовесами: Π_1, Π_2, Π_3 - противовесы

Лучшим решением исследуемой задачи уравнивания является использование в качестве противовеса конструктивно необходимых частей манипулятора путем размещения их по разные стороны оси вращения. К таким частям могут относиться, например, элементы приводов и рабочих органов манипулятора.

Кроме противовесов, для уравнивания звеньев применяются пружины и дополнительные приводы постоянной силы (момента). Пружинные уравнивающие механизмы, помимо устранения взаимовлияния степеней, позволяют скомпенсировать гравитационные составляющие моментов (веса), в том числе полезного груза, и соответственно снизить требуемую мощность двигателей или повысить грузоподъемность манипулятора.

Вторая группа способов устранения взаимовлияния степеней подвижности, основанная на использовании системы управления, включает прежде всего компенсацию этих влияний с помощью перекрестных управляющих воздействий на приводы. Таким образом, например, могут быть скомпенсированы взаимные влияния степеней подвижности манипулятора с цилиндрической системой координат (см. рис. 1.5). Для этого через приводы M_φ и F_r надо ввести перекрестные воздействия, компенсирующие взаимовлияния φ и r , описываемые звеньями b_φ по $\dot{r}$ и b_r по $\dot{\varphi}$.

Общим средством уменьшения рассматриваемых взаимовлияний является повышение быстродействия систем управления степенями подвижности манипулятора,

поскольку это соответственно повышает эффективность парирования возмущений, действующих на эти степени подвижности, включая и их взаимовлияния.

1.2.3. Учет упругости звеньев манипулятора

Уравнение динамики (1.14) механической системы манипулятора получено в предположении абсолютной жесткости ее звеньев, т. е. при пренебрежении упругими деформациями. Рассмотрим теперь эти деформации и выведем уравнение динамики с их учетом.

Возможны два типа упругости в звеньях манипулятора — сосредоточенная и распределенная. Сосредоточенная упругость может иметь место в сочленениях звеньев, в передачах (зубчатых, цепных, тросовых и т. п.). Распределенная упругость — это гибкость звеньев, вызывающая их изгиб или скручивание.

Чаще всего упругие деформации нежелательны, так как создают колебания в системе, осложняя этим задачу управления манипулятором, снижая быстродействие и точность, создавая дополнительные динамические нагрузки.

Основная причина появления таких нежелательных упругих деформаций — стремление снизить массу механической системы манипулятора. Минимум ее массы имеет место при расчете манипулятора не на жесткость, а на прочность со снятием соответственно ограничений на упругие деформации в механической системе манипулятора. Поскольку это ведет к усложнению системы управления, оптимальное решение должно находиться при синтезе обеих систем совместно.

Однако упругость может играть и положительную роль. Так, часто в запястье рабочего органа вводят упругость для создания податливости при выполнении сборочных и других операций с объектами внешней среды. Наконец, существуют манипуляторы типа хобота, в которых управляемая гибкость лежит в основе их принципа действия [3].

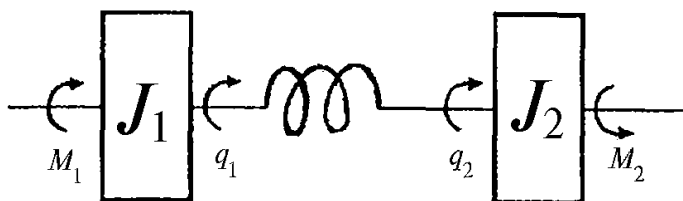


Рис. 1.12. Двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью

На рис. 1.12 показана расчетная двухмассовая модель звена с сосредоточенной упругостью. Здесь M_1 , M_2 — соответственно движущий момент на входе и момент нагрузки на выходе звена; J_1 , J_2 — моменты инерции; q_1 , q_2 — относительные координаты (здесь углы поворота) на входе и выходе звена, так что разность $(q_1 - q_2)$ есть угол скручивания гибкого элемента, представленного в виде пружины.

Математическое описание этого звена:

$$\left. \begin{aligned} J_1 p^2 q_1 &= M_1 - k' p(q_1 - q_2) - k(q_1 - q_2), \\ J_2 p^2 q_2 &= k' p(q_1 - q_2) + k(q_1 - q_2) - M_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

Здесь k, k' — коэффициенты жесткости и вязкого трения гибкого элемента; $p \equiv \frac{d}{dt}$ — символ дифференцирования по времени.

Исключив q_2 , получим уравнение:

$$p^2 (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) q_1 = (k_1' p + k_1) M_1 - (k_2'' p^2 + k_2' p + k_2) M_2, \quad (1.22)$$

$$\text{где } T_1 = \frac{1}{\omega_0}, T_2 = \frac{2\xi_0}{\omega_0};$$

$$k_1' = \frac{2\xi_2 \omega_2}{\omega_0^2 J_1}, k_1 = \frac{\omega_2^2}{\omega_0^2 J_1};$$

$$k_2'' = \frac{1}{\omega_0^2 J_2}, k_2' = \frac{2\xi_1 \omega_1}{\omega_0^2 J_2}, k_2 = \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2 J_2};$$

$$\omega_0 = \left(\frac{k}{J_1} + \frac{k}{J_2} \right)^{1/2} \text{ — собственная частота звена;}$$

$$\omega_1 = \left(\frac{k}{J_1} \right)^{1/2} \text{ и } \omega_2 = \left(\frac{k}{J_2} \right)^{1/2} \text{ — парциальные частоты;}$$

$$\xi_1 = \frac{k'}{2} (kJ_1)^{1/2}, \xi_2 = \frac{k'}{2} (kJ_2)^{1/2}, \xi_0 = \frac{k'}{2} \left(\frac{kJ_1 J_2}{J_0} \right)^{1/2} \text{ — показатели затухания колебаний;}$$

$$J_0 = J_1 + J_2.$$

При отсутствии вязкого трения $k'_2 = 0$, поэтому $\xi_0 = 0$ и $T_0 = 0$. Звено становится колебательным с нулевым затуханием.

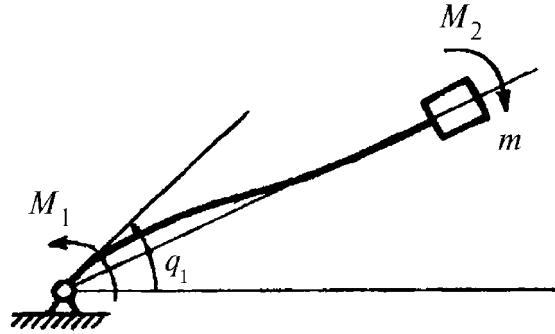


Рис. 1.13

Типичное звено с распределенной упругостью — это гибкий стержень, показанный на рис. 1.13. Поворот стержня с массой m на конце происходит под действием момента M_1 при наличии противодействующего момента M_2 . Это звено с распределенными параметрами описывается дифференциальным уравнением в частных производных. Этому соответствует бесконечное число степеней свободы и целый спектр частот колебаний. Однако если нас интересует только положение конечной точки стержня с массой m , эту модель можно свести к ранее рассмотренной дискретной двухмассовой модели [1]. Это соответствует учету только одной основной гармоника колебаний из всего спектра.

Уравнение динамики всей механической системы манипулятора, содержащей рассмотренные выше упругие звенья, можно представить в таком виде

$$\begin{bmatrix} A_{11}(q, q_y) & A_{12}(q, q_y) \\ A_{21}(q, q_y) & A_{22}(q, q_y) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(q, q, q_y, q_y) \\ b_2(q, q, q_y, q_y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k'q_y + kq_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(q, q_y) \\ c_2(q, q_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_g \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1.23)$$

По сравнению с уравнением (1.14) для относительных координат q манипулятора без упругих деформаций здесь появляются новые “упругие” координаты q_y и соответствующее уравнение для них. В нем k, k' — матрицы коэффициентов жесткости и вязкого трения гибких звеньев.

Уравнение (1.23) может быть получено так, как ранее уравнение (1.14) для жесткой механической системы манипулятора, с помощью уравнения Лагранжа второго

рода (1.12), если в выражениях для кинетической и потенциальной энергий звеньев учесть гибкие звенья [2].

При решении задач управления манипуляторами с гибкими звеньями с помощью приводов n степеней подвижности необходимо принимать специальные меры для гашения колебаний, вызываемых упругими деформациями в этих звеньях. Для этого обычно вводят обратные связи по этим деформациям, непосредственно измеряемым или вычисляемым по другим, связанным с ними, измеряемым переменным.

1.2.4. Математическое описание приводов

В манипуляторах применяются электрические, гидравлические и пневматические позиционные приводы. Кроме того, известны случаи применения в манипуляторах шаговых приводов и приводов с управляемыми муфтами и нерегулируемыми двигателями. На рис. 1.14 приведена типовая схема приводов манипуляторов.

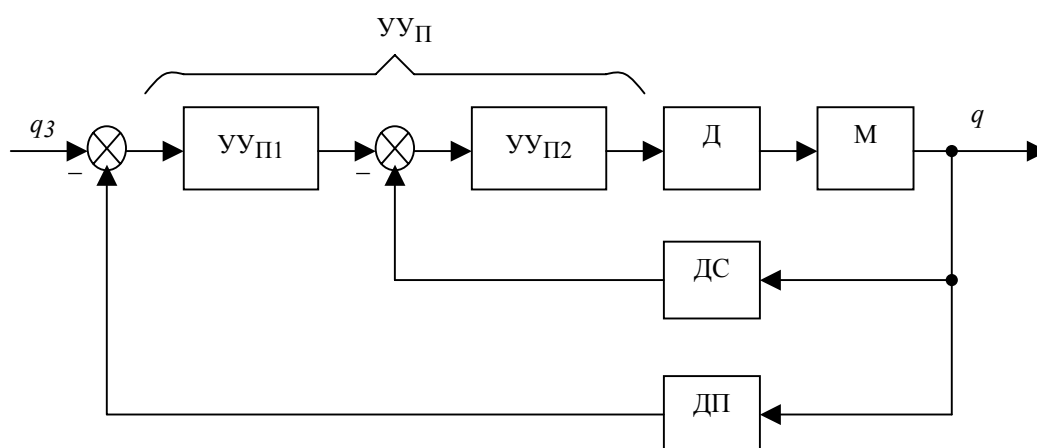


Рис. 1.14. Типовая схема приводов манипуляторов:

Д — двигатель, М — механизм передачи и преобразования перемещения, ДП, ДС — датчики положения и скорости, $UU_{П}$, $UU_{П1}$, $UU_{П2}$ — устройство управления и его две части

Наряду с общей обратной связью по положению в схеме имеется обратная связь по скорости, которая играет роль корректирующей гибкой обратной связи и часто, кроме того, служит для управления скоростью. Датчик скорости часто ставится не так, как показано (см. рис. 1.14), а на выходе двигателя перед механизмом. Управляющее устройство может быть непрерывного действия, импульсным или цифровым. По алгоритму управления, определяющему характер движения на выходе привода,

существуют приводы цикловые, позиционные и контурные. Эта терминология пришла в робототехнику из станкостроения и означает следующее:

цикловой привод — это привод с релейным управлением, осуществляющий одношаговое перемещение с остановкой на механическом упоре;

позиционный привод — это привод с дискретным управлением “от точки к точке”, т. е. осуществляющий движение шагами с остановкой после каждого очередного шага;

контурный привод — это следящий привод непрерывного действия, обеспечивающий отработку непрерывного входного задающего сигнала q_3 , т. е. равенство $q \equiv q_3$.

В соответствии с уравнением динамики механической системы манипулятора математическое описание системы приводов манипулятора должно представлять собой зависимость

$$Q_g = A_n(U_n), \quad (1.24)$$

где Q_g — вектор движущих сил (моментов) на выходе приводов манипулятора размерности n , приводящих в движение его степени подвижности; A_n — оператор системы приводов; U_n — вектор управляющих воздействий на входе приводов.

Что касается перемещений q на выходе приводов, то поскольку последние связаны общей механической системой манипулятора, эти перемещения не являются независимыми переменными, и для их нахождения надо решать совместно систему уравнений, описывающих механическую систему с приводами.

Математическое описание двигателя отдельного привода с угловым перемещением (вращающегося) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} J_g p \omega_g &= M_g - M_n, \\ (T_g p + 1) M_g &= f(U, \omega_g) \end{aligned} \right\}. \quad (1.25)$$

Здесь J_g — момент инерции; M_n — момент нагрузки на валу двигателя; M_g — движущий момент развиваемый двигателем; ω_g — угловая скорость, T_g — постоянная

времени цепи, связывающей M_g с управляющим воздействием u_n ; $f(u_n, \omega_g)$ — статическая характеристика двигателя.

В линейном приближении последняя зависимость:

$$f(u_n, \omega_g) = k_u u_n - k_\omega \omega_g. \quad (1.26)$$

Для электрического двигателя T_g — это электромагнитная постоянная времени, которой обычно можно пренебречь по сравнению с постоянной времени, определяемой J_g .

С учетом (1.26) система (1.25) сводится к уравнению:

$$(T'_g T_g p^2 + T'_g p + 1) \omega_g = k u_n - \frac{T_g + 1}{k_\omega} M, \quad (1.27)$$

$$\text{где } T'_g = \frac{J_g}{k_\omega}, \quad k = \frac{k_u}{k_\omega}.$$

При $T_g = 0$ уравнение (1.27) принимает вид

$$(T'_g p + 1) \omega_g = k u_n - \frac{1}{k_\omega} M. \quad (1.28)$$

Математическое описание привода в целом включает, кроме приведенного описания двигателя, описание механической передачи на выходе (например, редуктора) и устройства управления (см. УУ_п на рис. 1.1). В соответствии с типовой схемой привода (см. рис. 1.9) алгоритм, реализуемый его устройством управления, — это ПД-управление. Применяются еще и ПИД алгоритмы управления.

При исследовании динамики манипуляторов “в большом” необходимо учитывать нелинейность статической характеристики двигателя — насыщение по u_n и ω_g , которые ограничивают быстродействие привода.

1.2.5. Математическое описание манипулятора с приводами

В общем виде математическое описание включает в себя рассмотренные зависимости:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(q), \\ q &= A_M(Q_G, Q_B), \\ Q_G &= A_n(u_n). \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

Здесь A_M и A_n — операторы механической системы и системы приводов манипулятора, а u_n — вектор управляющих воздействий на входе приводов.

Если воспользоваться уравнением динамики манипулятора (1.14) и линеаризовать уравнение привода (схему которого см. на рис. 1.14), получим описание манипулятора с такими приводами:

$$\left. \begin{aligned} A(q) p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= Q_G - Q_B, \\ Q_G &= W_{n2}(p) u_n - J_G p^2 q, \\ u_n &= W_{n1}(p) (q - q_3) - W_{n3}(p) pq. \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

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 последовательных и параллельных корректирующих звеньев; J_G — диагональная матрица моментов инерции двигателей, приведенных к выходу приводов q (умножением на квадрат передаточного отношения редуктора).

Исключив из (1.30) промежуточные переменные, можно получить следующее общее уравнение:

$$\begin{aligned} [J_G + A(q)] p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= \\ = W_{n1}(p) W_{n2}(p) (q - q_3) - W_{n2}(p) W_{n3}(p) q - Q_B. \end{aligned} \quad (1.31)$$

На рис. 1.15 приведена соответствующая структурная схема. При необходимости в нее могут быть введены различные нелинейности типа насыщения, нечувствительности, сухого трения и т. п.

При исследовании конкретных систем и конкретных режимов работы в их математическом описании могут быть сделаны различные упрощения.

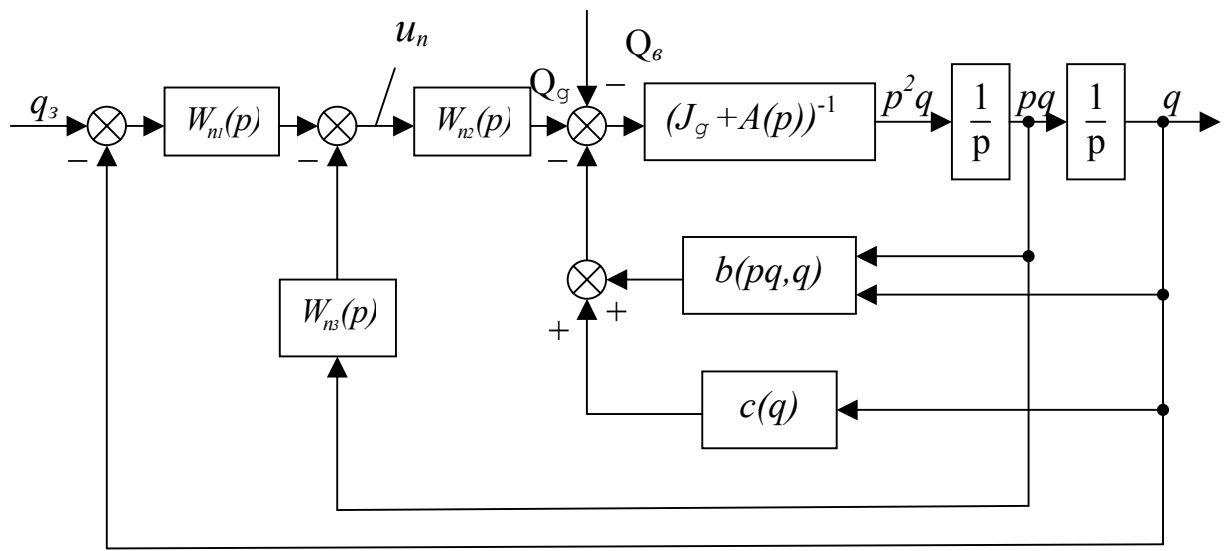


Рис. 1.15. Структурная схема манипулятора с приводами

1. При невысоких скоростях движения (примерно менее 0,5 м/с), когда динамическое взаимовлияние приводов мало, можно пренебречь этим взаимовлиянием по ускорению и скорости, т. е. недиагональными элементами матрицы $A(q)$ и смешанными произведениями скоростей в выражении $b(pq, q)$ [4]. В этом случае левая часть уравнения (1.31) принимает вид

$$[J_g + J_{\Sigma}(q)] p^2 q + b(pq, q) + c(q).$$

Здесь $b(pq, q) = \sum_{i=1}^n b_{ii}(q) (pq_i)^2$, т. е. не содержит членов $b_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j$

$J_{\Sigma}(q) = \text{diag}(J_{1\Sigma}, J_{2\Sigma}, \dots, J_{n\Sigma})$ — диагональная матрица эффективных моментов инерции относительно q_i i -го и всех последующих звеньев $[(i+1), \dots, n]$, которая может определяться по формуле

$$J_{i\Sigma} = \frac{\partial Q_{gi}}{\partial \dot{q}_i}, \quad (1.32)$$

т. е. исходя из уравнения динамики механической системы манипулятора при замене $A(q)$ на $J_{\Sigma}(q)$. Соответственно это выражение можно представить так:

$$J_{i\Sigma}(q) = \left(\frac{\partial q_i}{\partial Q_{gi}} \right)^{-1} = \left\{ [A^{-1}(q)]_{ii} \right\}^{-1}. \quad (1.33)$$

Кроме того, при наличии в приводах редукторов с большим передаточным числом можно пренебречь величинами $J_{gi}(q)$ по сравнению с J_{gi} и соответственно в уравнении (1.31) пренебречь $A(q)$.

2. Обычно, особенно при невысоких скоростях движения, переходные процессы в приводах протекают существенно быстрее, чем перемещения самого манипулятора. Поэтому уравнение манипулятора (1.31) можно разделить на два решаемых независимо: одно — в виде уравнения (1.31) при $p = 0$ в его правой части; и второе — в виде второго и третьего уравнений системы (1.30).

3. Можно используя метод “замороженных” коэффициентов разбить рабочую зону манипулятора на участки, в которых в членах $b(pq, q)$ и $c(q)$ уравнения динамики манипулятора принять постоянные значения q .

§ 1.3. Математическое описание систем передвижения роботов

Как и для манипуляционных систем, математическое описание 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, добавив 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 отдельно.

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 робота 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.

§ 1.4. Математическое описание человека-оператора

Наряду с автоматическим управлением в средствах робототехники широко применяется и управление со стороны человека-оператора автоматизированное и ручное. В этих случаях человек входит в контур управления, который замыкается через его органы чувств, и соответственно должен быть представлен в структурной схеме всей робототехнической системы и ее математическом описании. Такая система относится к человеко-машинным системам и ее описание состоит из двух частей:

$$\left. \begin{aligned} x &= A_T(G_T), \\ G_T &= A_q(G). \end{aligned} \right\} (1.34)$$

Здесь первое уравнение описывает техническую часть системы, а второе - человека-оператора. Соответственно A_T и A_q — их операторы, G_T — задающее воздействие на техническую систему от человека-оператора, а G — задание, которому следует он сам.

Описание технической части системы рассмотрено ранее и будет продолжено. Рассмотрим, как представить математической моделью человека-оператора. В первом приближении человек-оператор может быть представлен звеном чистого запаздывания с величиной времени запаздывания в среднем в сотни миллисекунд. Задержка реакции человека непостоянна и зависит от двух составляющих: 1) в виде латентного (скрытого) периода реакции, т. е. чистого запаздывания реакции оператора от появления воздействия на его органы чувств до начала двигательной реакции; 2) в виде моторной компоненты, т. е. времени его ответного движения.

Величина латентного периода непостоянна, различна для разных органов чувств и находится в следующих пределах:

осязание (тактильное воздействие) 90–220 мс

слух (звук) 120–180 мс

зрение (свет) 150–200 мс

обоняние (запах) 310–390 мс

температурное воздействие 280–1600 мс

Эта величина зависит от интенсивности входного воздействия, уменьшаясь с его ростом. Одно очень сильное воздействие, наоборот, может вызвать так называемое охранный торможение.

Моторная составляющая

$$t_p = t_{p \text{ мин}} + aI^{-n}, (1.35)$$

где $t_{p \text{ мин}}$ — минимальное время реакции (в оптимальных условиях); a — коэффициент переменной составляющей t_p ; I — интенсивность внешнего воздействия; n — показатель степени, зависящий от характеристики внешнего воздействия и условий эксперимента.

Параметры оператора существенно зависят от его состояния и обучения. Состояние (работоспособность) оператора изменяется в процессе его работы, проходя следующие три основные фазы:

обучение,

установившийся режим,

устомление.

Наконец, оператор может просто ошибаться, что в данном случае означает отказ (сбой) системы управления. Надежность оператора характеризуется статистически средней интенсивностью ошибок. Эта величина, кроме состояния оператора, зависит еще от количества операций, выполняемых оператором: с ростом их числа интенсивность ошибок, оставаясь вначале неизменной, начинает затем расти вплоть до перехода оператора в состояние полной неработоспособности.

Инженерами-психологами разработаны рекомендации по конструированию пультов операторов, включая размещение устройств отображения информации и органов управления, и по оптимальному распределению функций между человеком-оператором и техникой с учетом рассмотренных особенностей оператора как звена системы управления, его памяти и органов чувств [5].

Вследствие сложности учета всех особенностей человека-оператора как звена человеко-машинных систем при их проектировании помимо математического

моделирования особенно большое значение имеет физическое моделирование, т. е. экспериментальное исследование системы управления с человеком в ее контуре. Параметры собственно человека-оператора и их оценка при отборе операторов так же определяются экспериментально [6].

§ 1.5. Моделирование роботов на ЭВМ

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

Предварительно при таком компьютерном исследовании решаются две задачи: доказательство достоверности используемого математического описания робота, т. е. решение задачи идентификации [2]; разработка компьютерной модели и доказательство ее адекватности исходному математическому описанию [7,8].

Задача идентификации включает этапы структурной и параметрической идентификации. В рамках первого 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 дифференциальных уравнений на основе одного из известных методов численного интегрирования.

На рис. 1.16 дана обобщенная схема соответствующего пакета программ для рассмотренных математических описаний манипуляторов в части их управления. Пакет

имеет модульную структуру и включает в себя 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 $q_z(t)$ 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.



Рис. 1.16. Схема пакета программы моделирования манипуляционных систем

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 $\Delta q_i = q_i - q_{i3}$ и $\Delta x_i = x_i - x_{i3}$, а также при необходимости показатели качества переходного процесса. Далее могут определяться другие характеристики исследуемой системы: чувствительность к изменениям отдельных параметров, зависимость качества управления от конфигурации манипулятора и 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, которая вследствие сложности объекта исследования решается обычно путем последовательных приближений, начиная с предельно упрощенной модели с последовательным ее усложнением и 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 (изменения структуры системы).

§ 1.6. Классификация способов управления роботами

Приведем классификацию существующих способов управления ими.

1. По типу алгоритма управления различают системы:

программного,

адаптивного,

интеллектуального управления.

2. По степени участия человека в процессе управления существуют системы:

автоматического,

автоматизированного,

ручного управления.

3. По типу движения существуют системы управления:

непрерывные (контурные),

дискретные позиционные шагами “от точки к точке”,

дискретные цикловые по упорам с одним шагом по каждой координате.

4. По виду управляемых переменных различают системы управления:

положением (позицией),

скоростью,

силой (моментом).

Часто эти способы управления применяются в комбинации с одновременным применением по разным координатам или в виде некоторой функциональной зависимости управляемой переменной от другой, либо с последовательным переходом от одного способа управления к другому.

Применительно к управлению манипулятором последние способы управления означают управление абсолютными координатами его рабочего органа x_p , скоростью $\dot{x}_p$ и силой (моментом) Q_p .

Заметим, что способ управления по положению (позиции) часто называют позиционным, что может вызвать путаницу, поскольку в отечественной литературе такое название получило дискретное управление “от точки к точке”, как указано в пункте 3.

ГЛАВА 2. СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНОГО ЦИКЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

§ 2.1. Особенности цикловых систем управления роботов

Рассмотрев математическое описание робота как объекта управления приступим к изучению систем управления роботов. При этом пойдем от простого к сложному, а именно начнем с систем программного автоматического управления, затем рассмотрим системы адаптивного и интеллектуального управления, требующие оучувствления роботов, т.е. оснащения их сенсорными системами. После этого перейдем к системам неавтоматического управления с участием человека-оператора. В заключение будут рассмотрены системы группового управления как собственно средствами робототехники, так и совместно с другими объектами в составе целых технологических комплексов.

Что касается систем программного управления, то здесь мы так же начнем с простейших систем этого типа – дискретных цикловых. Затем рассмотрим дискретные позиционные и непрерывные контурные системы.

Самый распространенный тип роботов с цикловым программным управлением - это подавляющее большинство пневматических промышленных роботов. На рис.2.1 в качестве примера показан пневматический промышленный робот МП-9С со своим устройством управления.

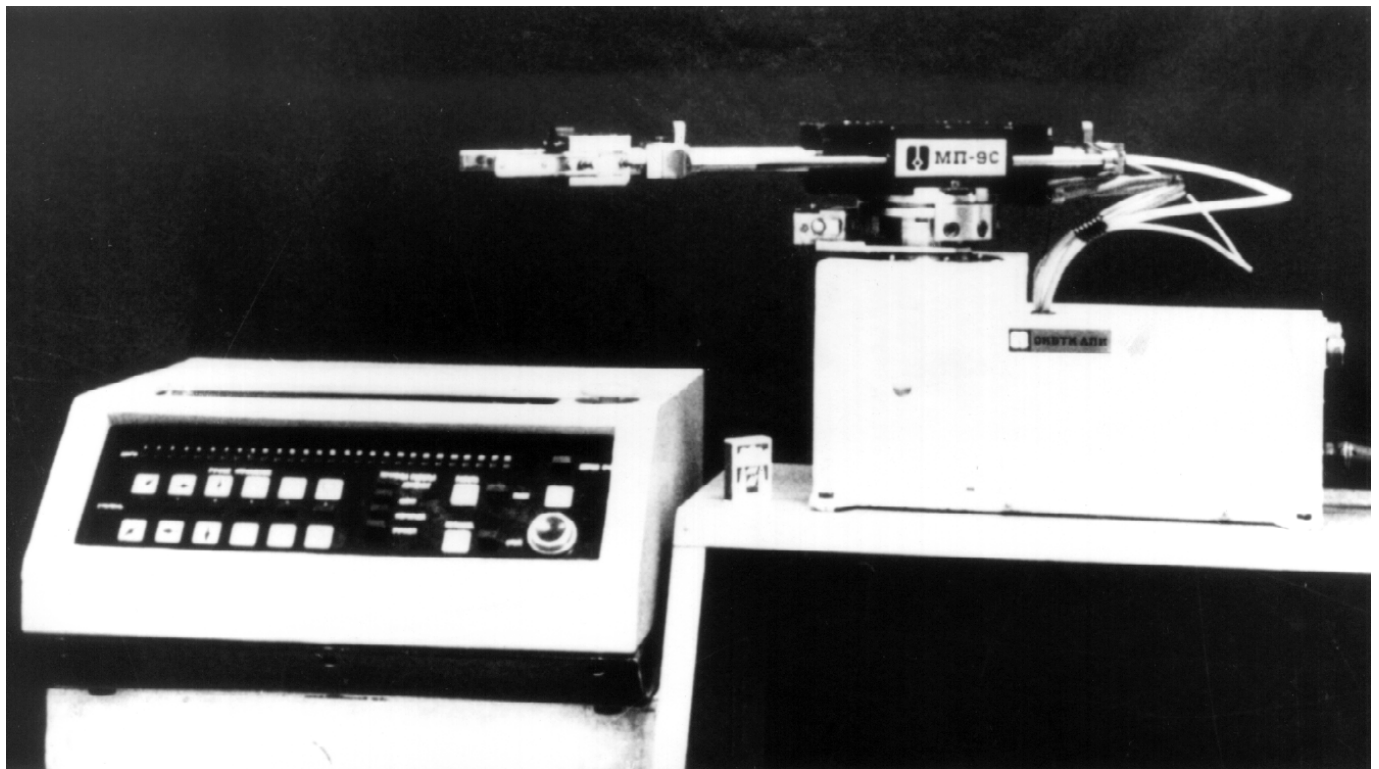


Рис.2.1. Пневматический промышленный робот с цикловым управлением МП-9С. Слева – его устройство управления.

Пневматические приводы этих роботов имеют цикловое управление, т.е. одношаговое релейное управление без обратных связей. Остановка привода осуществляется с помощью механического упора с концевым выключателем и демпфера на подвижной части привода.

Общее устройство управления робота (УУ на рис.1.1) реализует второй общесистемный уровень управления, задача которого осуществлять координацию приводов. Последняя заключается в установлении определенной последовательности включения отдельных приводов и, при необходимости, выдержек времени между этими моментами.

2.2. Цикловое управление отдельным приводом

На рис.2.2 показан процесс циклового программного управления приводом. Он состоит из трех этапов: разгона, движения с постоянной скоростью и торможения. Длительность второго этапа - установившегося движения с постоянной скоростью определяется величиной необходимого перемещения привода. Если эта величина меньше суммы времени разгона и торможения, второй этап вообще будет отсутствовать (пунктирные кривые на рис.2.2).

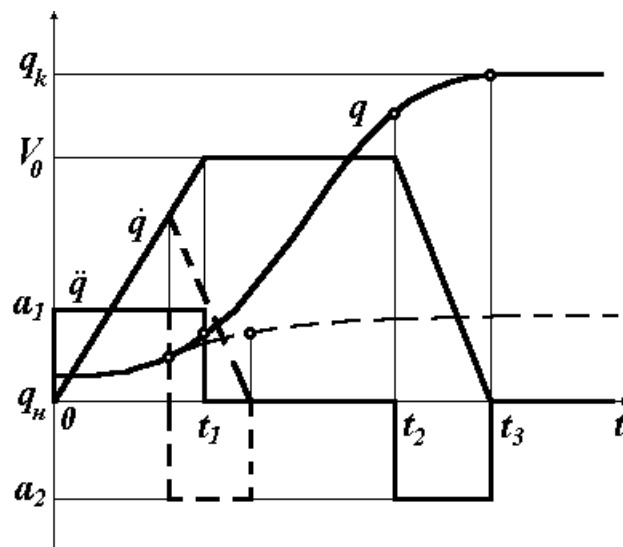


Рис.2.2. Процесс циклового управления приводом.

Изображенный на рис.2.2 процесс соответствует следующему описанию:

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} a_1 = \text{const.} & \text{при } t \leq t_1, \\ 0 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ a_2 = \text{const.} & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (2.1)$$

где a_1 и a_2 - ускорения разгона и торможения, или для скоростей:

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} a_1 t, & \text{при } t \leq t_1, \\ V_0, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ V_0 - a_2(t - t_2), & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (2.2)$$

где $V_0 = a_1 t_1$ – установившаяся скорость.

Приведенные выражения соответствуют упрощенному описанию процесса циклового управления без учета динамики демпфера, возможной упругости механической передачи, а для пневматических и гидравлических приводов и без учета переходных процессов движения рабочего тела в трубопроводах. Все это необходимо учитывать при математическом описании привода для проведения количественных расчетов как это описано в главе 1.

Особенно важно учитывать упругие деформации, которые создают колебательность в цикловых приводах при их разгоне и торможении, т.е. когда появляются ускорения. Наиболее нежелательны колебания, возникающие при торможении при торможении привода, так как они затягивают процесс его остановки и, следовательно, снижают быстродействие робота. Колебания, возникающие на этапе разгона привода, обычно успевают затухнуть к моменту его торможения и поэтому менее вредны. Однако, если длительность этапа движения с постоянной скоростью мала, эти оба колебания могут накладываться, что еще более затруднит процесс торможения.

Поскольку при цикловом управлении торможение привода осуществляется демпфером при наезде им на упор, гашение при этом возможных колебаний — задача настройки демпфера, а именно подбора величины создаваемой им силы вязкого трения.

Цикловое управление – это простейший способ одношагового дискретного управления, однако на этом основании его не следует рассматривать как вырожденный вариант многошагового дискретного позиционного управления. Системы циклового управления принципиально отличаются от позиционных способом позиционирования с помощью механических упоров. Это обеспечивает цикловым системам значительно большие точность и быстродействие.

Что касается быстродействия, то как следует из теории оптимальных систем, именно релейное управление может обеспечить для объектов типа исполнительных систем роботов максимальное быстродействие. Поэтому, как будет показано ниже, и в системах контурного и позиционного управления часто вводят релейные приставки для обеспечения наибольшего быстродействия.

2.3. Совместное цикловое управление приводами манипуляторов

Как показано выше в пункте 1.2.2., особенностью совместного управления приводами манипуляторов является необходимость учета их взаимовлияния. Рассмотрим это явление для циклового управления применительно к типичной

для роботов с таким управлением цилиндрической системе координат манипулятора (рис.1.3,б). Как было выяснено в пункте 1.2.2. (рис.1.10), в таком манипуляторе имеет место взаимное влияние приводов поворота φ и выдвижения r на координату r действует центробежная сила, пропорциональная скорости $\dot{\varphi}$, а на координату φ - кореолисова сила, пропорциональная с обратным знаком произведению $\dot{\varphi} \dot{r}$. В результате при одновременном повороте колонны манипулятора и выдвижении его стрелы центробежная сила будет ускорять выдвижение по r , а кореолисова сила - замедлять поворот φ .

Отсюда следует, что для повышения быстродействия при выполнении манипулятором такого совместного движения привод стрелы нужно включать как можно позже привода поворота колонны. В этом случае максимален эффект ускорения выдвижения стрелы за счет центробежной силы и минимально торможение поворота колонны кореолисовой силой. Иными словами, условием максимального быстродействия в этом случае будет начало движения по φ с последующим включением привода r с выдержкой времени, обеспечивающей одновременное завершение обоих движений.

При выполнении совместного движения приводов φ и r , когда координата r должна уменьшаться, алгоритм оптимального совместного управления этими приводами будет соответственно другим, поскольку изменяются знаки усилий, действующих между этими приводами. В этом случае следует, наоборот, максимально задержать начало поворота колонны относительно движения стрелы.

Что касается привода подъема z , то, поскольку между ним и приводами φ и r взаимосвязь отсутствует, момент его включения, когда требуется движение и по z , должен выбираться с учетом одного условия, чтобы это движение заканчивалось к окончанию движений двух других приводов и тем самым не увеличивалась общая длительность цикла движения манипулятора.

Рассмотрим теперь особенности оптимального по быстродействию совместного управления двумя манипуляторами, подобными рассмотренному выше. Пусть это будет, например, операция обслуживания промышленным роботом прессы холодной штамповки (рис.2.3). Робот ПР своим левым манипулятором берет очередную заготовку из магазина М1 и кладет ее в пресс. Одновременно правый манипулятор робота вынимает из прессы отштампованное изделие и кладет его в магазин М2. При этом, как показано на рис.2.3, приводы каждого

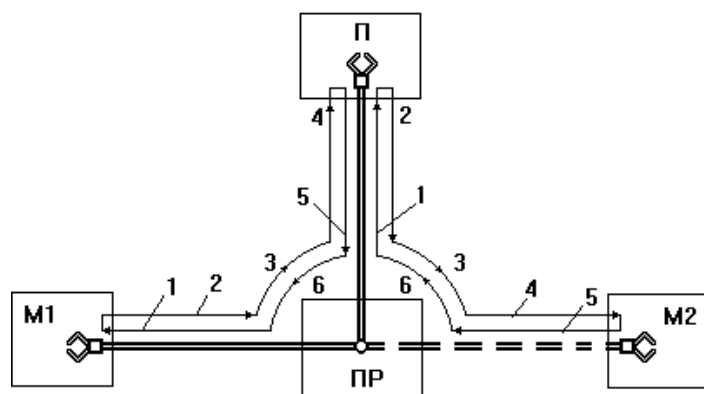


Рис.2.3. Схема технологической ячейки холодной штамповки: П – пресс, ПР – промышленный робот с двумя манипуляторами, М1 и М2 – магазины.

манипулятора осуществляют шесть движений:

1. выдвижение с захватом объекта манипулирования,
2. втягивание,
3. поворот по часовой стрелке,
4. выдвижение с освобождением объекта,
5. втягивание,
6. поворот против часовой стрелки в исходную позицию.

Одновременно в крайних позициях может потребоваться вертикальное перемещение манипуляторов.

Исходя из указанного выше взаимовлияния приводов поворота колонны и выдвижения стрелы, алгоритм оптимального по быстродействию управления обоими манипуляторами заключается в следующем: втягивание одного манипулятора должно начинаться одновременно с его поворотом, а начало выдвижения другого манипулятора должно быть задержано так, чтобы оно заканчивалось одновременно с поворотом.

Синтез управляющих программ для рассмотренных систем циклового управления сводится к определению численных значений оптимальных выдержек времени между моментами включения приводов и соответствующего значения минимального времени всего цикла работы при выполнении конкретной технологической операции. Это осуществляется путем численных расчетов на ЭВМ на основе математического описания динамики манипуляторов робота. При этом варьируется величина задержки включения приводов и вычисляется длительность всего цикла работы робота. В результате находится зависимость длительности цикла от величины задержки и оптимальное значение последней, соответствующее минимуму цикла.

2.4. Резонансные цикловые приводы и манипуляторы

Приводы и основанные на них манипуляторы этого типа - пример положительного использования упругости. В цикловой привод вводится пружина, которая растягивается (раскручивается) при движении привода в одном направлении из среднего положения и сжимается (скручивается) при движении в другом. В результате привод совершает свое циклическое движение в режиме резонансных незатухающих колебаний с нулевой скоростью в крайних точках. При этом двигатель привода осуществляет подпитку энергией пружины в середине пути при максимальной скорости движения, восполняя потери на выполняемую приводом работу. При этом в конечной точке движения не происходит удара демпфером об упор с рассеянием накопленной приводом кинетической энергии. В результате резко, в 3-4 раза снижается энергопотребление и соответственно может быть уменьшена мощность используемого в приводе двигателя.

Приводы такого типа и основанные на них манипуляторы для промышленных роботов были созданы в Институте машиноведения РАН под руководством А. И. Карендясева и не имеют аналогов по своим энергетическим характеристикам и массогабаритным параметрам [9].

По существу, здесь реализована идея рекуперации ранее бесполезно рассеиваемой при торможении энергии, которая традиционно используется, например, на транспорте (маховики, отдача электроэнергии в сеть при переходе электрической машины из двигательного режима в генераторный и т.д.). Эта идея может получить дальнейшее развитие в робототехнике, в том числе для снижения энергопотребления в мобильных роботах, где это особенно важно, с использованием различных, в том числе электрических (конденсаторы и т.п.) рекуператоров энергии.

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНОГО ПОЗИЦИОННОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

§ 3.1. Особенности позиционного управления

Типовые примеры роботов с позиционным управлением — это промышленные роботы для точечной сварки (рис. 3.1), сборки (рис. 3.2) и для обслуживания металлорежущих станков и другого подобного технологического оборудования.

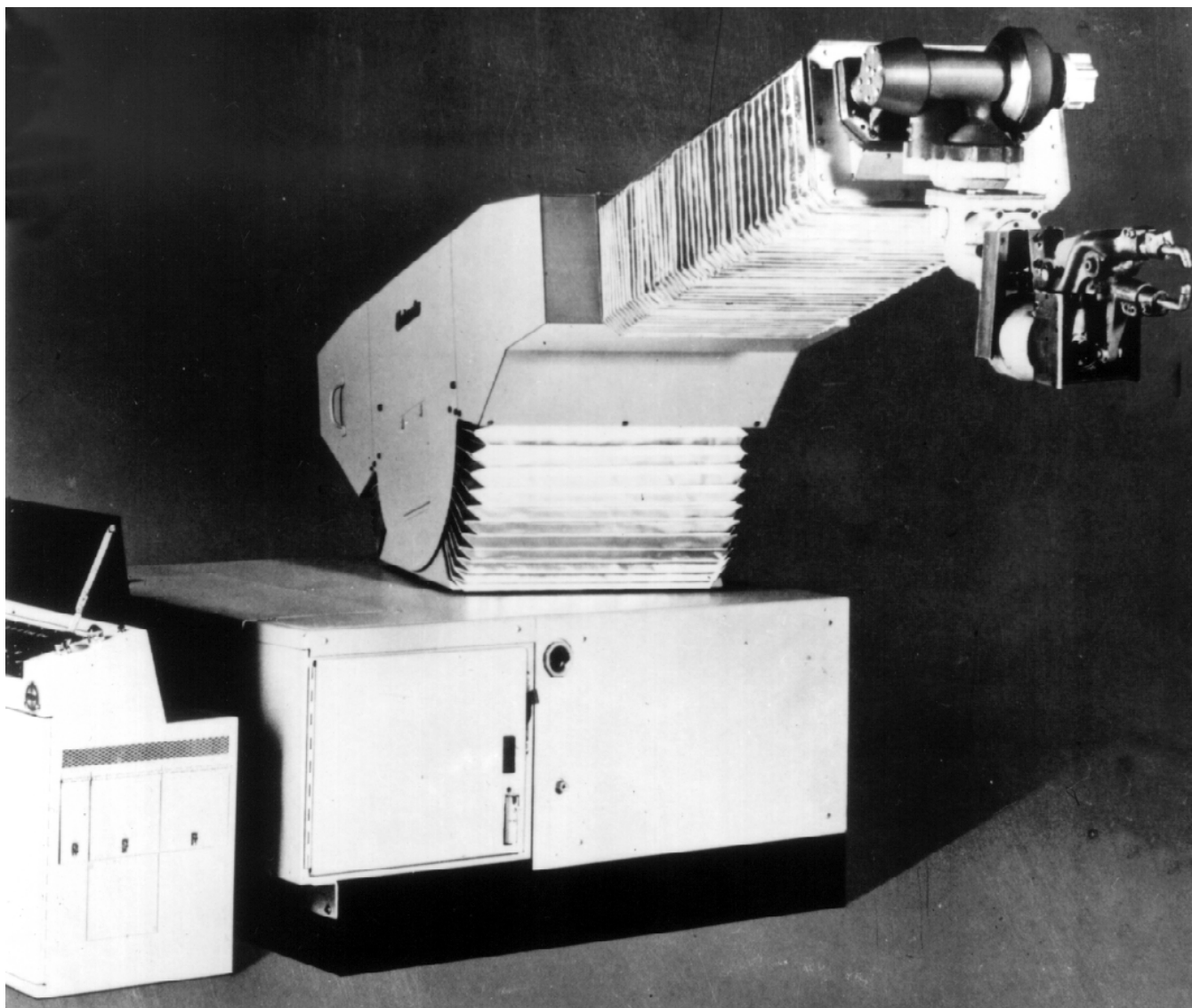


Рис. 3.1. Гидравлический промышленный робот для точечной сварки с дискретным позиционным программным управлением фирмы Unimate (США)

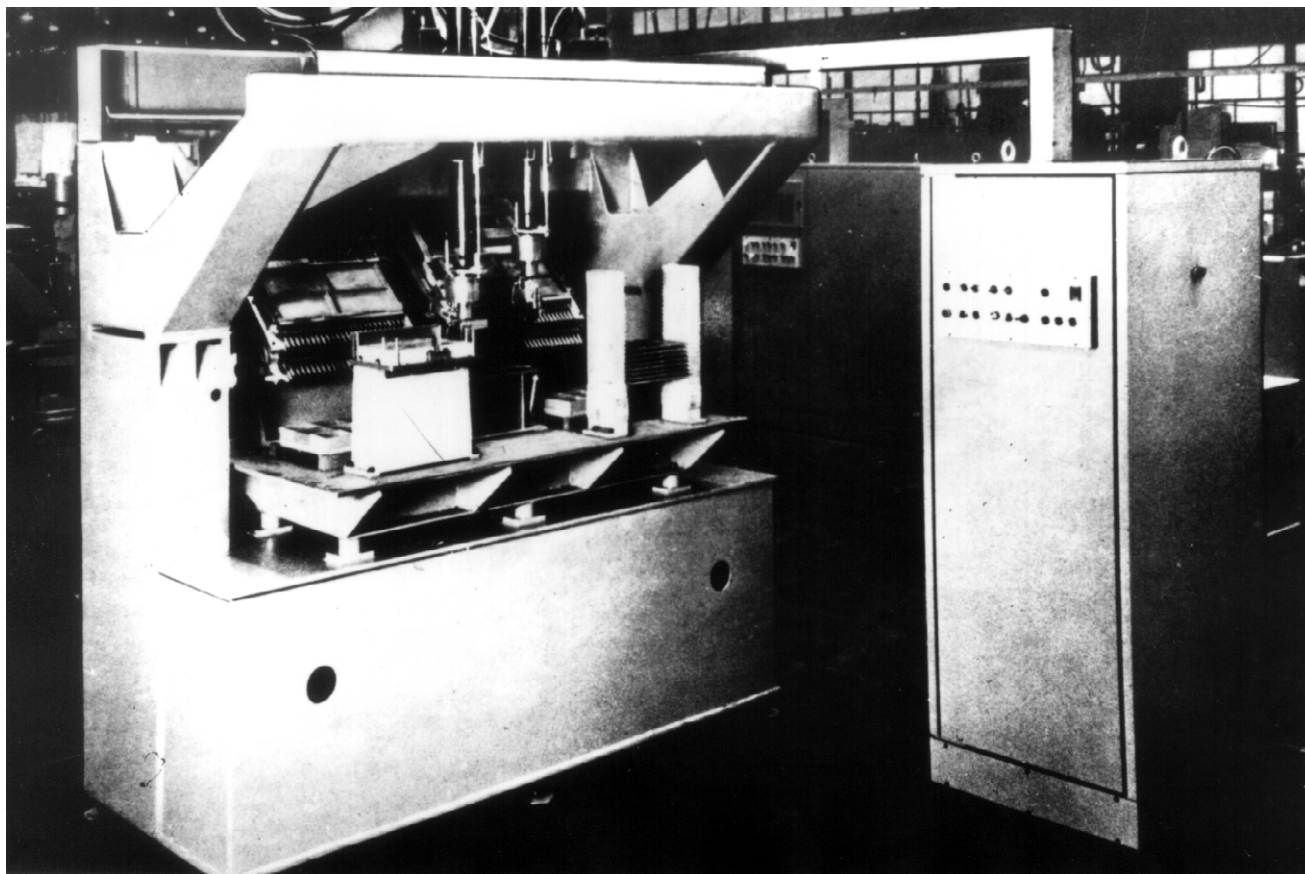


Рис. 3.2. Электрический промышленный робот для механической сборки с дискретным позиционным программным управлением фирмы Оливетти (Италия)

Такие роботы имеют большое число (десятки) точек позиционирования рабочего органа благодаря применению приводов с позиционным управлением (типовую схему которых см. на рис. 1.14).

Процесс перемещения на очередной шаг, как и в цикловых приводах, состоит из этапов разгона, движения с постоянной скоростью и торможения (см. рис. 2.1). Однако здесь, в отличие от цикловых приводов, точность позиционирования, а также устойчивость и качество переходного процесса должны обеспечиваться системой управления. (Исключение составляют только получившие небольшое, как и цикловые приводы, распространение в робототехнике разомкнутые позиционные приводы на шаговых двигателях.)

Таким образом, с точки зрения управления принципиальным отличием роботов с дискретным позиционным управлением от цикловых является

необходимость обеспечения устойчивости, качества управления и точности их систем управления.

Другое отличие — это значительно большая роль взаимовлияния приводов. Если в цикловых системах оно, как было показано, может повлиять только на быстродействие, то в позиционных взаимовлияние приводов сказывается на всех показателях системы, включая точность.

Позиционные системы также значительно чувствительнее к нестационарности параметров и влиянию внешних возмущений, чем цикловые, поскольку последние являются разомкнутыми релейными системами.

§ 3.2. Дискретное позиционное управление отдельным приводом

Основной вариант алгоритма дискретного позиционного программного управления приводом соответствует структурной схеме следящей системы (см. рис. 1.14), которая последовательно отрабатывает дискретные шаги приращения управляемой выходной координаты q_i . Эта схема может быть дополнена другими средствами коррекции, компенсирующими воздействиями по внешним возмущениям и прежде всего по нагрузке, торможением в точках позиционирования с помощью специально введенного в схему привода тормоза.

Когда надо обеспечить максимальное быстродействие, синтез соответствующего оптимального алгоритма управления (как уже говорилось в гл. 2), приводит к релейному управлению. Но поскольку такая система двухпозиционного релейного управления неустойчива в малом, при подходе к точкам позиционирования необходимо переходить на другой алгоритм управления. В результате получается система так называемого дуального управления с переменной структурой, показанная на рис. 3.3. Устройство управления непрерывного действия включается вблизи очередной точки позиционирования, т. е. при малом рассогласовании $\Delta q = q - q_k$, а устройство релейного управления — в момент подачи программного задания на очередной шаг, а также вообще при возникновении больших рассогласований, вызванных

любыми причинами. (Коммутирующий элемент на рис. 3.3 показан условно. Такой же алгоритм может быть реализован с помощью управляемых ключей, осуществляющих нужного знака форсировку двигателя в соответствующие интервалы времени.)

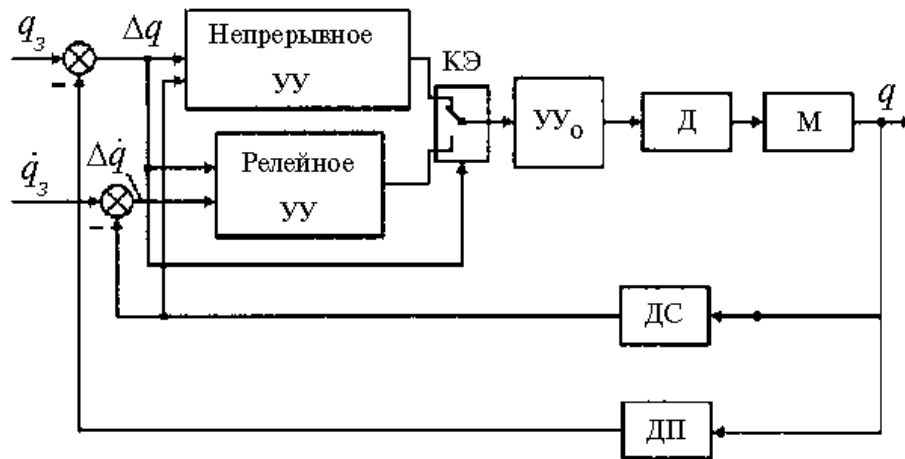


Рис. 3.3. Схема системы позиционного управления приводом: КЭ – коммутирующий элемент

Рассмотрим алгоритмы релейного управления, а затем вернемся к каналу непрерывного управления. На рис. 3.4 показан процесс такого релейного оптимального по быстродействию, управления электрическим приводом, описываемый двумя дифференциальными уравнениями первого порядка с ограничениями по входному напряжению и по движущему моменту, т. е. по току [10].

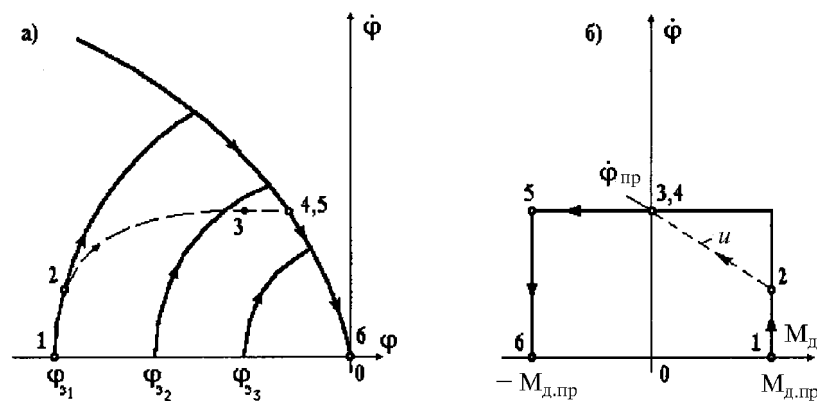


Рис. 3.4. Фазовые траектории (а) и механические характеристики (б) электропривода с релейным позиционным управлением: φ угол поворота выходного вала двигателя, M_{φ} – движущий момент, $u_{\text{пр}}$ – предельное значение напряжения двигателя

В соответствии с теорией оптимального управления оптимальный алгоритм управления напряжением на входе привода состоит из трех интервалов, на первом из которых предельное значение имеет момент двигателя $M_{\varphi} = M_{\varphi \text{ пр}}$, на втором — напряжение на его входе (на якоре) $u = u_{\text{пр}}$ и на третьем — опять M_{φ} , но уже с обратным знаком $M_{\varphi} = -M_{\varphi \text{ пр}}$.

На рис. 3.4,а на фазовой плоскости сплошными линиями показаны оптимальные по быстродействию процессы движения при отработке заданий φ_3 при ограничении движущего момента $M_{\varphi} = C_M I$. Они состоят из парабол, выходящих из начальных точек $(\varphi_3, 0)$ на оси абсцисс, и общей параболы, описывающей этап торможения, — линии переключения. (Пунктиром показан процесс, соответствующий наличию ограничения еще и скорости. Напомним, что ограничения момента и скорости связаны механической характеристикой двигателя.)

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и управлением по напряжению на якоре ограниченные переменные связаны так же с напряжением на якоре известными выражениями:

$$\left. \begin{aligned} u &= I R - C_E \Phi, \\ M_{\varphi} &= C_M I. \end{aligned} \right\} (3.1)$$

Здесь I — ток в цепи якоря двигателя, имеющий ограничение $|I| \leq I_{\text{пр}}$, которое определяет предельное значение момента

$$M_{\varphi} \leq M_{\varphi \text{ пр}} = C_M I_{\text{пр}},$$

где C_M — коэффициент электромагнитного момента; C_E — коэффициент противо-э.д.с. двигателя; R — активное сопротивление цепи якоря двигателя; i — передаточное отношение редуктора привода.

Уравнение линии переключения

$$\Psi(\phi, \varphi) = 0,$$

где $\Psi(\phi, \varphi)$ — функция переключения, которая для $R I_{\text{пр}} \leq u_{\text{пр}}$

$$\Psi(\phi, \varphi) = \varphi_{\text{к}} - \varphi - K \phi^2 \sin \phi, \quad (3.2)$$

где $K = \frac{J_{\text{н}} + i^2 J_{\text{г}}}{2M_{\text{гпр}}}$, а $J_{\text{н}}$ и $J_{\text{г}}$ — моменты инерции нагрузки и якоря двигателя.

Алгоритм управления двигателем представляет собой двухпозиционное релейное управление с входным сигналом $\pm u_{\text{пр}}$. Знак этого сигнала определяется знаком функции переключения (3.2). Ограничение тока при этом осуществляется с помощью обратной связи по току. При достаточно сильной этой связи ток, а следовательно, и момент двигателя будут практически безынерционно следовать за входным напряжением u , реализуя режим моментного управления двигателем.

Отрезок 1 – 2 (см. рис. 3.4) соответствует этапу разгона с постоянным ускорением, т. е. с $M_{\text{г}} = M_{\text{гпр}}$; 2 – 3 — продолжение этапа разгона, но с $u = u_{\text{пр}}$, когда с ростом противо-э.д.с. напряжение на якоре достигло своего предельного значения; 3 – 4 — этап движения с постоянной скоростью, который может возникнуть при достаточно большой длительности процесса разгона в прежнем режиме ограничения u ; 4 – 5 — момент перехода к этапу торможения реверсированием тока якоря и соответственно момента; 5 – 6 — этап торможения при $M_{\text{г}} = -M_{\text{гпр}}$.

Погрешность реализации описанного оптимального алгоритма управления затягивает переходный процесс: при завышении значения коэффициента K в выражении функции переключения (3.2) растет монотонность и длительность переходного процесса вследствие недоиспользования двигателя, а в противоположном случае возникает колебательность с перегрузкой двигателя.

Если в приводе имеются существенные упругие деформации, алгоритм оптимального по быстродействию релейного управления осложняется увеличением числа переключений релейного входного сигнала [1]. В этом случае применяются упрощенные квазиоптимальные алгоритмы, приводящие к

некоторой потере быстродействия и сводящиеся (как и при жестком приводе) к трем этапам управления: разгон с предельно допустимым ускорением вплоть до предельной скорости при достаточно большом заданном перемещении, движение с постоянной скоростью и предельно быстрое торможение. Оптимизации при этом подлежат только моменты перехода от одного этапа к другому, что реализуется выбором функции переключения.

Вернемся к каналу непрерывного управления, переход к которому от релейного управления осуществляется при подходе к точке позиционирования, чтобы исключить возникновение в ней предельного колебательного цикла. Заметим, что при этом вследствие малости отклонения от точки позиционирования, исследование канала можно проводить с применением уравнений, линеаризованных относительно этой точки.

Главная трудность, которая имеет место при синтезе алгоритма такого управления, связана с нестационарностью параметров его нагрузки в виде механической системы манипулятора, т. е. с изменением значений параметров последнего при изменении его конфигурации по мере перемещения его рабочего органа по программной траектории, а так же изменением полезной нагрузки на рабочем органе. Это означает, что рассматриваемая система управления приводом должна иметь достаточно большую область устойчивости, а внутри нее — область допустимого качества в пространстве всех варьируемых параметров. Принципиально здесь возможны два пути решения или их рациональная комбинация:

за счет применения соответствующих способов управления и средств динамической коррекции обеспечить необходимый размер указанной области требуемого качества управления;

осуществить подстройку устройства управления привода под меняющиеся параметры его нагрузки и другие возможные возмущения.

В последнем варианте в свою очередь возможны следующие способы подстройки:

по программе рассчитанной заранее для заданного программного движения, т. е. в функции времени;

в функции от текущего значения задающего воздействия $q_3(t)$;

то же, но от фактического значения $q(t)$, поскольку в точках позиционирования практически это одно и то же;

адаптивная подстройка в функции от значения выбранного показателя качества.

На рис. 3.5 приведена функциональная схема системы управления приводом для второго варианта подстройки по q_3 . Подстройка осуществляется дискретно по мере накопления изменений параметров по заранее рассчитанным закладываемым в блок настройки БН зависимостям значений коэффициентов подстройки устройства управления k_1 и k_2 от значения q_3 .

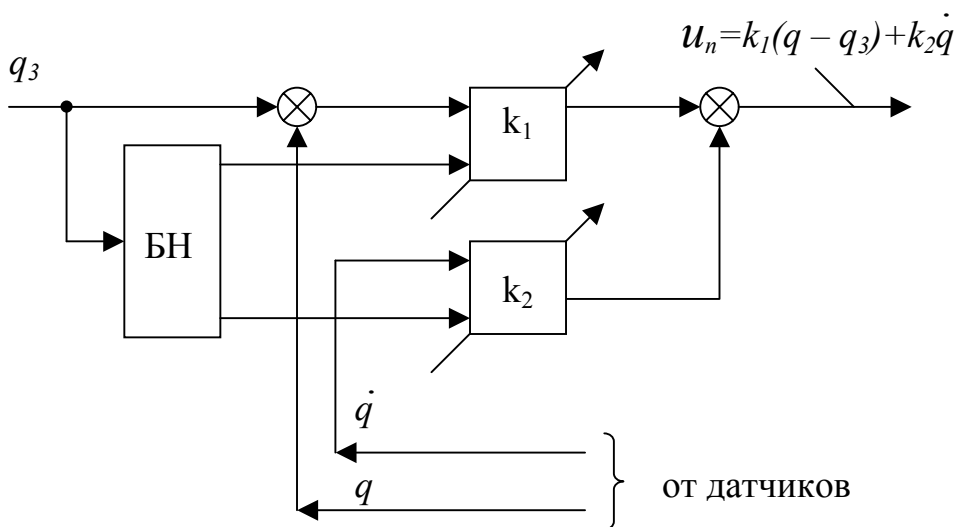


Рис.3.5.Функциональная схема подстройки привода в функции от q_3 : БН – блок настройки.

Адаптивная подстройка привода осуществляется в функции от отклонения значения какого либо контролируемого качества управления от требуемого значения. Ее основное достоинство перед другими способами подстройки по программе, в функции от q_3 или q состоит в том, что она не использует математического описания подстраиваемой системы и, следовательно, не требует его знания. Все же другие способы подстройки основаны на заранее рассчитанных по математическому описанию объекта управления зависимостях значений подстраиваемых параметров от состояния объекта (здесь — от конфигурации манипулятора). Поэтому неточность математического описания

реального объекта ведет в этих случаях к погрешности в настройке. Те случаи, когда этот недостаток существен или даже недопустим, — это область применения более сложной адаптивной настройки.

На рис. 3.6 приведен вариант схемы такой подстройки для привода с типовым алгоритмом управления, где качество управления (например, колебательность) оценивается по текущим значениям q и $\dot{q}$ на выходе привода. Эту оценку осуществляет адаптер, и при отклонении значения выбранного показателя качества от требуемого значения он выдает соответствующего знака управляющие воздействия на блок настройки БН, осуществляя подстройку привода.

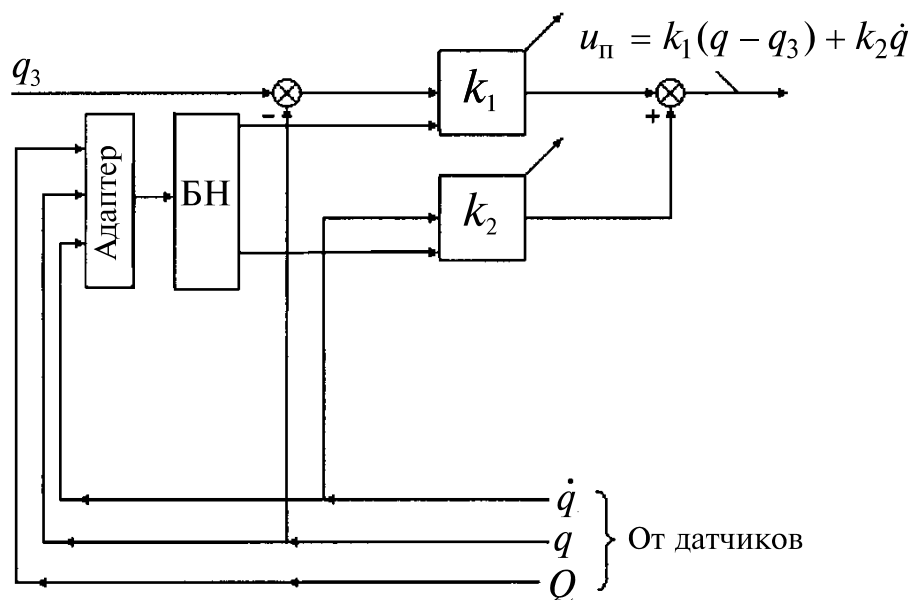


Рис. 3.6. Функциональная схема адаптивной подстройки привода

Специфическое требование к системам адаптивной подстройки приводов манипуляторов — требование к быстродействию: необходимо, чтобы корректировка качества управления осуществлялась в ходе каждого движения манипулятора, а не в результате усреднения показателей качества за несколько одинаковых программных движений. Поэтому из многих вариантов способов и схем такой подстройки в робототехнике основное применение нашла схема с

эталонной моделью. На рис. 3.7 показан один из вариантов формирования адаптером сигнала подстройки.

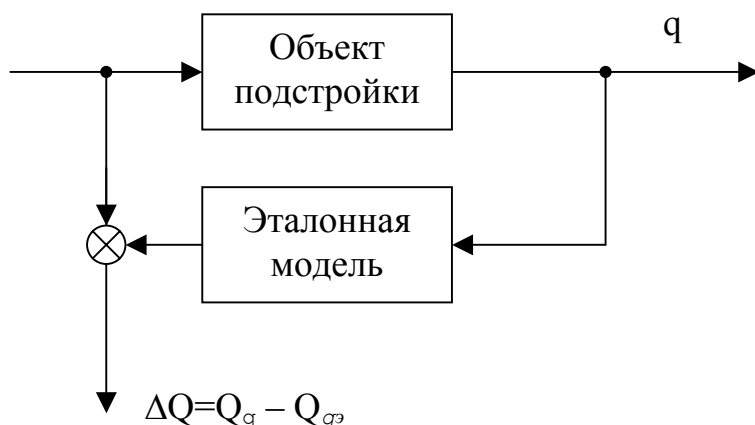


Рис. 3.7. Схема формирования сигнала адаптивной подстройки с эталонной моделью

В блоке “Эталонная модель” заложена математическая модель объекта с выбранными за эталон численными значениями его параметров. Сам объект представляет собой механическую систему, на которую воздействует подстраиваемый привод своим движущим усилием Q_g . По получаемым с датчиков обратной связи привода значениям выходных переменных q объекта путем решения обратной задачи динамики определяется входное усилие $Q_{gэ}$, которое соответствует эталонным параметрам объекта. Разность $\Delta Q = Q_g - Q_{gэ}$ фиксирует отклонение объекта от его эталонной модели. Эта разность подается на блок настройки БН для изменения в нужном направлении настройки привода, чтобы устранить ΔQ . Вопросы адаптивного управления в робототехнике будут рассмотрены в гл. 5.

Возможные упругие деформации негативно сказываются на процессе позиционирования под действием непрерывного регулятора, создавая колебания и затягивая процесс позиционирования. Способы борьбы с этим рассматривались в п. 1.2.3. Основным способом в данном случае является демпфирование этих колебаний с помощью обратных связей по величине упругих деформаций и их первой производной. Главная проблема здесь — их определение путем непосредственного измерения деформации датчиками или косвенно путем расчета ее по функционально связанным с ней измеряемыми переменным

(передаваемое через гибкое звено усилие, связанное с последним ускорение и т. п.). Вместо этого можно также применять стабилизирующие обратные связи непосредственно по этим переменным, не вычисляя деформаций.

Определенные возможности по уменьшению упругих деформаций появляются, когда требования к быстродействию достаточно ослаблены. В этом случае можно существенно уменьшить возникающие при торможении упругие колебания за счет удлинения этого процесса и соответствующего снижения ускорений.

Процесс релейного управления до включения канала непрерывного управления остановкой привода тоже существенно влияет на остаточную упругую колебательность. За счет выбора соответствующего алгоритма релейного управления в ряде случаев можно практически полностью подавить эти колебания [1].

Если требования по быстродействию невысокие и им может удовлетворить система непрерывного управления, релейное устройство управления оказывается ненужным и система управления позиционными приводами сводится к одноканальной схеме по (см. рис. 1.14). Все, что сказано выше про канал непрерывного управления, включая подстройку и влияние гибких деформаций, остается в силе и в этом случае, но со следующими дополнениями. Поскольку здесь эта система управления работает в течение всего процесса движения, всего шага от точки к точке, при ее исследовании уже нельзя априорно допускать линеаризацию. Упругие колебания будут возникать и в начале движения на этапе разгона. Но так как при позиционном управлении траектория движения между точками позиционирования не регламентируется, эти колебания могут иметь значения и должны учитываться, только если они не успеют затухнуть к концу шага и наложатся на такие колебания, возникающие при торможении.

Говоря о нестационарности рассматриваемых систем, мы не остановились на возможностях расширения области их допустимого качества в пространстве варьируемых параметров, а только обозначили эту проблему. Она будет рассмотрена в более общем виде в гл. 4 как проблема обеспечения

инвариантности качества управления к вариациям параметров и другим возмущениям.

§ 3.3. Совместное дискретное позиционное управление приводами манипулятора

Это второй уровень управления манипулятором, который при программном управлении осуществляет координированное управление приводами отдельных степеней подвижности, обеспечивающее перемещение его рабочего органа по последовательности точек, заданных в виде программной дискретной траектории, включая и ориентирующие степени подвижности, с остановкой в каждой точке в заданные моменты времени t_k . Это реализуется путем подачи на приводы заданий в виде дискретных программ $q_3(t_k)$, которые находят по $x_{p3}(t_k)$ решением обратной задачи кинематики для манипулятора

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

Такие задания, как уже говорилось, даются 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 результате отработки всеми приводами очередного шага рабочий орган манипулятора переместится в следующую точку дискретной программной траектории с заданной ориентацией.

В отличие от рассмотренного выше процесса управления отдельным приводом, при таком одновременном управлении всеми приводами возникает описанное в п. 1.2.2 новое явление — их взаимовлияние через общую механическую систему манипулятора, на которую они работают. Поскольку речь идет о программном управлении, это взаимовлияние можно учесть при

программировании путем корректировки программ и программного изменения структуры и настройки систем управления приводами.

Рассмотрим, как зависит взаимовлияние приводов от характера их относительного движения и как соответственно можно за счет корректировки этих движений воздействовать и при необходимости ослабить такое влияние. На рис. 3.8 приведена двухкоординатная дискретная траектория, реализуемая с помощью двух приводов этих координат q_1 и q_2 . Время t здесь является параметром.

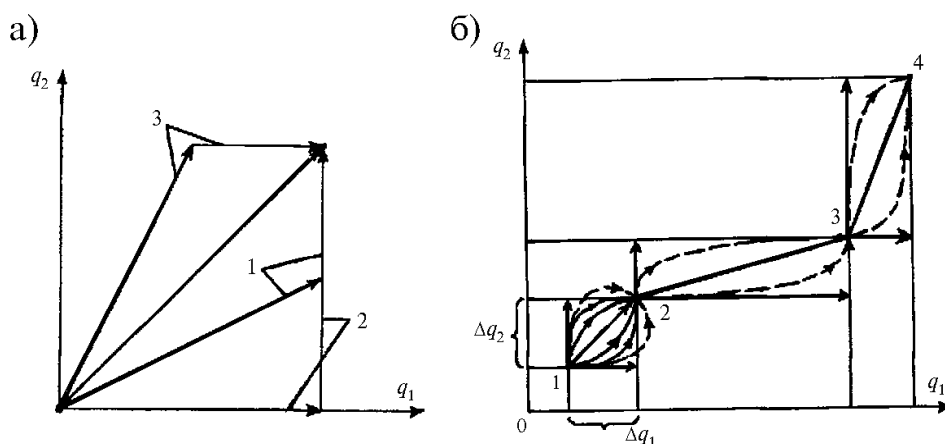


Рис. 3.8

Исследуем вначале процесс управления на кинематическом уровне, т. е. при малых скоростях движения, когда можно не учитывать инерцию. На рис. 3.8,а показаны варианты траекторий между программными точками, соответствующие разным соотношениям скоростей приводов. При увеличении скорости первого привода относительно второго траектория опускается (линия 1) в пределе до ломаной линии, состоящей из горизонтального и вертикального участков (линия 2). При увеличении скорости второго привода траектория будет, наоборот, подниматься вверх (линия 3). Очевидно, что траектория будет прямой линией при выборе значений скоростей приводов пропорционально их требуемым перемещениям. В этом случае оба привода одновременно закончат свое движение и остановятся, а траектория будет иметь минимальную длину.

Покажем, что при этом будет и минимальное взаимовлияние приводов. Действительно, если приводы тормозятся одновременно, соответственно будет снижаться и возможное их влияние друг на друга при их позиционировании в

заданных точках. Если, например, перемещение из точки 1 в точку 2 (см. рис. 3.8,б) происходит по вогнутой траектории, первый привод начнет тормозиться, когда второй привод движется еще с наибольшей скоростью. В результате качество позиционирования первого привода может быть ухудшено возмущениями со стороны второго привода.

Таким образом, чтобы минимизировать взаимовлияние приводов при их позиционировании, следует при их программировании устанавливать на каждом шаге движения их скорости пропорционально заданным перемещениям.

Этот вывод сделан при пренебрежении инерцией приводов. Ее влияние и различие в динамических характеристиках приводов скажется на траекториях на рис. 3.8,б вплоть до появления “забросов” траекторий за пределы прямоугольников, ограниченных вертикальными и горизонтальными линиями (см. пунктирные траектории между точками 1 и 2). Поэтому в этом общем случае с учетом динамики приводов для обеспечения одновременно торможения приводов могут потребоваться другие соотношения их программных скоростей чем при кинематическом подходе.

Если путем указанного выбора программных движений приводов свести к минимуму их взаимовлияния, система программного управления манипулятора распадается на практически автономные системы управления отдельных приводов, рассмотренные в предыдущем параграфе. Если анализ на компьютерной модели выявляет какие-то достаточно существенные нежелательные взаимовлияния приводов, их можно скомпенсировать перекрестными корректирующими связями, как показано выше в пункте 1.2.2.

При этом при синтезе и настройке устройств управления приводов необходимо учитывать неустойчивость механической системы всего манипулятора при изменении его конфигурации.

3.4. Общий порядок исследования динамики и синтеза алгоритмов дискретно позиционного программного управления

При исследовании и синтезе систем управления манипуляторов применяются известные методы теории автоматического управления. Вследствие сложности этого объекта управления при этом прибегают к следующим приемам упрощения задачи:

- декомпозиция (с последующим анализом отброшенных взаимовлияний и коррекцией решения);
- итеративный метод (многоходовой процесс последовательного приближения путем возврата к началу и повторного решения задачи для уточненных исходных данных);
- синтез через анализ;
- компьютерное моделирование.

Общий порядок исследования можно представить следующими этапами:

1. Составление математического описания механической системы и неварьируемых частей приводов как объекта управления.
2. Анализ этого объекта управления с целью определения его существенных для управления свойств — диапазонов возможного изменения параметров, взаимовлияний степеней подвижности, гибких деформаций.
3. Декомпозиция системы управления путем разбиения ее на системы управления отдельных приводов и их автономный синтез с фиксацией соответствующих допущений.

При этом учитываются диапазоны изменения параметров механической системы и величины полезного груза, в рамках которых должно быть обеспечено требуемое качество управления, включая точность и быстродействие. Аналогично учитываются взаимовлияния приводов заданием диапазонов соответствующих возмущений.

Как показано выше, в самом общем случае, соответствующем наиболее тяжелым требованиям к качеству управления, системы управления приводов будут двухканальными, включая релейный канал “быстрого реагирования” и непрерывный канал точного позиционирования.

Как выше указано, синтез релейного управления осуществляется на основе теории и методов оптимального управления, а непрерывного управления по линеаризованному в точках позиционирования математическому описанию с учетом диапазонов изменения варьируемых параметров. В результате находится необходимая динамическая коррекция, оптимальная настройка и при необходимости алгоритм автоматической подстройки.

4. Синтез алгоритма общесистемного второго уровня управления приводами манипулятора.

5. Анализ влияния неучтенных ранее нелинейностей и других особенностей системы и уточнение влияния упрощенно учтенных свойств, включая взаимовлияния и гибкие деформации, с корректировкой ранее полученных решений. В частности, при наличии релейных каналов управления необходимо откорректировать их алгоритмы [10]. Здесь применяются аналитические методы и численные расчеты на компьютерных моделях.

6. Выбор и отработка методов программирования системы управления. В данном случае возможно программирование либо на самом манипуляторе методом обучения либо на основе решения обратной задачи кинематики манипулятора на ЭВМ. В первом случае человек-оператор управляя последовательно отдельными приводами манипулятора через его устройство управления выводит рабочий орган манипулятора в заданные точки позиционирования и заносит в память устройства управления показания датчиков положения приводов. Совокупность этих данных и составляет управляющую программу, которая затем воспроизводится и при необходимости уточняется.

ГЛАВА 4. СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО (КОНТУРНОГО) ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

§ 4.1. Особенности непрерывного управления роботами

Типичные роботы с непрерывным (контурным) управлением — это промышленные роботы для дуговой сварки и резки, нанесения покрытий. На рис. 4.1 и 4.2 показаны примеры таких роботов. Их главное отличие от роботов с дискретным позиционным управлением заключается в движении рабочего органа манипулятора по непрерывной траектории. Сама программная траектория при этом может задаваться и в виде дискретной функции времени, т. е. квантованной, важно, что рабочий орган проходит эти точки без остановок, как при дискретном позиционном управлении.

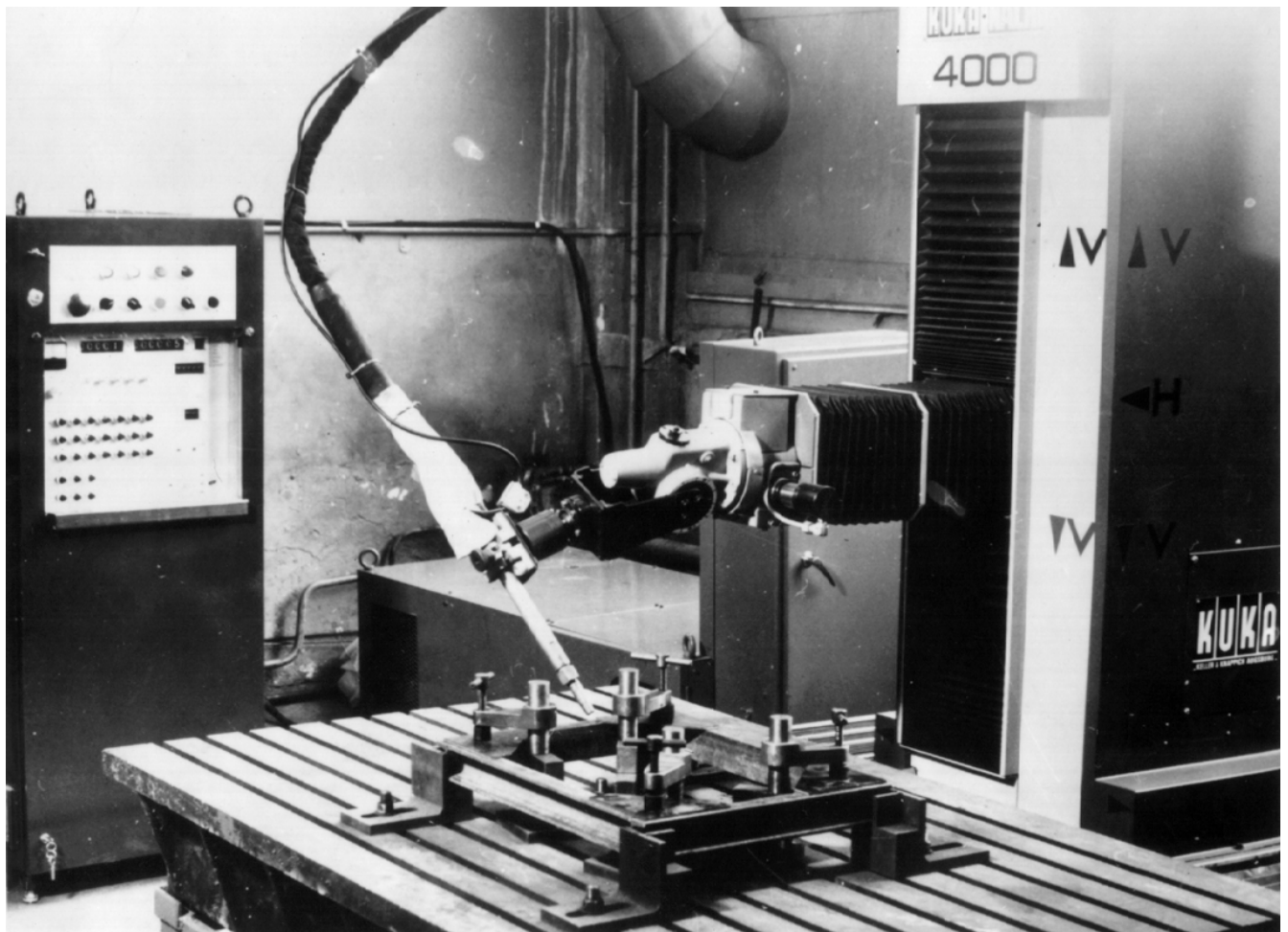


Рис. 4.1. Электрический промышленный робот для дуговой сварки с непрерывным программным управлением фирмы КУКА

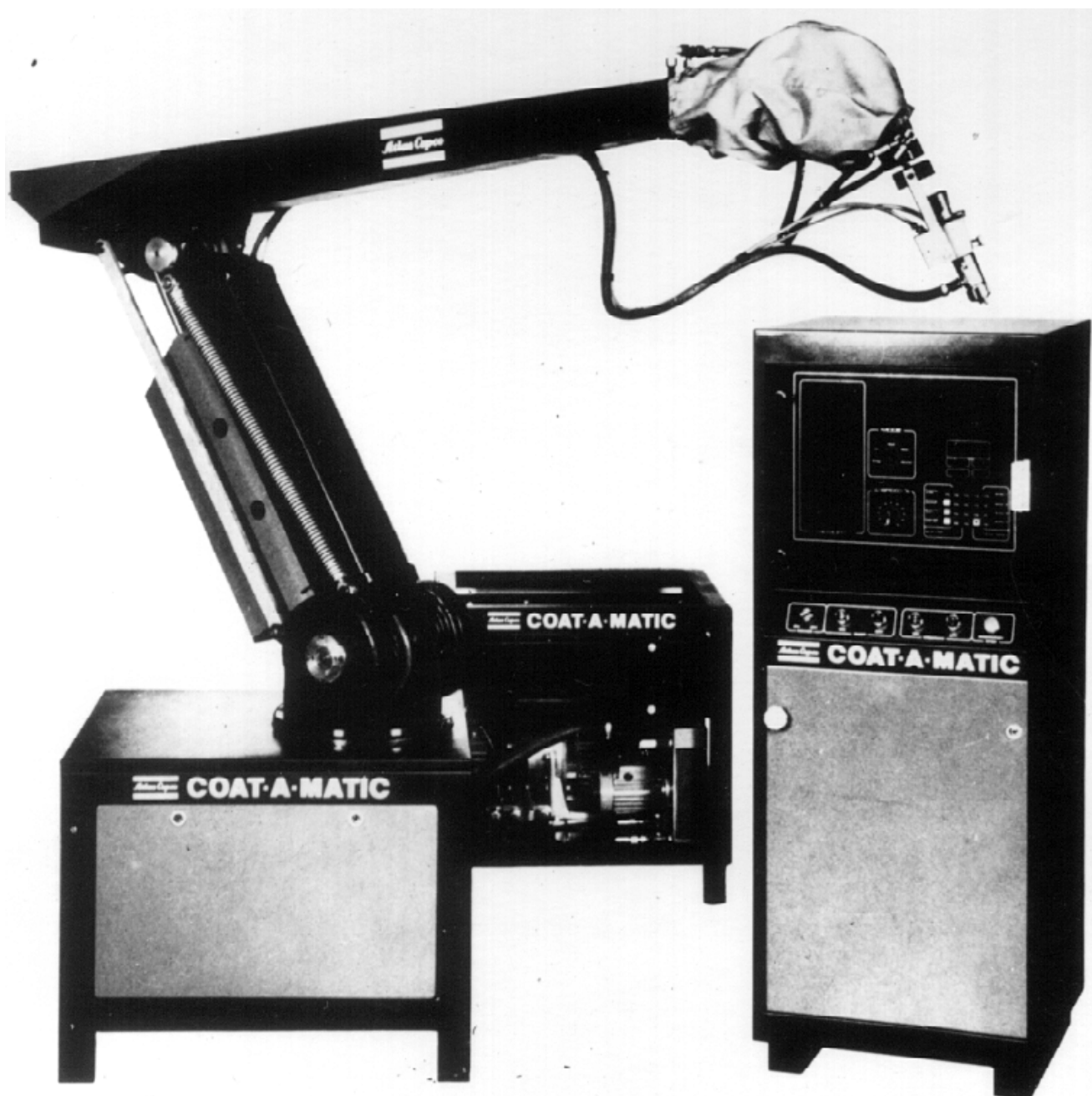


Рис. 4.2. Гидравлический промышленный робот для нанесения покрытий пульверизатором с непрерывным программным управлением COAT-A-MATIC

Отсюда принципиальное отличие контурных систем управления от дискретных позиционных в отношении требований к точности, устойчивости и качеству управления. Если в дискретных позиционных системах существенна только статическая точность в точках позиционирования, то в контурных требуется динамическая точность движения по заданной траектории. Соответственно, если в дискретных позиционных системах устойчивость и качество переходных процессов оцениваются только в этих точках, при контурном управлении необходимо соответственно обеспечить эти требования непрерывно по всей траектории движения.

В контурных системах, например, тоже может применяться дуальное управление, как в позиционных, в виде сочетания непрерывного управления с релейным при

больших отклонениях от задания. Однако если в системах дискретного позиционного управления основное время движения приходится на релейное управление, а к непрерывному переход происходит только вблизи точек позиционирования, в системах контурного управления основным режимом является непрерывное управление, а переход к релейному осуществляется эпизодически при возникновении больших отклонений от программной траектории движения.

Эти особенности систем контурного управления приводят к принципиальному отличию их программирования, по сравнению с дискретными позиционными системами. В дискретных позиционных системах, как известно, управляющая программа, обрабатываемая приводами, — это программная последовательность точек позиционирования, в которых должна происходить остановка приводов (т. е. это статическая характеристика).

Для контурных систем управления программная траектория и реализующая ее управляющая программа — разные понятия, которые могут совпадать только в частных случаях. Действительно, если подать на приводы манипулятора программные траектории $q_3(t)$, рассчитанные по заданной программной траектории его рабочего органа $x_3(t)$ с помощью обратной задачи кинематики

$$q_3(t) = f^{-1}[x_3(t)],$$

то их отработка произойдет с неизбежным динамическим запаздыванием, как это показано на рис. 4.3. Соответствующая ошибка Δq_i будет тем больше, чем выше скорость движения.

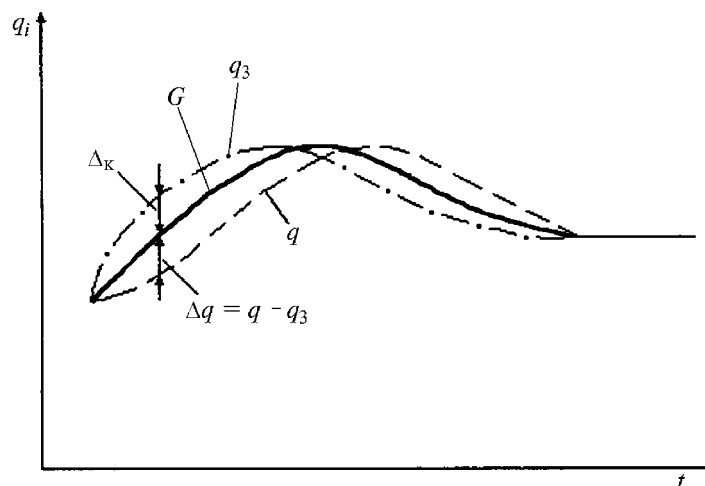


Рис. 4.3. Динамическое запаздывание $q(t)$ при отработке программной траектории $q_3(t)$

Способы ее уменьшения известны из теории автоматического управления. Во-первых, поскольку речь идет о программном управлении, эту ошибку можно устранить добавкой к программной траектории заранее рассчитанной динамической коррекции, которая должна скомпенсировать указанное динамическое запаздывание. В результате, как показано на рис. 4.3, приводы будут отрабатывать управляющие программы

$$G(t) = q_3(t) + \Delta_k(t),$$

где $\Delta_k(t)$ — динамическая коррекция.

Управляющая программа может рассчитываться на ЭВМ путем решения обратной задачи динамики по математическому описанию манипулятора (1.14) и приводов (1.24):

$$\left. \begin{aligned} A(q) \ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) &= Q_g, \\ Q_g &= A_n(u_n), \end{aligned} \right\}$$

где $A_n(u_n)$ — оператор системы приводов, например в виде (1.30); u_n — вектор управляющих воздействий. Подставив в эту систему уравнений вместо $q(t)$ заданную программную траекторию $q_3(t)$, найденную по $x_{p3}(t)$ решением обратной задачи кинематики, находим искомую управляющую программу $u_{пз}(t)$.

Управляющую программу можно найти и экспериментально методом обучения на реальном роботе. Существуют два способа такого обучения. Первый — путем непрерывного перемещения рабочего органа манипулятора рукой оператора с записью сигналов с датчиков обратной связи приводов. Для того чтобы двигатели манипулятора не препятствовали этому, конструкция манипулятора должна предусматривать возможность их отсоединения от механической системы манипулятора.

Второй способ основан на последовательной установке рабочего органа с помощью приводов в точках, заранее выбранных на программной траектории, как при программировании систем дискретного позиционного управления, и применении интерполятора для формирования заданной траектории между этими точками при воспроизведении запрограммированного движения. Необходимая динамическая коррекция при программировании таким методом обучения также подбирается экспериментально путем многократного пробного воспроизведения требуемой траектории за заданное время.

Второй путь уменьшения динамической ошибки — это повышение быстродействия самой системы автоматического управления введением в нее динамической коррекции, которая будет формироваться в реальном масштабе времени в ходе отработки подаваемой на вход системы исходной программной траектории. Конечно, этот путь значительно сложнее, поскольку мы игнорируем априорное знание подлежащей реализации траектории, но зато он упрощает программирование робота, сводя его только к кинематическому синтезу программной траектории для приводов.

В целом различают два варианта программирования систем контурного управления — кинематический и динамический. Первый вариант соответствует малым скоростям движения рабочего органа, примерно менее 0,5 м/с, когда динамической погрешностью отработки программной траектории при имеющемся быстродействии системы управления можно пренебречь. Вторым вариантом относится к большим скоростям, когда необходимо вводить динамическую коррекцию в управляющую программу, т. е. при ее аналитическом расчете решать обратную задачу динамики, а не кинематики, как в первом варианте.

Развитием описанных способов программирования методом обучения стало применение в них современных способов управления манипуляторами со стороны человека-оператора (см. гл. 6). Так, программирование путем перемещения рукой

оператора рабочего органа манипулятора может осуществляться с помощью трехступенной задающей рукоятки, которая укрепляется на время программирования на рабочем органе манипулятора. Оператор, смещая эту рукоятку с нейтрального положения в нужном направлении осуществляет перемещение рабочего органа манипулятора, управляя с помощью контактов задающей рукоятки приводами последнего через его устройство управления. В таком варианте этот способ программирования применим ко всем манипуляторами, не требует отсоединения двигателей приводов, как в его исходном варианте.

Усовершенствование способа программирования обучением путем управления приводами манипулятора через его устройство управления обычно с помощью переносного пульта состоит в следующем. На время программирования на рабочий орган манипулятора укрепляется передающая телевизионная камера, выводимая крупным планом на экран персонального компьютера изображение объектов внешней среды, с которыми манипулятор должен взаимодействовать. Управление манипулятором осуществляется через компьютер с помощью мыши или такой же задающей рукоятки, как в предыдущей системе. Преимущество этого варианта системы программирования — в значительно больших быстродействии и точности.

§ 4.2. Непрерывное управление отдельным приводом

Типовая схема привода с непрерывным контурным управлением такая же, как и при дискретном позиционном управлении (см. рис. 1.14). Однако режим ее работы и соответственно основные требования к ней (как показано выше) совершенно другие, поскольку это система непрерывного действия, которая должна непрерывно поддерживать соответствие заданию не только перемещения q на выходе, но и его скорости $\dot{q}$.

Для уменьшения отклонений от программной траектории при больших возмущениях, как уже отмечалось, система непрерывного управления может быть дополнена релейной приставкой, подключающейся при превышении рассогласования $\Delta q_I = q_I - q_{\text{З}}$ определенной выбранной величины. (Вопрос о синтезе алгоритма работы такой приставки был рассмотрен в § 3.2).

Рассмотрим алгоритмы динамической коррекции привода, обеспечивающие необходимую компенсацию ошибки воспроизведения заданной программной траектории. Как известно из теории автоматического управления, возможны следующие способы такой коррекции:

коррекция программной траектории;

последовательная коррекция в прямом канале входного воздействия;

параллельная в канале обратной связи по ошибке воспроизведения входного сигнала.

Первый способ применим только в системах программного управления и рассмотрен в § 4.1. Здесь будут рассмотрены два других способа динамической коррекции, имеющих более общее применение.

4.2.1. Непрерывное управление приводом с последовательной коррекцией

Рис. 4.4 иллюстрирует идею последовательной коррекции: необходимая динамическая добавка $\Delta_k(t)$ к программной траектории определяется в реальном масштабе времени по входному воздействию в виде программной траектории q_3 и добавляется к нему. Пунктиром выделено соответствующее последовательное корректирующее звено, которое по входному воздействию q_3 выдает управляющее воздействие $u_{пз}$. Практически эта операция может осуществляться и без определения величины Δ_k , а решением обратной задачи динамики сразу может быть найдена $u_{пз}$, т. е. управляющая программа.

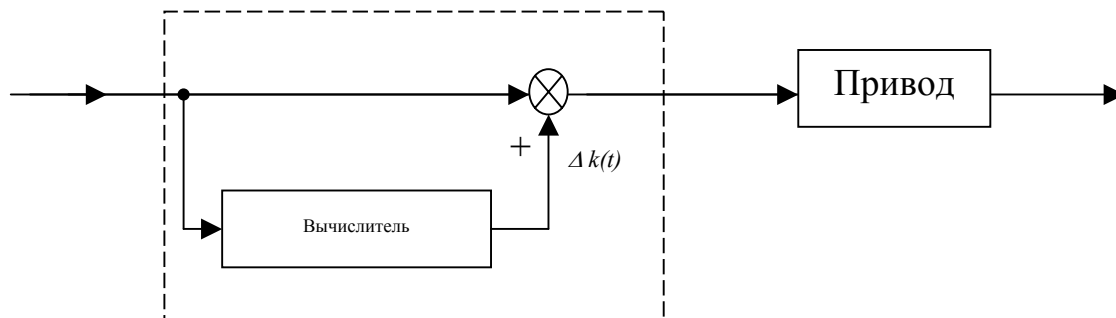


Рис. 4.4. Последовательная динамическая коррекция привода

По существу такое последовательное корректирующее звено осуществляет компенсацию инерционности и неидеальности привода в целом, в результате чего и должно обеспечиваться равенство $q = q_3$. Поэтому это звено часто называют компенсатором. Из последнего условия оператор этого звена A_k должен быть обратным оператору привода, т. е.

$$A_k = A_{п}^{-1}.$$

Тогда общий оператор привода с компенсатором будет $A_k A_{п} = 1$, т. е. привод должен без искажения повторять на выходе q входной сигнал q_3 . Более подробно компенсаторы рассмотрены в § 4.4 при описании совместного управления приводами манипулятора с учетом их взаимовлияния.

4.2.2. Непрерывное управление приводом с коррекцией с помощью обратных связей

Перейдем ко второму способу динамической коррекции с помощью обратных связей. По существу, в типовой схеме привода (см. рис. 1.9) уже существует такая внутренняя обратная связь по скорости, но эта коррекция является типовым минимумом, необходимым для обеспечения качества переходных процессов. При

достаточно малых скоростях программного движения такая коррекция вполне может оказаться достаточной, в том числе и для обеспечения интересующей нас сейчас динамической точности отработки входного воздействия. Однако с ужесточением требований к быстродействию соответственно может потребоваться дополнительная коррекция. Ее алгоритм может быть синтезирован по общим методам теории автоматического управления или по более специализированным методам синтеза приводов с использованием уже отработанных типовых решений. В частности, для минимизации больших отклонений (как сказано выше) непрерывный регулятор дополняется релейной приставкой.

Приводы манипуляторов имеют три особенности, которые надо учитывать. Это возможное наличие гибких звеньев; нестационарность нагрузки со стороны механической системы манипулятора и наличие взаимовлияний приводов (третья особенность будет рассмотрена в § 4.3).

Упругие деформации и вызываемые ими колебания при непрерывном управлении могут возникать при резких изменениях направления или скорости движения по траектории, а так же от внешних возмущений. При достаточно плавной траектории и без значительных возмущений они практически отсутствуют.

Методы борьбы с этими колебаниями уже были рассмотрены в гл. 3. В части управления это прежде всего введение в устройство управления привода дополнительных настроечных параметров по числу дополнительных степеней свободы, обязанных упругим деформациям, которые предназначены для подавления упругих колебаний. Последняя возможность основана на том, что частоты этих колебаний обычно выше спектра частот программных движений. Поэтому при синтезе и настройке приводов это можно сделать вначале в расчете на жесткую механическую систему, а затем, введя в математическую модель гибкие звенья, осуществить синтез и настройку контуров с указанными дополнительными варьируемыми параметрами, используя возможность их частотной отстройки от программного движения.

Для получения дополнительных настроечных параметров вводятся демпфирующие обратные связи по упругим деформациям (например, по их скорости, что создает искусственную вязкость), по связанным с ними другим переменным или с применением “наблюдателей”, осуществляющих расчет этих деформаций по этим переменным [1].

Другим, тоже уже упоминавшимся, способом снижения упругих колебаний является коррекция самих программных траекторий путем их сглаживания, чтобы не возбуждать этих колебаний.

Наконец, иногда можно с этой же целью при резких изменениях программной траектории снижать быстродействие привода программно или с помощью последовательного корректирующего звена, идя при этом на соответствующее увеличение динамической погрешности, но зато сбивая большие по величине и продолжительности упругие колебания. В результате в целом погрешность отработки программной траектории может быть существенно снижена.

Рассмотрим проблему нестационарности параметров нагрузки приводов, которой является механическая система манипулятора, включая полезную нагрузку его

рабочего органа. Задача заключается в том, чтобы во всем диапазоне изменения варьируемых параметров обеспечить не только устойчивость, но и требуемое качество переходных процессов и точность отработки программной траектории. Способы решения этой задачи очевидны: расширение области устойчивости и качества в пространстве варьируемых параметров за счет соответствующей коррекции, подстройка устройства управления привода и, наконец, переход к принципиально новым алгоритмам управления, обеспечивающим робастность приводов, т. е. структурную нечувствительность качества управления к изменениям параметров системы.

Первый способ применим при достаточно небольших диапазонах изменения варьируемых параметров, и таким образом, не дает общего решения, в отличие от двух следующих. Его реализация требует решения двух задач: синтеза алгоритма управления с выбором коррекции, обеспечивающего устойчивость и требуемое качество управления во всем диапазоне изменения варьируемых параметров, и определения оптимальной для этого диапазона фиксированной настройки привода. О первой задаче уже говорилось, остановимся на второй (рис. 4.5) [11]. Приведены три зависимости некоторого критерия качества управления J приводом, минимум которого соответствует наилучшему качеству управления, от варьируемого в пределах от $M_{\min}$ до M_m параметра μ (например, это может быть момент инерции нагрузки). Кривые 1 и 2 соответствуют двум фиксированным значениям параметра μ — μ_1 и μ_2 , а кривая 3 — переменной настройке, оптимальной для каждого значения μ . Естественно, кривые 1 и 2 должны касаться кривой 3 в точках, соответствующих значениям μ_1 и μ_2 . Задача заключается в том, чтобы выбрать некоторую фиксированную настройку, обеспечивающую наилучшее качество управления во всем заданном диапазоне изменения параметра μ от $\mu_{\min}$ до μ_m . Такую настройку $\mu_{\text{опт}}$ можно найти, например, из условия минимума площади между кривой $J(\mu_{\text{опт}})$ (пунктирная кривая 4) и кривой 3, т. е. минимума интеграла от разности соответствующих выражений для $J(\mu)$.

Другой способ обеспечения качества управления при изменении параметров системы — подстройка привода. Этот способ позволяет обеспечить более высокое качество управления (на рис. 4.5 ему соответствует кривая 3) в большем диапазоне изменения параметров. В контурных системах применяются все виды подстройки, что и в дискретных позиционных системах (рассмотренные в § 3.2): программная подстройка, подстройка в функции от q_z или q и адаптивная подстройка (см. рис. 3.5, 3.6 и 3.7). Вместе с тем, для контурных систем, как значительно более сложных в отношении динамики, предложены и более совершенные способы подстройки, основанные на алгоритмах искусственного интеллекта (они будут рассмотрены в гл. 5, посвященной системам адаптивного и интеллектуального управления).

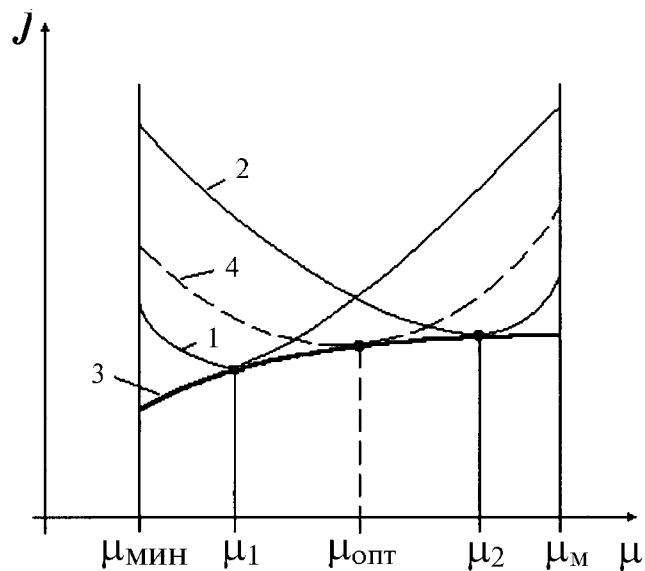


Рис. 4.5. Зависимость критерия качества управления J приводом от варьируемого параметра μ

§ 4.3. Робастные системы непрерывного управления приво­дов

Рассмотрим последний из перечисленных способов управления приво­дов с существенно нестационарной нагрузкой. Робастные системы управления — это системы у которых структура, т. е. алгоритм управления, обеспечивает принципиальную независимость (инвариантность) качества управления от значения параметров нагрузки и возмущений. Для приводов манипуляторов это означает нечувствительность к изменениям конфигурации их механической системы,

изменениям полезной нагрузки в рабочем органе и к взаимовлияниям приводов. Все это означает, что такое управление делают приводы для уровня их совместного управления автономными и стационарными. Далее будут рассмотрены типы таких систем управления: система управления с обратной связью по ускорению; релейная система управления.

4.3.1. Системы непрерывного управления с обратной связью по ускорению

Ускорение, как известно, является признаком и мерой нарушения баланса сил, действующих на техническую систему, т. е. мерой любого возмущения — внешнего или внутреннего (включая параметрическое), нарушающего установившееся состояние системы. Поэтому регулятор с обратной связью по ускорению должен парировать любые возмущения, стабилизируя режим управляемого им объекта. Эта идея, предложенная и реализованная еще в прошлом веке Сименсами в регуляторе скорости турбины, возродилась в наше время в робототехнике, где оказалась весьма плодотворной для создания робастных систем управления.

На рис. 4.6 приведена основанная на этом принципе схема системы управления привода, предложенная П.Д. Крутько [12].

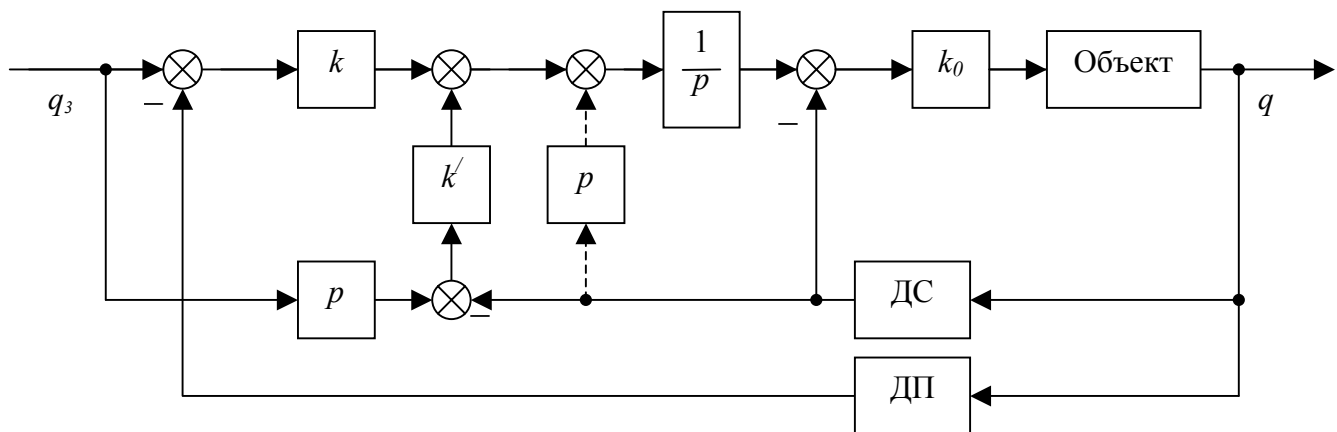


Рис. 4.6. Схема системы управления с обратной связью по ускорению

Обратная связь по ускорению показана пунктиром. Поскольку в прямом канале имеется интегрирующее звено, то эквивалентное преобразование исходной схемы путем переноса выхода обратной связи за это звено позволяет обойтись без сигнала по ускорению, что упрощает схему до варианта, изображенного сплошными линиями. Поэтому хотя в окончательном виде схема не содержит обратной связи по ускорению, она реализует именно этот принцип. Формально

схема представляет собой вариант обычного ПИД-регулятора с программно задаваемой установкой q_3 . При достаточно сильной скоростной обратной связи, эквивалентной в исходной схеме обратной связи по ускорению, последняя будет парировать все возмущения, включая параметрические, поддерживая равенство $q(t) = q_3(t)$.

Эта схема синтезирована П.Д. Крутько аналитически, исходя не из изложенного выше реализуемого ею физического принципа, а из принципа робастности. Поэтому главный результат этого синтеза — в методике определения численных значений настроечных коэффициентов схемы, обеспечивающих эту робастность по устойчивости и качеству управления. Поясним порядок ее синтеза.

Пусть объект управления описывается дифференциальным уравнением второго порядка произвольного вида — в общем случае нелинейным и нестационарным — с неизвестными параметрами. От уравнения требуется только одно — разрешимость относительно старшей производной $\ddot{q}$, т. е. возможность представить его в виде

$$\ddot{q} = F(\dot{q}, q, u_n), \quad (4.1)$$

где u_n — входное управляющее воздействие на объект. Заметим, что для приводов манипуляторов это всегда выполнимо, так как в уравнении (1.14) и (1.31) $\ddot{q}$ — множитель. (Для описываемой процедуры синтеза алгоритма управления необходимо, кроме того, чтобы существовала положительная производная $\frac{\partial F}{\partial u_n}$, что тоже всегда имеет место, так как u_n — входное управляющее воздействие на объект.)

Поставим задачу синтезировать алгоритм управления для u_n по условию, чтобы переходные процессы на выходе объекта соответствовали некоторой эталонной модели в виде стационарного линейного объекта второго порядка с желаемым качеством переходных процессов. (Заметим, что для физической реализуемости искомого решения надо, чтобы инерционность этой модели была близка инерционности искомого объекта.). Уравнение переходных процессов в такой эталонной модели имеет вид

$$\ddot{q} + k'\dot{q} + kq = 0.$$

Напомним, что к такому условию оптимальности приводят и интегральные квадратичные критерии качества переходных процессов.

Запишем уравнение переходных процессов в эталонной модели для приращений в виде

$$\Delta\ddot{q} = F_3(\Delta\dot{q}, q) = -k'\Delta\dot{q} - k\Delta q, \quad (4.2)$$

где $\Delta q = q - q_3$.

Отсюда

$$\ddot{q} = F_3 + \ddot{q}_3. \quad (4.3)$$

Решения поставленной задачи найдем, потребовав, чтобы при $t \rightarrow \infty$ F , т. е. $\ddot{q}$, стремилось к последнему выражению: $F_3 + \ddot{q}_3$. Это обеспечит алгоритм астатического управления

$$u_n = k_0 \int_0^t [F - (F_3 + \ddot{q}_3)] dt, \quad (4.4)$$

соответствующий структурной схеме, приведенной на рис. 4.7.

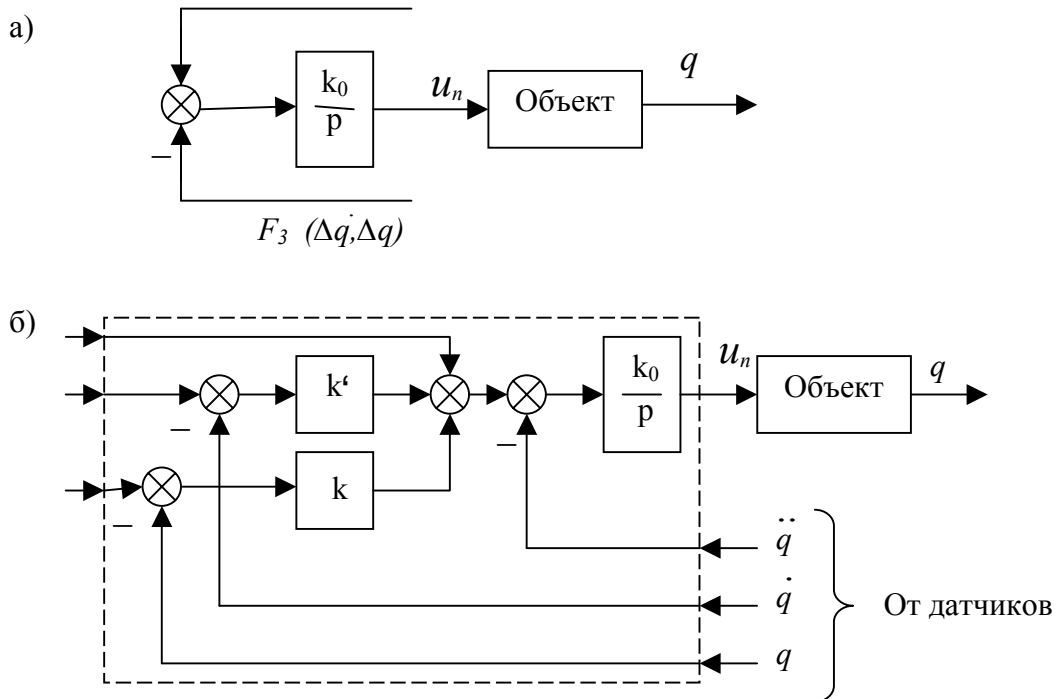


Рис. 4.7. Синтезированная структурная схема управления по ускорению

Здесь с учетом выражений (4.1) и (4.2)

$$u_n = \frac{k_0}{p} (\Delta \ddot{q} + k' \Delta \dot{q} + k \Delta q). \quad (4.5)$$

Эта схема эквивалентным преобразованием путем переноса воздействий по $\ddot{q}$ и $\dot{q}$ за интегрирующее звено приводится к окончательному виду (см. рис. 4.6).

Как следует из изложенного, в основе выполненного синтеза лежит идея управления по эталонной модели, когда за счет сильного управления объектом последний ведет себя как эта модель. Этим и обеспечивается независимость качества управления не только от численных значений параметров объекта, но и от его структуры. Действительно, при выводе алгоритма управления не использовалось уравнение объекта управления.

Значения коэффициентов настройки определяются следующими условиями:

Контур гибкой обратной связи по ускорению (по скорости за интегрирующим звеном) должен иметь быстродействие в 5 – 6 раз больше, чем внешний контур по q , чтобы отработка приводом задания $q_3(t)$ происходила на фоне реализуемой гибкой обратной связью робастности привода; это обеспечивается выбором значения коэффициента k_0 .

Желаемое качество переходных процессов определяется соотношением коэффициентов k и k' . Например, как известно из теории автоматического управления, поскольку это коэффициенты линейного уравнения второго порядка, то при $k' = \sqrt{2k}$ переходная характеристика будет апериодической с перерегулированием не более 5%. При этом ее длительность будет равна примерно $3/\sqrt{k}$. Последовательная динамическая коррекция в виде прямого воздействия по $\ddot{q}_k$ (эквивалентное воздействию по $\ddot{q}_k$ на интегрирующее звено на рис. 4.7,а) не имеет принципиального значения, так как не влияет на робастность и устойчивость привода. Ее назначение — повышение быстродействия отработки задающего воздействия q_3 .

Приведенный синтез, а, следовательно, и приведенная схема (см. рис. 4.6) относятся к объекту управления второго порядка. Для приводов манипуляторов это означает допустимость пренебрежения инерционностью или самого привода, или его нагрузки. Последнее, например, часто имеет место в электроприводах с редуктором в результате приведения момента инерции двигателя к выходу редуктора (см. п. 1.2.5).

На рис. 4.8 приведена схема системы управления для объектов третьего порядка, полученная аналогичным синтезом [14]. Она отличается от схемы на рис. 4.6 добавлением в соответствии с возросшим порядком уравнения объекта эталонной модели второго интегрирующего звена.

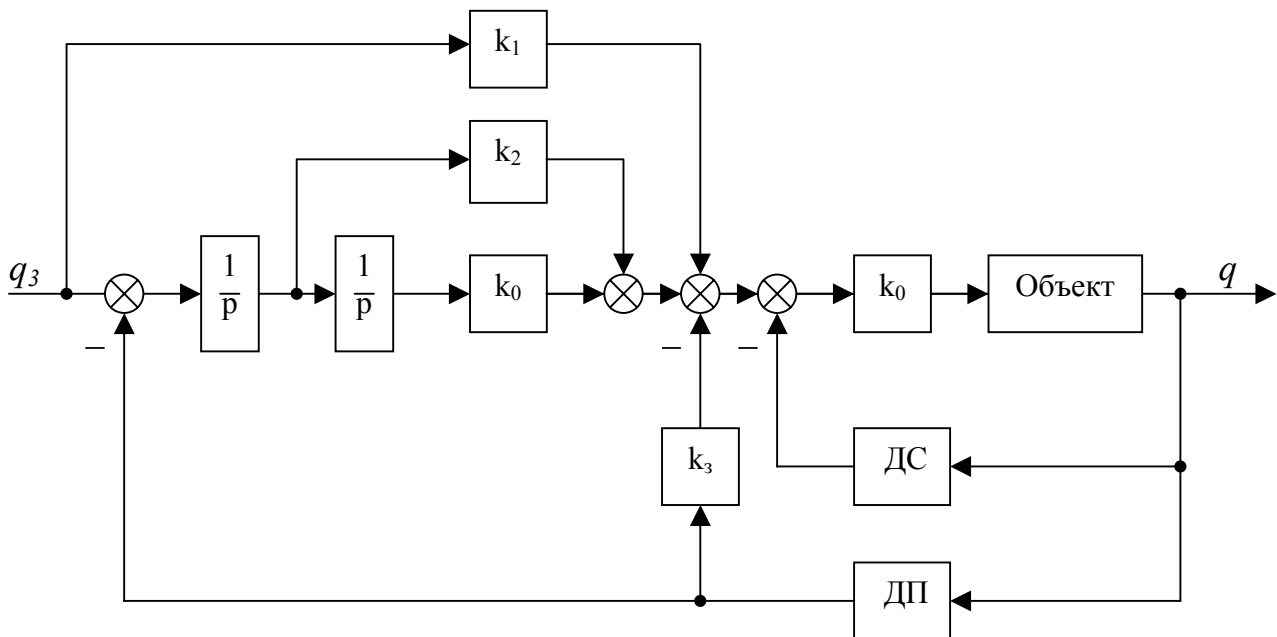


Рис. 4.8. Схема системы управления по ускорению объекта третьего порядка

4.3.2. Релейные системы управления

В теории автоматического управления используются два фундаментальных принципа управления — по возмущению и с обратной связью по отклонению от предписанного режима. 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. 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 управлением.

На рис. 4.9 дана схема такой релейной системы контурного управления приводом.

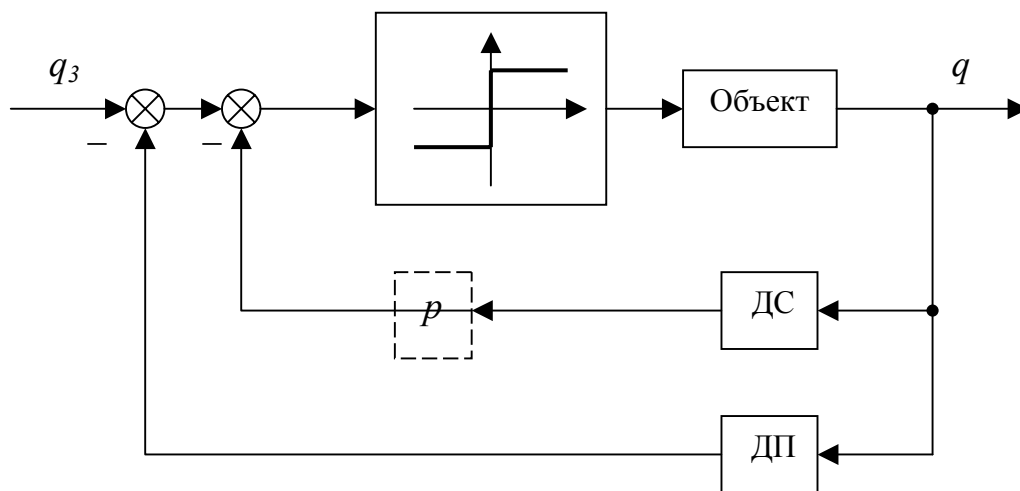


Рис. 4.9. Релейная система управления приводом

Как и в типовой схеме привода непрерывного действия, (см. рис. 1.9), здесь имеются две обратные связи — по положению q и по скорости $\dot{q}$. Е.С. Пятницким, исследовавшим эту схему с помощью прямого метода А.М. Ляпунова [13], доказана ее абсолютная устойчивость для объектов второго порядка. Для объектов третьего порядка необходимо соответственно повысить порядок гибкой обратной связи, т. е. перейти к обратной связи по ускорению. Это отражено введением дифференцирующего звена, изображенного пунктиром (см. рис. 4.9). Показано также, что в манипуляторах такие приводы ведут себя как автономные со стабильным качеством управления при изменении параметров, т. е. действительно являются робастными.

Поскольку в системах такого типа двухпозиционного релейного управления в установившемся режиме неизбежны автоколебания, необходимо принимать специальные меры для их устранения. Простейшее средство — это введение в релейную характеристику зоны нечувствительности. Оно применимо, когда

требование к точности управления допускает статическую ошибку, обязанную этой зоне нечувствительности. Другой путь — это использование скользящего режима путем повышения за счет коррекции частоты автоколебаний и соответственно снижения их амплитуды. При этом возникает задача обеспечения устойчивости скользящего режима во всем диапазоне изменения параметров системы. Кроме этого, релейное управление создает еще одну трудность: при наличии гибких звеньев в системе оно при релейных переключениях двигателя неизбежно возбуждает в приводе упругие колебания, для борьбы с которыми необходимо принимать специальные меры.

Общим для всех рассмотренных робастных систем управления является то, что обеспечиваемая ими независимость качества управления от внешних и внутренних возмущений достигается “дорогой ценой”: усилением управления и соответственно утяжелением динамического режима управляемого объекта. Поэтому эти способы управления неизбежно отрицательно сказываются на ресурсе приводов. Следовательно, применение их оправдано только в тех случаях, когда без них невозможно выполнить технические требования к динамике системы.

В заключение рассмотрения различных способов непрерывного управления приводами обратим внимание на возможность их совместного применения с целью сложения их достоинств и компенсации недостатков. Так, как уже отмечалось, совместное применение последовательной коррекции и обратных связей позволяет упростить алгоритмы обоих способов, и получить при этом качество управления, практически недостижимое при применении только одного из этих способов. Представляет интерес также дополнение рассмотренных робастных систем управления последовательной коррекцией прежде всего с целью облегчения динамического режима приводов.

§ 4.4. Совместное непрерывное (контурное) управление приводами манипулятора

Это второй уровень управления манипуляторами, основная задача которого — координация их приводов для обеспечения движения рабочего органа манипулятора по заданной траектории. Как уже отмечалось, при непрерывном движении эта задача второго уровня системы управления манипулятором намного сложнее, чем в системах дискретного позиционного управления, так как здесь необходимо контролировать не только положение рабочего органа, но и вектор его скорости, чтобы обеспечить движение по программной траектории.

Алгоритм совместного управления приводами зависит от алгоритмов управления отдельными приводами, возможные варианты которых были рассмотрены в § 4.3.

Если приводы имеют робастные системы управления (когда приводы автономны и не требуют подстройки), функция уровня совместного управления сводится к минимуму — выдаче на приводы программных траекторий $q_{iz}(t)$. Синтез этих траекторий осуществляется на этапе программирования

(аналитически — путем решения обратной задачи кинематики или экспериментально — методами обучения).

Если приводы неробастные, но в них есть динамическая коррекция программного движения, тоже позволяющая подавать на них задания непосредственно в виде программной траектории $q_{iz}(t)$, функция уровня совместного управления дополняется только задачей коррекции, в пределах компенсации взаимовлияния приводов. То же относится и к варианту, когда в приводах нет указанной динамической коррекции, но она вводится в управляющую программу.

Наконец, если в приводах нет динамической коррекции и она отсутствует в управляющей программе, т. е. на приводы поступает программная траектория $q_{iz}(t)$, функция второго уровня управления дополняется задачей осуществления в реальном времени требуемой динамической коррекции программных траекторий приводов.

Рассмотрим способы такой коррекции на общем системном уровне, т. е. способы последовательной коррекции и с помощью обратных связей, как ранее это было сделано на уровне отдельного привода. При этом выходными переменными здесь соответственно являются вектор положения рабочего органа x_p или кинематически связанный с ним вектор $q(q_1, q_2, \dots, q_n)$ и вектор усилия на рабочем органе Q_p .

4.4.1. Системы совместного контурного управления с последовательной коррекцией (с компенсатором)

Рассмотрим такие системы, какие раньше были рассмотрены для отдельного привода, но только для манипулятора в целом. Рис. 4.10,а иллюстрирует эту задачу, которая получила название компенсатора последовательной коррекции. Здесь A_m — известный оператор манипулятора с приводами; A_k — подлежащий определению оператор последовательного звена. Найдем выражение для A_k из условия, чтобы обеспечить равенство $q(t) = q_3(t)$. Очевидно, что это будет иметь место, если $A_k A_m = 1$, т. е. при $A_k = A_m^{-1}$. Отсюда можно найти выражение для A_k решая обратную задачу динамики для уравнения манипулятора с приводами.

$$\left. \begin{aligned} A(q) p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= Q_g, \\ Q_g &= A_n(u_n), \\ u_n &= A_k(q_3), \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

где A_n — оператор системы приводов. Отсюда, подставив $q = q_3$, находим:

$$u_n = A_n^{-1} [A(q) p^2 q_3 + b(pq, q) + c(q)]. \quad (4.7)$$

На рис. 4.10,б приведена соответствующая структурная схема. Здесь значок $\hat{}$ над $A(q)$, $b(pq, q)$, $c(q)$ и A_n означает оценку этих выражений, т. е. принятые в схеме компенсатора их математические модели. Показанную здесь схему компенсатора можно было бы изобразить сразу по равенству $A_k = A_m^{-1}$ как инверсию оператора манипулятора. (На этом основано еще одно название устройства такой коррекции — “инверсный регулятор”.)

В схеме компенсатора (см. рис. 4.8,б) звено A_n^{-1} соответствует рассмотренному в п. 4.2.1 компенсатору привода, но уже в виде инверсии оператора A_n системы всех приводов манипулятора. Звено $A(q)$ компенсирует инерционность механической системы манипулятора и взаимовлияния ее степеней подвижности, описываемые этой матрицей, а звено $[\hat{b}(pq, q) + \hat{c}(q)]$ аналогично компенсирует скоростные и гравитационные силы.

Имеющиеся в схеме компенсатора воздействия по $\dot{q}$ и 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. Заметим, что для систем программного управления эта подстройка компенсатора может производиться в функции не только векторов $\dot{q}$ и q , но связанных с ними программной траекторией q_k и q_3 или t , т. е. здесь принципиально применимы все способы подстройки, которые были рассмотрены в п. 4.2.2 для отдельных приводов. Здесь может быть применена и рассмотренная там адаптивная подстройка в функции от контролируемого качества

процесса управления, которая будет компенсировать также и неточности математической модели манипулятора.

Воздействие u_n на выходе компенсатора, определяемое выражением (4.7), — это поступающая на входы приводов управляющая программа, которая синтезируется компенсатором путем решения обратной задачи динамики для манипулятора, но не заранее, о чем говорилось в § 4.1, а в реальном масштабе времени в темпе поступления на вход системы заданной программной траектории $q_3(t)$.

На рис. 4.11 в качестве примера приведена схема компенсатора для рассмотренного ранее трехзвенного манипулятора с цилиндрической кинематической схемой (см. рис. 1.3,б) для простоты без учета динамики приводов. Из трех степеней подвижности φ , z и r самое простое корректирующее звено получилось в канале z в виде двойного дифференцирующего звена, которое компенсирует механическую инерцию J_z привода. Коррекция в каналах φ и r сложнее из-за наличия их взаимовлияния, описываемого звеньями b_φ и b_r . Их инверсия в компенсаторе формируется с помощью операций умножения и возведения в квадрат.

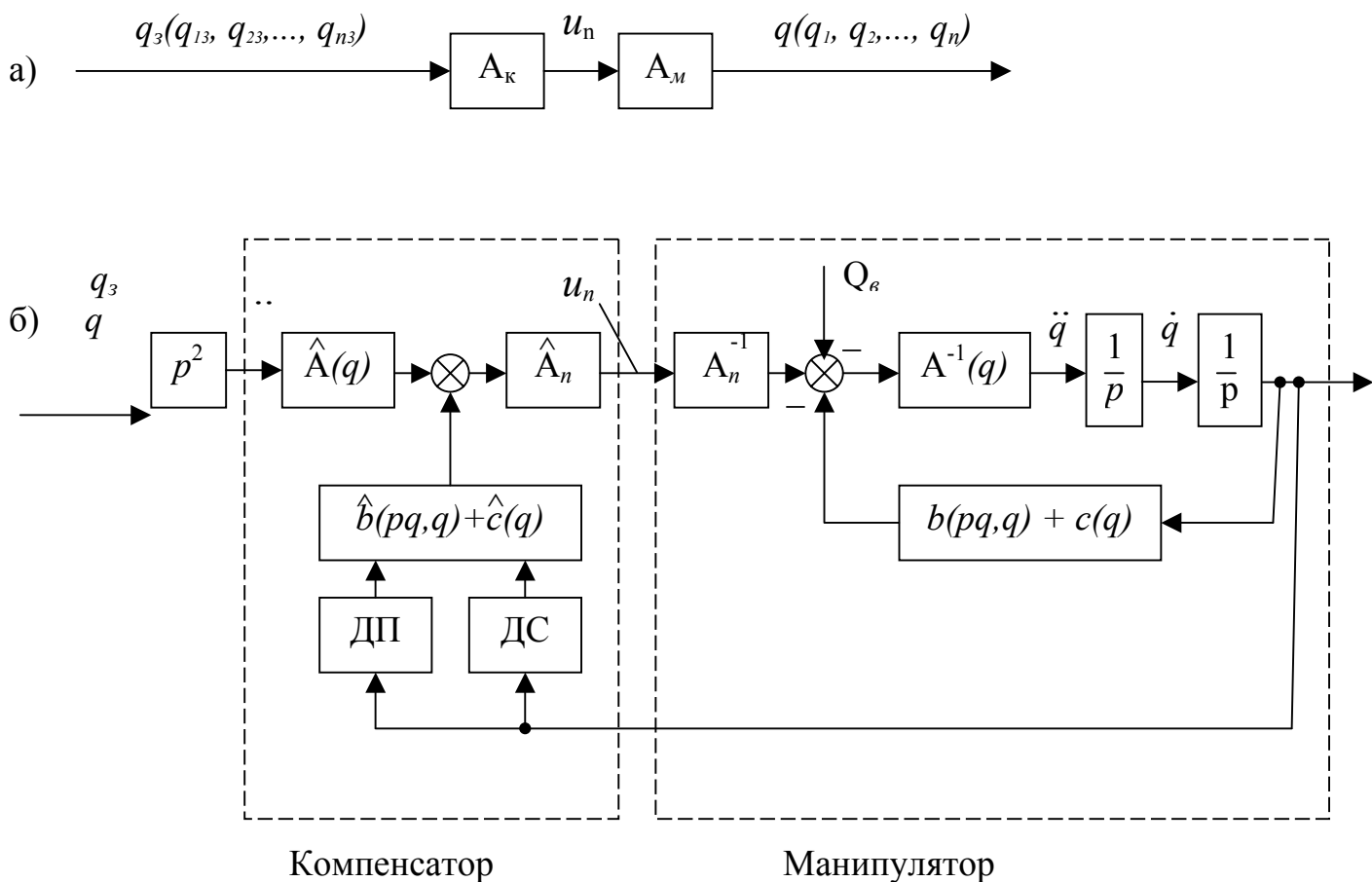


Рис. 4.10. Схема манипулятора с компенсатором

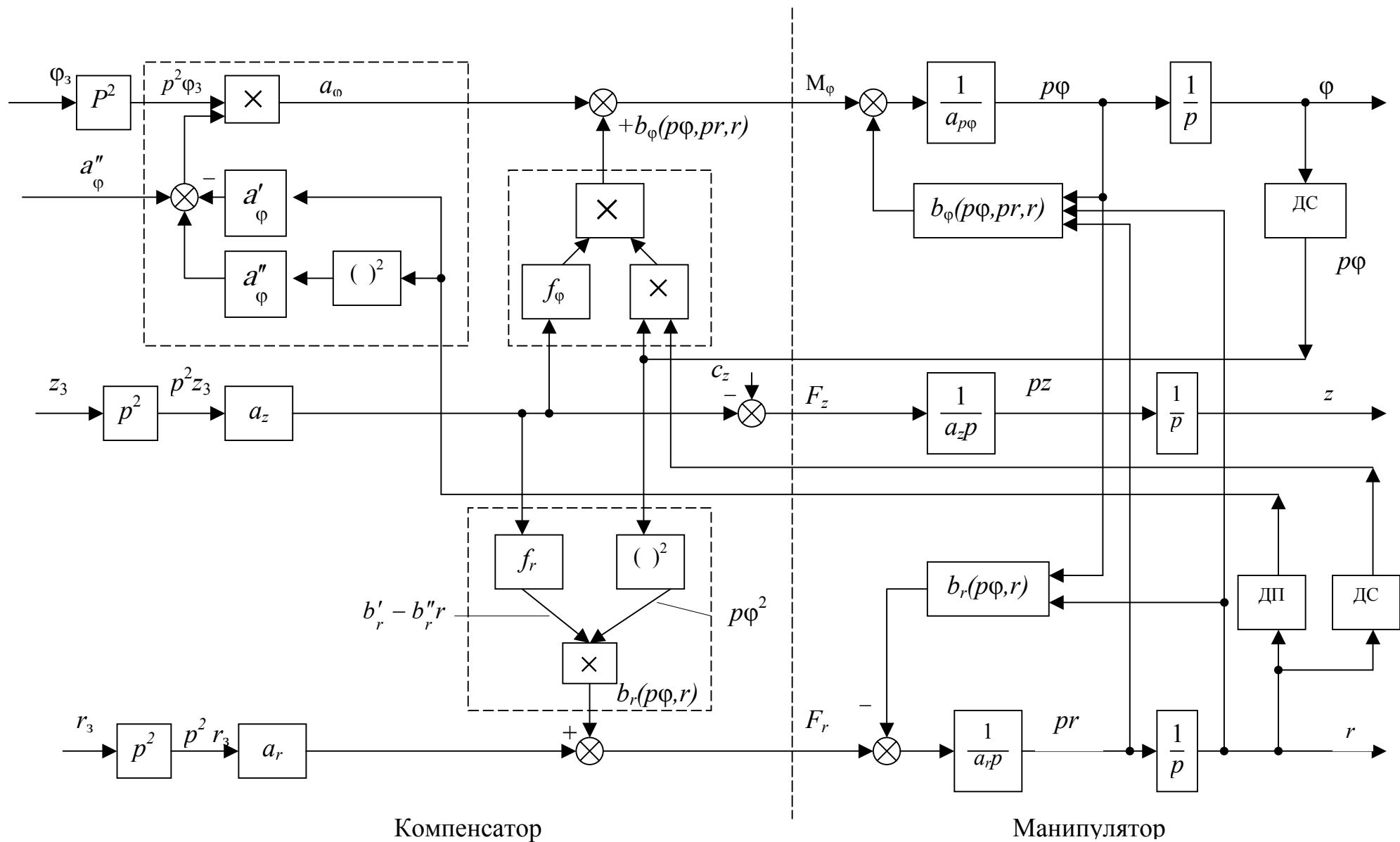


Рис. 4.11. Структурная схема трехзвенного манипулятора (рис. 1.3,б) с компенсатором.

Как следует из изложенного, компенсатор превращает манипулятор в идеальный объект, без запаздывания повторяющий в своих звеньях программную траекторию $q_3(t)$ при компенсации неустойчивости параметров и взаимовлияний, т. е. с обеспечением автономности приводов звеньев.

Однако компенсатор, как всякое последовательное корректирующее звено, имеет следующие недостатки, характерные для всех разомкнутых систем.

1. Неточность компенсации, вызванная неточностью математической модели объекта, по которой она синтезируется. В частности, компенсатор бессилен против упругих колебаний в механической системе манипулятора. Последние возникают на выходе приводов и могут подавляться только путем соответствующего локального управления каждым приводом в отдельности.

2. Ухудшение устойчивости скомпенсированного объекта, вплоть до получения неустойчивости в случае его перекомпенсации, поскольку задача компенсатора в идеале — вывести компенсируемый объект на границу устойчивости, скомпенсировав его инерционность.

3. Тяжелый динамический режим объекта, обусловленный форсирующим действием компенсатора по преодолению инерционности объекта, и по той же причине повышение уровня помех на входе приводов.

4. Компенсатор выполняет свои функции только при достаточно ограниченных входных воздействиях, при которых приводы манипулятора не выходят в насыщение, форсирующее действие компенсатора способствует этому.

Можно сделать следующие выводы:

1. Настройку компенсатора следует делать с запасом в виде недокомпенсации, заведомо превышающей возможные неточности используемой при его синтезе математической модели объекта.

2. Последовательную коррекцию в виде компенсатора следует рассматривать как средство улучшения динамических свойств объекта управления, а собственно управление должно осуществляться по рассогласованию $\Delta q = q - q_3$, т. е. с помощью устройства управления с отрицательной обратной связью, в том числе и релейной для парирования больших рассогласований.

На рис. 4.12 приведена схема комбинированной системы программного управления манипулятором с компенсатором, которая соответствует последнему выводу. Схема включает в себя компенсатор, который, не давая полной компенсации, развязывает приводы, делая их практически автономными, и компенсирует в основном неустойчивость их нагрузки, снимая проблему подстройки. Поэтому устройство управления приводами может быть выполнено по простейшей типовой схеме с внутренней скоростной обратной связью по $\dot{q}$ и релейной приставкой с автономной настройкой каждого привода.

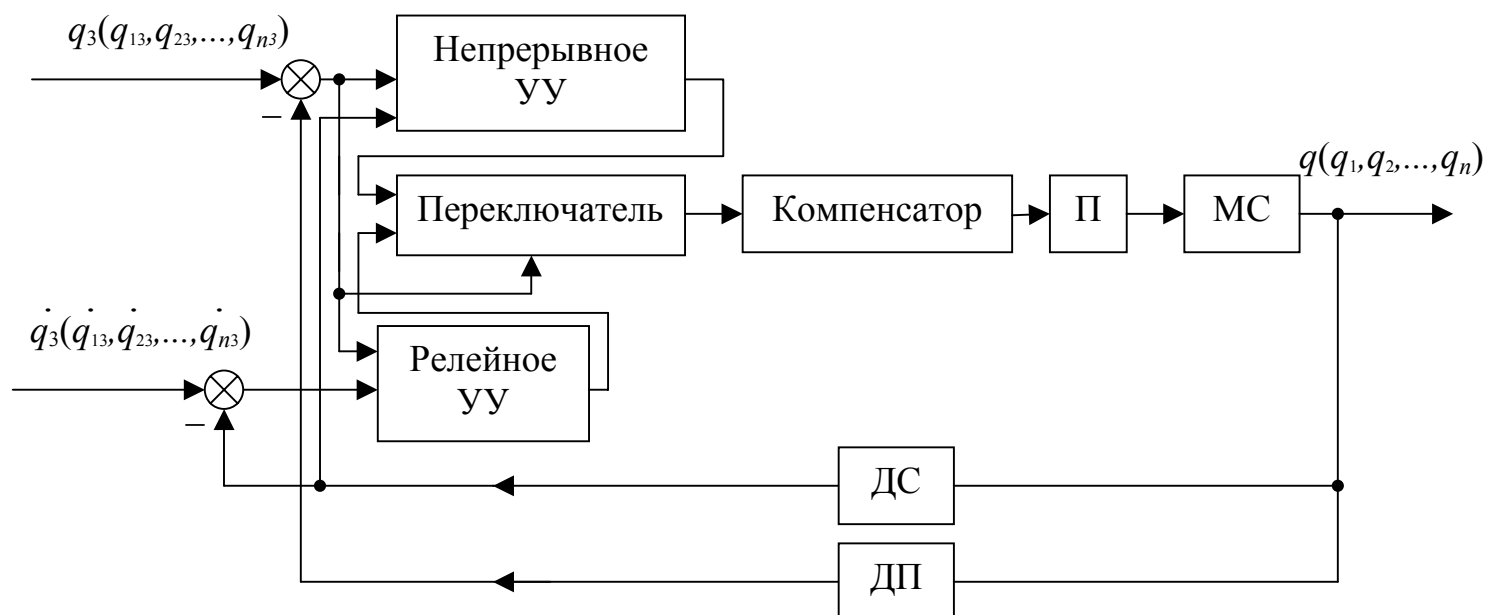


Рис. 4.12. Схема системы непрерывного управления манипулятором:

МС — механическая система, П — приводы

Если проиллюстрировать схему (см. рис. 4.12) на примере манипулятора с компенсатором (см. рис. 4.11), то на вход каждого из трех каналов в последней схеме надо ввести автономное непрерывное устройство управления по отклонению $\Delta q_i = q_i - q_{\text{в}}$ с гибкой обратной связью по q_i и с релейной приставкой, подключаемой при больших отклонениях Δq_i и действующей в функции от Δq_i и $\Delta \dot{q}_i$.

4.4.2. Системы совместного управления с динамической коррекцией с помощью обратных связей

Рассмотрим теперь возможности динамической коррекции управления манипулятором с помощью обратных связей для обеспечения отслеживания выходным вектором q входного вектора q_3 . Задача заключается в синтезе алгоритма такого управления в функции от вектора рассогласования $\Delta q = q - q_3$ и выяснении его возможностей в отношении качества отработки q_3 .

Рис. 4.13,а иллюстрирует эту задачу. Здесь A_p — подлежащий определению оператор устройства управления по Δq манипулятором с оператором A_m . Такое устройство можно назвать программным регулятором, задача которого — обеспечить устойчивость и требуемое качество удержания рабочего органа манипулятора на программной траектории.

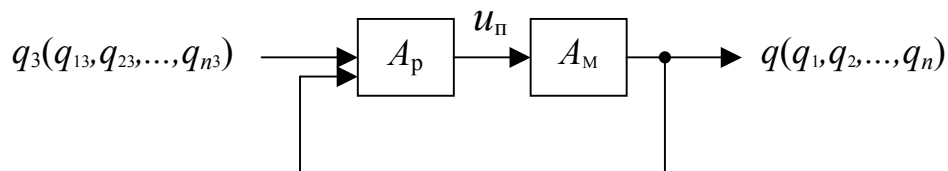
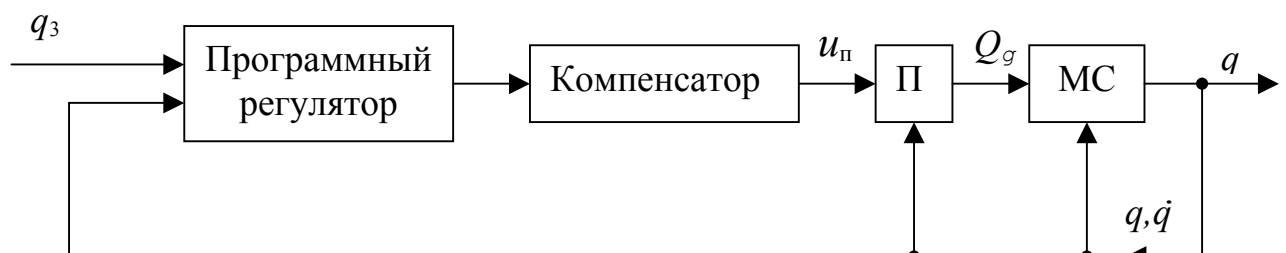


Рис. 4.13. Схема манипулятора с программным контурным регулятором: МС — механическая система манипулятора, П — приводы

Аналитический синтез оператора A_p с получением общего решения поставленной задачи невозможен вследствие сложности объекта управления — манипулятора (многомерность, взаимосвязанность, нестационарность, нелинейность, гибкость). Поэтому, в подобных случаях, как ранее это уже делалось, приходится прибегать к многошаговой итеративной процедуре: вначале упрощают объект до такой степени, чтобы получить возможность осуществить синтез алгоритма управления им, а затем уже в порядке более простой и однозначной процедуры анализа изучают влияние на полученное решение отдельных ранее неучтенных факторов и последовательно корректируют это решение.

В нашем варианте управления манипулятором на первом этапе достаточно пренебречь взаимовлиянием приводов. Тогда система распадается на автономные приводы, алгоритмы управления которыми были рассмотрены в § 4.2 и 4.3:

типовой алгоритм управления по Δq_i с внутренней обратной связью по $\dot{q}_i$, при необходимости дополняемый обратными связями для подавления упругих колебаний, с контуром подстройки при существенной нестационарности параметров манипулятора, дополненный последовательной коррекцией и



оптимальным или квазиоптимальным по быстродействию алгоритмом релейного управления с переходом к нему при больших Δq_i ;

алгоритмы робастного управления с обратной связью по ускорению или релейной.

Если в системе таких автономных приводов учесть их взаимовлияния, это потребует введения соответствующих перекрестных связей между приводами,

корректирующих эти влияния прежде всего путем компенсации вредных для качества управления манипулятором.

При применении робастных алгоритмов управления приводами их взаимовлияния, как было показано, развязываются автономно на уровне отдельных приводов, поэтому никаких дополнительных мер на общесистемном уровне здесь не требуется. Однако такое развязывание приводов достигается за счет их форсирования, по сравнению с режимом работы при типовом алгоритме управления. Поэтому выбор алгоритма управления отдельными приводами манипулятора из арсенала перечисленных возможных вариантов, в том числе и различных для разных приводов одного и того же манипулятора, определяется конкретными техническими требованиями к системе управления манипулятора. В частности, чем слабее эти требования по быстродействию, тем более динамически слабое и соответственно более простое в реализации управление целесообразно выбирать, вплоть до кинематического управления и программирования без всякой динамической коррекции (см. § 4.1).

Если описанные здесь способы совместного управления приводами манипулятора с помощью общесистемного программного регулятора дополнить возможностями последовательной общесистемной коррекции с помощью компенсатора, получится полный набор возможных алгоритмов и структур двухуровневого контурного управления манипулятором (см. рис. 4.13,б). При синтезе таких систем управления первой задачей является синтез их структуры, т. е. выбор оптимального сочетания различных способов управления из перечисленного набора.

Рассмотрим как типовое решение совместное применение программного регулятора и компенсатора. Соответствующая схема, полученная добавлением к схеме компенсатора на рис. 4.11 программного ПД-регулятора, дана на рис. 4.14.

Ее описание имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} A(q) p^2 q + b(pq, q) + c(q) &= Q_g - Q_B, \\ Q_g &= A_n A_k A_p = [p^2 q_k + (k'p + k)\Delta q] A(q) + b(pq, q) + c(q). \end{aligned} \right\} (4.8)$$

Здесь A_n , A_k и A_p — операторы соответственно системы приводов, компенсатора и ПД-регулятора. Отсюда, исключив Q_g , получаем уравнение системы при точном компенсаторе для приращений q :

$$(p^2 + k'p + k)\Delta q = -A^{-1}(q)Q_B. (4.9)$$

где k' и k — диагональные матрицы коэффициентов настройки ПД-регулятора. Таким образом, система управления распадается на n автономных систем приводов. Выбором значений коэффициентов k' и k может быть обеспечена как устойчивость, так и желаемое качество переходных процессов и точность

удержания рабочего органа на программной траектории. В частности, при выбранном алгоритме регулятора будет иметь место статическая ошибка

$$\Delta q_{i \text{ ст}} = \frac{\Delta Q_{\text{в}i}}{k_i}.$$

Для ее устранения можно перейти к ПИД-регулятору, введя интегрирующее звено. Для примера реализации схемы (см. рис. 4.14) вернемся к схеме управления трехзвенным манипулятором с компенсатором (см. рис. 4.11). Для того чтобы ввести в нее программируемый регулятор, надо добавить на вход каждого из трех каналов после звена p^2 сигнал $(k'_i p + k_i) \Delta q_i$, где $\Delta q_i = q_i - q_{\text{в}}$, q_i — это φ , z и r . В результате получаются три системы управления приводами: φ , z и r , связанные друг с другом перекрестными связями, компенсирующими их взаимовлияния и нестабильность механической системы манипулятора.

Если компенсация в схеме (см. рис. 4.14) неполная, уравнение системы управления уже не будет таким простым, как (4.9). В частности, могут появиться взаимовлияния и нестабильность. Это выразится в том, что при синтезе алгоритма программного регулятора матрицы коэффициентов его настройки станут недиагональными и переменными, т. е. будут требовать подстройки. Таким образом, упрощение компенсатора ведет к усложнению программного регулятора. Оптимальная структура всей системы управления, как отмечалось выше, соответствует ее минимальной сложности при обеспечении требуемого качества управления манипулятором в целом.

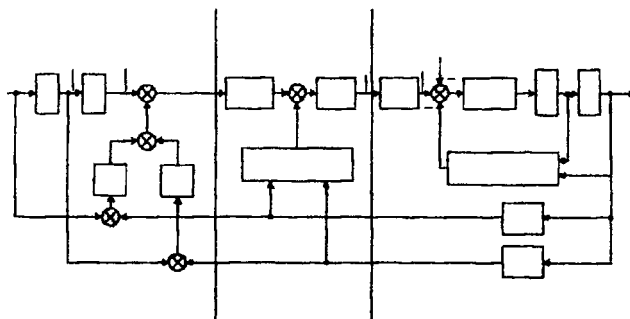


Рис. 4.14

В схеме (см. рис. 4.14) показан нераскрытый оператор приводов $A_{\text{п}}$. Он учитывает динамические и статические свойства приводов, включая инерционность. Что же касается алгоритма управления, то в рассматриваемом случае системного устройства управления в виде компенсатора и программного регулятора последние и определяют этот алгоритм в части управления по переменным своего канала. Перекрестные управляющие воздействия между ними реализуют общесистемные задачи. Это было продемонстриро-

вано на примере схемы трехзвенного манипулятора, кроме этого на долю отдельных приводов остается задача демпфирования упругих колебаний.

4.5. Системы управления манипулятором совместно по положению и силе (моменту).

Как упоминалось в главе 1, наряду с управлением по относительным координатам q в манипуляторах применяются управления непосредственно по координатам рабочего органа и по усилию, с которым он воздействует на объекты внешней среды.

Управление по силе требуется при выполнении некоторых технологических операций, когда необходимо контролировать усилие, с которым рабочий орган манипулятора воздействует на объекты внешней среды (зачистка, шлифовка, полировка поверхностей, механическая сборка, упаковка и т.п.). Такое управление может применяться также и как средство динамической коррекции, близкое управлению по ускорению.

Управление по координатам рабочего органа часто требуется в дополнение к управлению по силе, чтобы обеспечить определенную зависимость силового воздействия от перемещения или скорости рабочего органа или, наоборот, осуществлять его перемещение в функции от силы.

Управление по координатам рабочего органа, определяемым с помощью сенсорных систем, — один из перспективных способов повышения точности манипуляторов. Кроме того, управление по производным от перемещения рабочего органа может также применяться как способ динамической коррекции.

Существуют следующие типы совместного управления по силе и положению рабочего органа, называемого позиционно-силовым управлением:

- независимое (несвязанное), когда эти виды управления разделены во времени,
- согласованное (связанное),
- комбинированное (сочетание первого и второго типов управления).

На рис.4.15 показана схема системы контурного управления рабочим органом по программе $x_{pz}(t)$ с динамической коррекцией с помощью обратной связи по усилию в рабочем органе [15].

Здесь используется идея эталонной модели, описываемой векторным линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$\ddot{x}_p + k'\dot{x}_p + kx_p = 0, \quad (4.10)$$

где матрицы коэффициентов k' и k выбираются в соответствии с желаемым качеством переходных процессов. Из (4.10)

$$\ddot{x}_p = \ddot{x}_{pz} - k'\Delta\dot{x}_p - k\Delta x_p, \quad (4.11)$$

где $\Delta x_p = x_p - x_{pz}$.

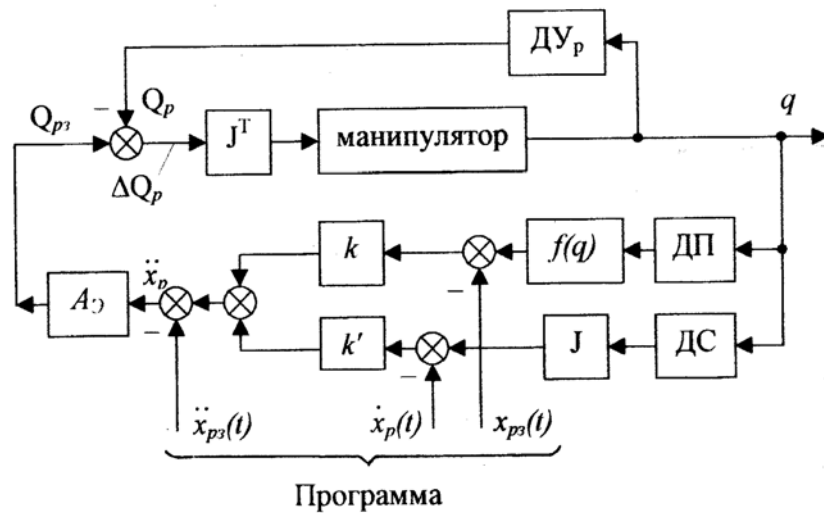


Рис.4.15. Схема системы непрерывного управления рабочим органом манипулятора с обратной связью по усилию: ДУ_р – датчик усилия вектора силы в рабочем органе

В схеме на рис.4.15 решением обратной задачи кинематики вычисляются $x_p = f(q)q$ и $\dot{x}_p = J\dot{q}$, где J — матрица Якоби. По ним затем определяется значение $\ddot{x}_p$, по нему находится сила

$$Q_{pz} = A_{\mathcal{E}}\ddot{x}_p, \quad (4.12)$$

где $A_{\mathcal{E}}$ — диагональная матрица инерции эталонной модели.

Вектор силы Q_{pz} — это то значение вектора силы в рабочем органе манипулятора, создаваемой его приводами, которое соответствует случаю, когда манипулятор ведет себя как эталонная модель, т.е. его уравнение совпадает с уравнением этой модели. Обратная связь осуществляется по разности

$$\Delta Q = Q_p - Q_{pz},$$

где Q_p — значение силы от датчика силы в рабочем органе манипулятора.

Таким образом манипулятор подравнивается под эталонную модель. В блоке $J^T(q)$ после $A_{\mathcal{E}}$ выполняется расчет заданий приводам.

В описанном алгоритме управления не учитываются потери в механической системе манипулятора и принимается что все усилия, развиваемые его приводами, передаются на рабочий орган. Такое допущение возможно прежде всего, когда мала инерционность механической системы манипулятора.

В противном случае в схему должна быть введена соответствующая поправка при вычислении величины Q_{pz} путем вычитания сил, расходуемых в сочленениях манипулятора.

Примененный в схеме алгоритм динамической коррекции близок к рассмотренному в пункте 4.3.1 управлению по ускорению (см. рис.4.7,б), только там оно применено для управления отдельным приводом.

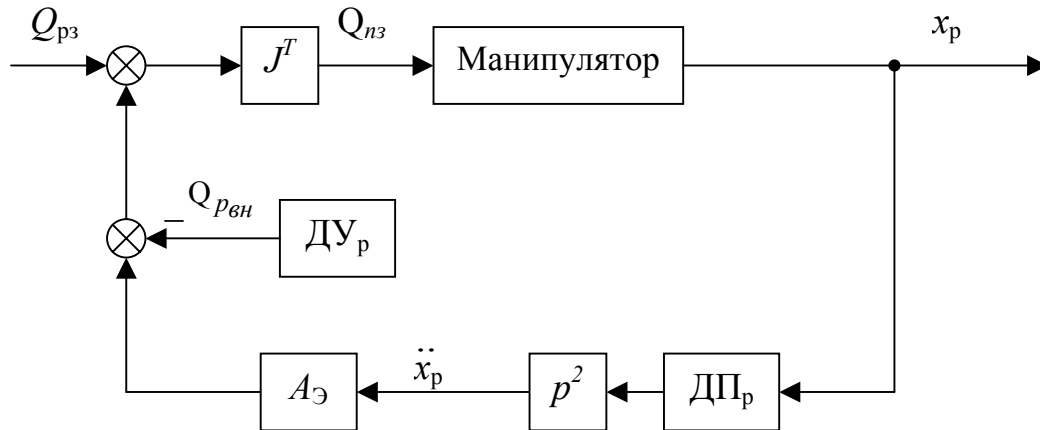


Рис. 4.16. Схема системы программного управления силой в рабочем органе:

ДП_р – датчик положения рабочего органа, ДУ_р – датчик внешнего усилия на рабочем органе

На рис.4.16 приведена схема системы управления силой в рабочем органе. Фактическая сила здесь не измеряется, а обратная связь по ней формируется с помощью эталонной модели второго порядка, описываемой уравнением

$$A_{\text{э}} \ddot{x}_p = Q_{pz} - Q_{p_{\text{вн}}} \quad (4.13)$$

Здесь $A_{\text{э}}$ — диагональная матрица инерции, Q_{pz} — вектор усилий создаваемых приводами эталонной модели, $Q_{p_{\text{вн}}}$ — вектор внешних сил.

Измерение и учет этих внешних сил, действующих на рабочий орган, позволяет отстроиться от них при управлении усилием, развиваемым рабочим органом.

Управление осуществляется по рассогласованию

$$\Delta Q_p = Q_{pz} - Q_p$$

или с учетом (4.13)

$$\Delta Q_p = \left(A_{\text{э}} \ddot{x}_p + Q_{p_{\text{вн}}} \right) - Q_{pz} \quad (4.14)$$

Здесь первый член — это значение усилия на рабочем органе для манипулятора, соответствующего эталонной модели.

Таким образом, как и в предыдущей схеме здесь использована динамическая коррекция в виде обратной связи по усилию. Как и близкая ей обратная связь по ускорению, такая коррекция развязывает приводы, делая их автономными и парирует все внутренние неустойчивости и параметрические возмущения.

Схема на рис.4.16 с такой коррекцией может применяться для управления не только по вектору силы Q_p , но и по вектору положения рабочего органа x_p .

Показанный на схеме способ получения $\ddot{x}_p$ путем двойного дифференцирования сигнала с датчика положения x_p , может быть заменен на датчик вектора скорости $\dot{x}_p$ с однократным дифференцированием или прямым измерением вектора ускорения $\ddot{x}_p$ (например, с помощью акселерометра).

На рис.4.17 дана схема системы одновременного независимого управления рабочим органом манипулятора по перемещению и по силе по разным его степе-

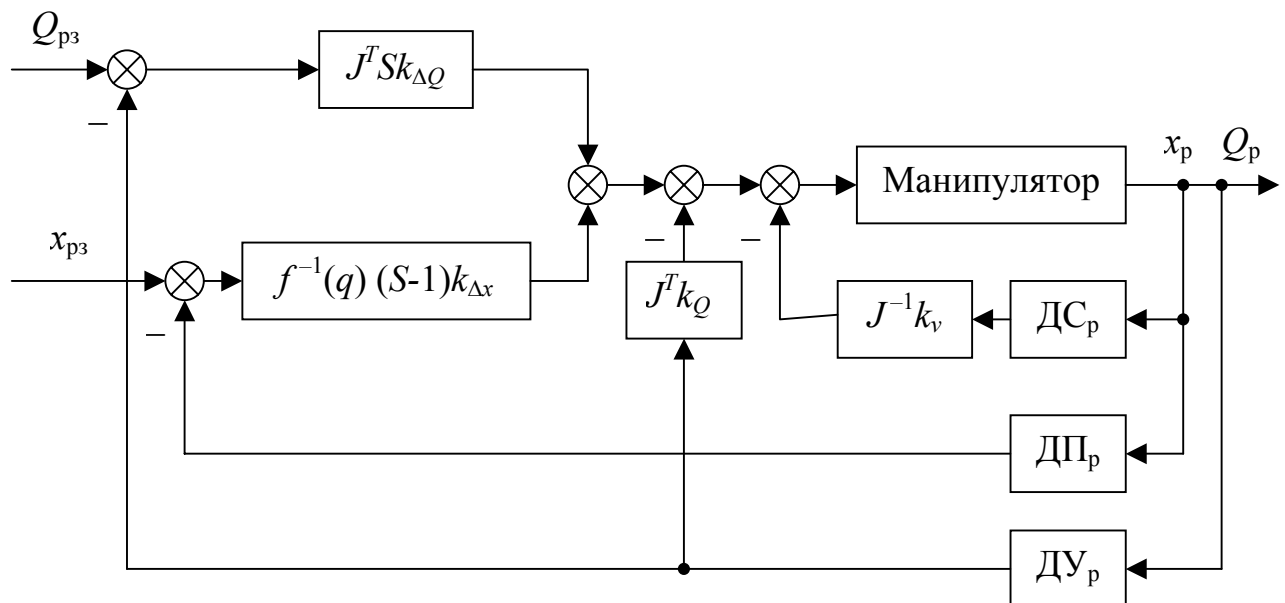


Рис.4.17. Схема системы независимого управления перемещением и усилием в рабочем органе манипулятора: ДП_р, ДС_р – датчики положения и скорости рабочего органа, ДУ_р – датчик усилия в рабочем органе.

ням подвижности. Соответственно на схеме имеется два контура управления с обратной связью по положению и по силе. Кроме того, имеются две внутренние обратные связи по скорости и по силе. Здесь S — диагональная матрица селективности с элементами 1, соответствующими управлению по силе, и 0 — по положению. Эта матрица таким образом определяет координаты рабочего органа, по которым осуществляется управление по одному из этих двух способов. $K_{\Delta Q}$ и $K_{\Delta x}$ — диагональные матрицы коэффициентов настройки

каналов управления по Q и x_p , а K_Q и K_v – аналогичные матрицы коэффициентов при Q и $\dot{x}_p$

Контур обратной связи по рассогласованию по силе замыкается только после появления контакта с внешней средой с помощью специального датчика (на схеме не показан).

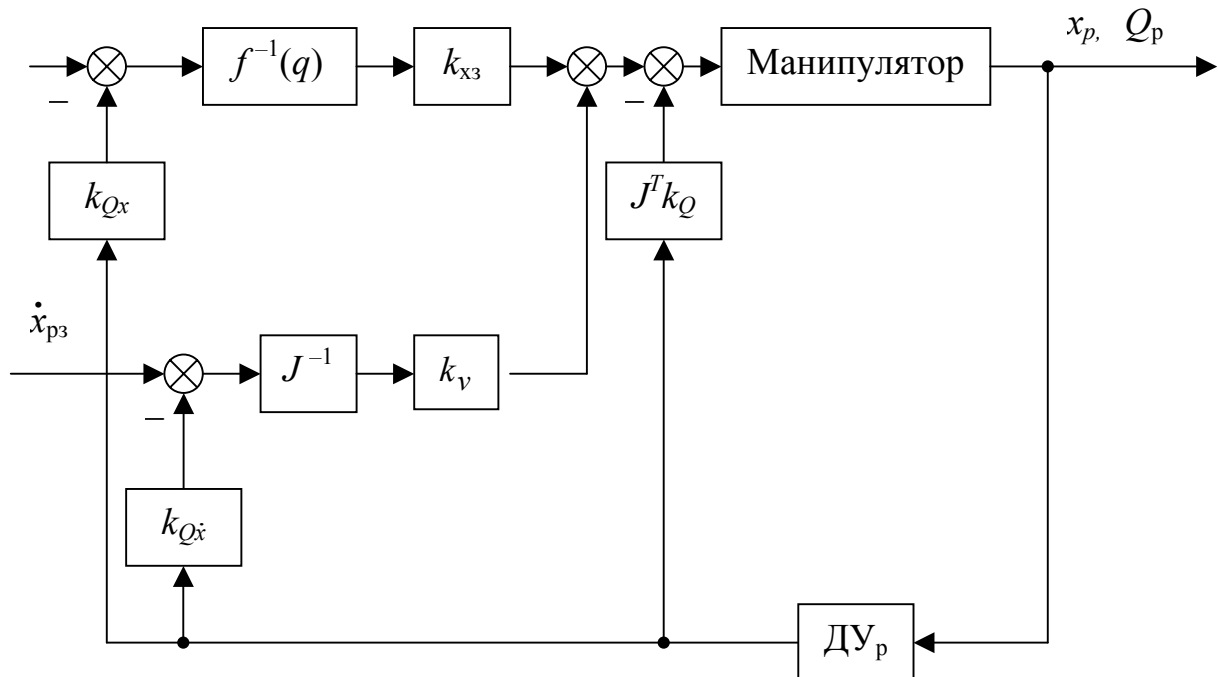


Рис.4.18. Система связанного управления перемещением и усилием в рабочем органе манипулятора.

На рис.4.18 приведена схема системы связанного управления по положению и силе, в которой задание x_{pz} корректируется по текущему значению Q_p . При движении рабочего органа манипулятора до соприкосновения с объектом внешней среды, с которым он должен взаимодействовать, сигнал с датчика силы не поступает в схему как и в предыдущей системе. После появления контакта, который фиксируется специальным датчиком, эта цепь включается. В результате при дальнейшем движении рабочего органа величина его хода корректируется по силе воздействия на внешнюю среду. В системе имеется еще канал программного управления скоростью $\dot{x}_p$ тоже с коррекцией по силе.

ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

5.1. Функциональная схема системы сенсорного (очувствленного) управления роботом

На рис. 5.1 показана общая функциональная схема системы управления движением исполнительными устройствами робота с использованием сенсорной информации о внешней среде. Основные сенсорные системы — это системы технического зрения и близкие им сканирующие локационные системы (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые), системы силомоментные, тактильные. Они позволяют создать для управления движением робота общую обратную связь по x_p , Q_p и различным параметрам внешней среды, информация о которых необходима при выполнении роботом конкретных технологических операций.

Как и ранее, под исполнительным устройством будем понимать прежде всего манипуляционную систему. Особенности управления передвижением робота будут рассмотрены особо.

На рис. 5.2 показан внешний вид одного из первых отечественных экспериментальных очувствленных роботов, который был создан для исследований в области адаптивного и интеллектуального управления.

Схема на рис. 5.1 состоит из пяти уровней управления: первый, (нижний) — это управление отдельными степенями подвижности, т. е. приводами; второй — совместное программное управление приводами степеней подвижности; третий — тоже совместное, но адаптивное управление приводами; четвертый — синтез плана выполнения действий, заданных человеком-оператором, а так же возможных действий, инициируемых на этом уровне самим роботом для обеспечения его внутренних функций; пятый, (верхний) — уровень обработки сенсорной информации и синтеза с ее помощью модели внешней среды и модели самого робота, включая программы выполняемых им типовых операций.

Каждый из перечисленных функциональных уровней системы в свою очередь может содержать несколько внутренних уровней.

Функции человека-оператора следующие: выдача заданий на выполнение определенных операций, оказание в диалоговом режиме помощи в выполнении отдельными уровнями своих функций и контроля за ними, а так же оперативное взятие на себя функций любого уровня вплоть до управления отдельными приводами. Это может потребоваться, когда робот автономно не может выполнить какую-то сложную операцию либо в аварийных ситуациях. Выдача человеком-оператором заданий может осуществляться в различной

форме в зависимости от того, какие уровни должны быть при этом задействованы.

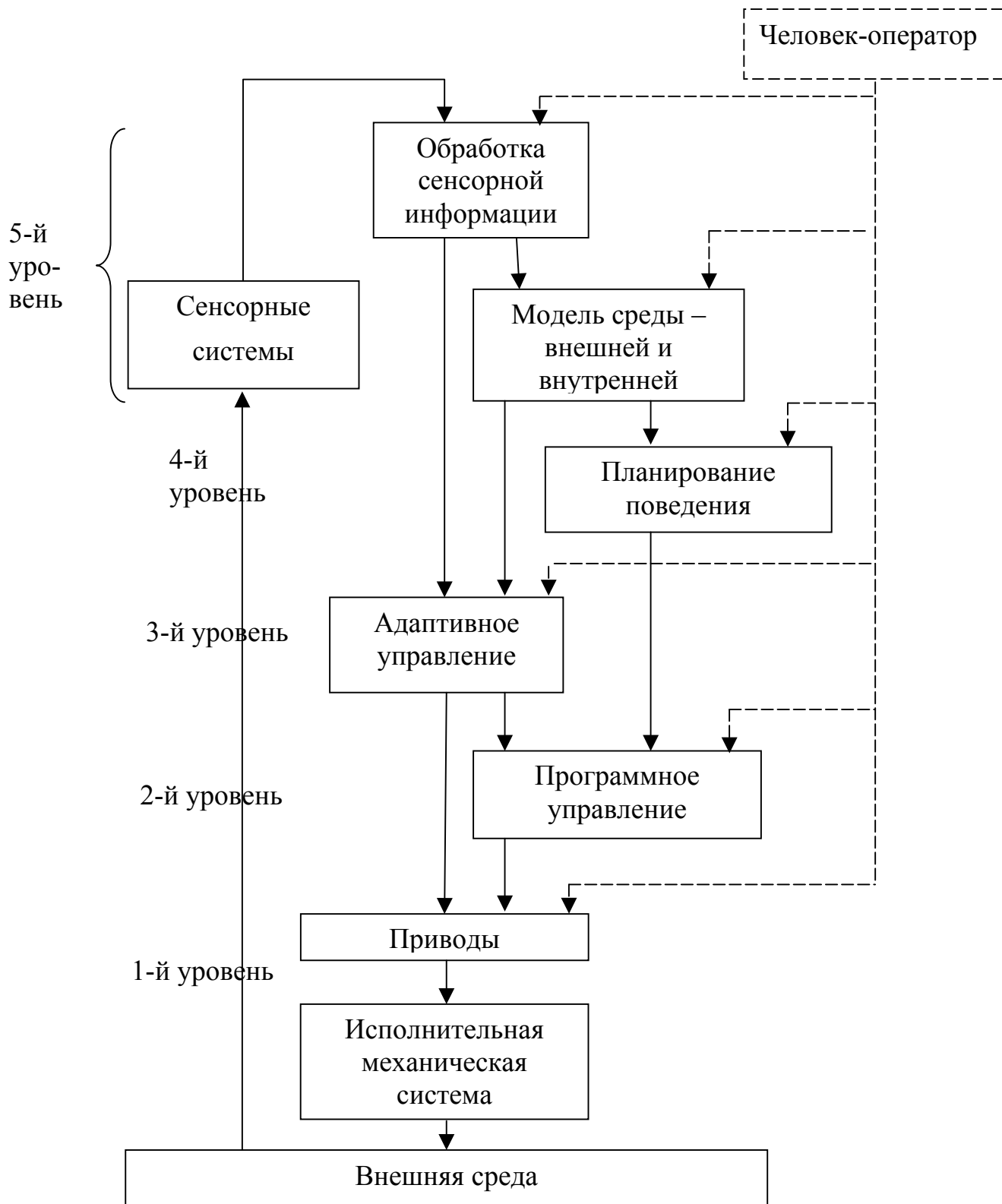


Рис. 5.1. Функциональная схема системы сенсорного управления роботом

Рис. 5.2. Экспериментальный очувствленный робот ЛПИ-2: 1,2 — манипуляторы со съемными очувствленными схватами; 3 — передающая телевизионная камера; 4 — задающая рукоятка; 5 — система речевого управления; 6 — очувствленный двухкоординатный стол; 7 — ультразвуковой локатор

Когда подлежащая выполнению операция может быть целиком реализована на основе рассмотренного в предыдущих главах программного управления, оператор выдает соответствующую управляющую программу на уровень программного управления. Если в ходе выполнения задания необходимо использовать сенсорную информацию, соответствующие указания поступают на вышерасположенные уровни управления.

Из приведенных на схеме (см. рис. 5.1) пяти уровней в реальном времени участвуют в управлении движением три нижних, а также уровень обработки сенсорной информации, поставляющий последнюю на уровень адаптивного управления.

Информация о модели среды, поступающая с уровня планирования, может изменяться в ходе выполнения операции при существенном, непредвиденном изменении сенсорной информации о среде или при задании от человека-оператора.

§ 5.2. Системы адаптивного управления

Рассмотренные ранее системы программного управления реализуют простейший способ управления, когда априорно достаточно точно известно все о внешней среде и самом роботе, и это позволяет заранее спланировать и запрограммировать работу робота. Иными словами, такое управление предполагает полностью детерминированные внешние и внутренние условия. Типовые примеры, когда это не выполняется:

операция взятия произвольно расположенного или перемещающегося объекта (для ее выполнения необходимо автоматическое наведение схвата манипулятора на объект и его ориентация относительно объекта);

навинчивание гайки на болт (для этого требуется предварительно “наживить” гайку на резьбу);

дуговая сварка швов, положение которых может произвольно варьироваться (требуется вести сварочную головку строго по шву с определенной угловой ориентацией);

вставление стержня в отверстие с точностью, которая не может быть обеспечена при программном управлении, а требует пробных поисковых движений;

обход непредвиденных препятствий и в целом движение в заранее не известном пространстве. (Это, в частности, относится и к задаче передвижения мобильного робота.)

Для подобных операций необходимо оперативно получать информацию о среде непосредственно в ходе выполнения операций для использования ее в реальном масштабе времени при управлении движением. Такое управление в функции от текущей информации о внешней среде называется адаптивным. Необходимым условием его реализации является наличие сенсорных систем, дающих эту информацию, т. е. “очувствление” робота. Адаптация не только расширяет функциональные возможности робота выполнении задач, не решаемых программно, но и упрощает его эксплуатацию, не требуя точного знания модели внешней среды и самого робота.

Адаптивное управление возможно в следующих случаях:

определение значений заранее неизвестных или варьируемых параметров для ввода их в управляющую программу системы. Здесь адаптивное управление является надстройкой над системой программного управления, осуществляя ее самонастройку. Это параметрическая адаптация;

выбор управляющей программы из готового набора программ или сборка ее из набора типовых подпрограмм, в том числе в ходе выполнения операции, на основе оценки текущей ситуации по сенсорной информации. Здесь адаптивное управление тоже дополняет систему программного управления;

изменение (переключение) структуры системы управления, т. е. ее алгоритма, на основе оценки текущей обстановки. Например, изменение способа коррекции в системе программного управления или переход от одной сенсорной системы к другой в системе адаптивного управления. Это структурная адаптация (самоорганизация системы);

беспрограммное управление движением в реальном времени только по сенсорной информации. Например, выполнение операции наведения рабочего органа манипулятора на произвольно расположенный объект.

Таким образом, адаптивное управление может осуществляться как через систему программного управления приводами, так и путем непосредственного воздействия на последние. Эти два варианта отображены на схеме (см. рис. 5.1) соответственно двумя стрелками с уровня адаптивного управления.

При выполнении конкретных технологических операций адаптивное управление чаще всего применяется в комбинации с программным, обеспечивая подстройку и изменение структуры системы программного управления или сборку управляющей программы (как показано выше) либо последовательно сменяя ее, когда необходимо полностью переходить на управление по текущей сенсорной информации.

Кроме того, возможна комбинация из перечисленных способов адаптации, в том числе и иерархическая, когда имеется несколько уровней адаптации (“адаптация адаптации”). Например, над уровнем параметрической адаптации, осуществляющим подстройку системы программного управления, может находиться уровень структурной адаптации, осуществляющий

дискретное изменение в схеме последней по мере исчерпания возможности подстройки.

5.2.1. Адаптивное управление отдельным приводом

Принцип адаптивного управления может применяться как в системе совместного управления приводами манипулятора или средства передвижения робота (см. рис. 5.1.), так и в системе управления отдельных приводов. Рассмотрим вначале последний наиболее простой случай адаптивного управления. Разумеется, в этом случае системы управления роботом в целом и его исполнительных устройств не становятся адаптивными, оставаясь системами программного управления, т.к. адаптация при этом относится не к общесистемным, а к локальным переменным. Такая адаптация называется внутренней в отличие от внешней, осуществляемой с помощью общесистемной сенсорной обратной связи, как показано на рис. 5.1.

В главах третьей и четвертой, о системах программного позиционного (параграф 3.2, рис. 3.6) и контурного (пункт 4.2.2) управления со ссылкой на настоящую главу, уже были описаны некоторые схемы программного управления отдельными приводами с адаптивной подстройкой, там было также показано, что такая подстройка принципиально отличается от программной подстройки тем, что помимо программного изменения параметров управляемого объекта она парирует и все другие параметрические возмущения и погрешности априорного задания математической модели объекта.

Там, в частности, была описана система адаптивной подстройки с эталонной моделью. На рис. 5.3, а показан другой тип системы адаптивного управления привода на базе ассоциативной памяти [16]. Устройство адаптивной подстройки УАП стабилизирует определенный показатель качества управления (колебательность, быстродействие и т. п.), выбирая из заранее введенного в ассоциативную память АП набор настроек устройства управления привода УУп, соответствующую данным значениям варьируемых параметров нагрузки и самого привода. Нужная настройка выбирается из ассоциативной памяти в функции от текущего состояния объекта управления, которое определяется в блоке идентификации по информации, поступающей с объекта. Т.к. этой информации заведомо недостаточно для осуществления теоретически точной идентификации, здесь применены эвристические алгоритмы идентификации по неполной информации, разработанные с помощью экспертных знаний. Блок оценки качества БОК управляет ассоциативной памятью, открывая ее для очередной записи новой информации при определенном изменении показателя качества.

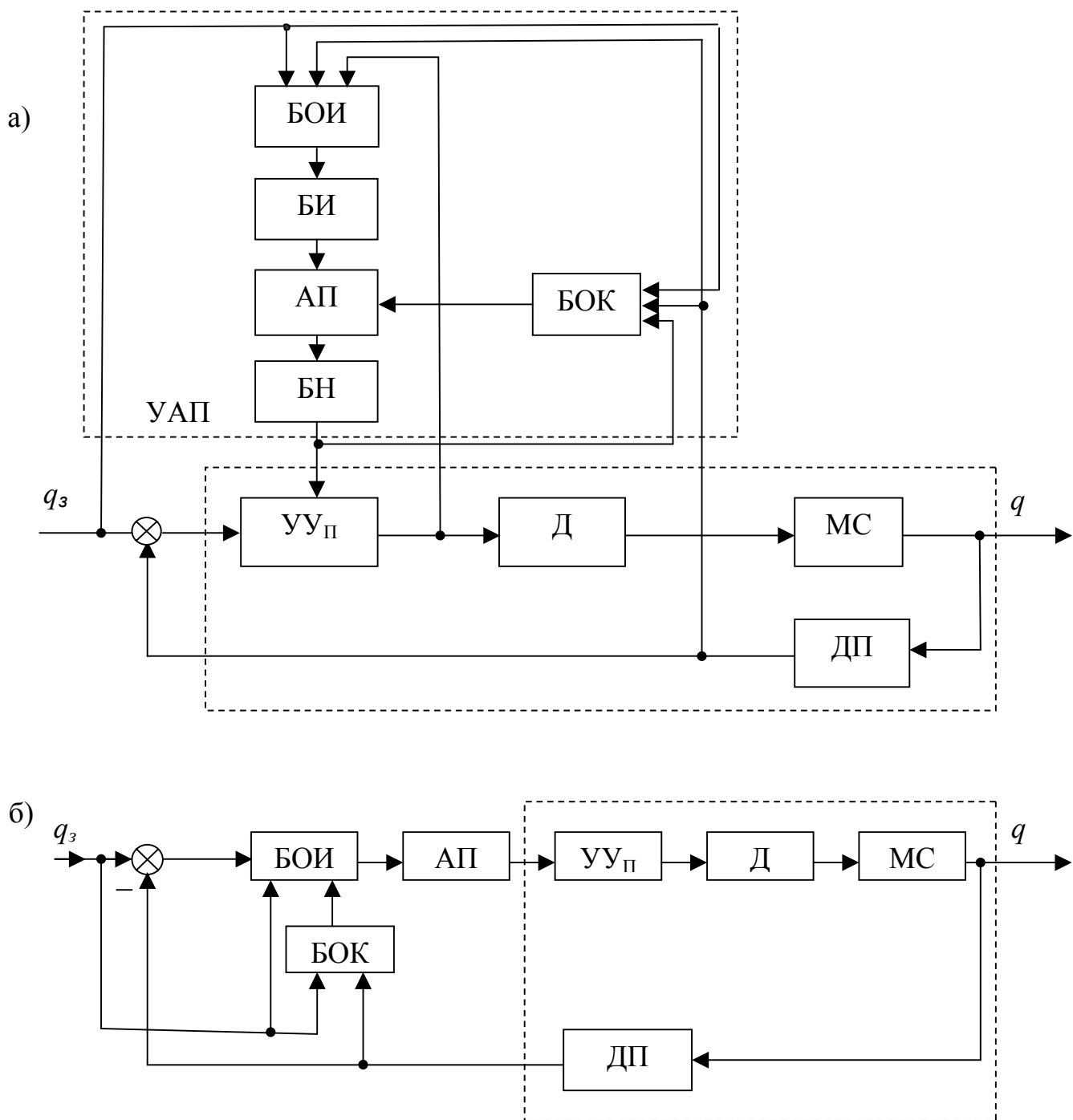


Рис. 5.3. Система адаптивного управления привода с ассоциативной памятью а) в контуре подстройки, б) в основном контуре управления, БИ – блок идентификации, АП – ассоциативная память, БН – блок настройки, БОК – блок оценки качества, УАП – устройство адаптивной подстройки.

На рис. 5.3,б показан вариант схемы, где блок ассоциативной памяти АП введен в основной контур управления и не подстраивает его, а сам выдает управляющие воздействия. Обе схемы должны проходить этап обучения экспериментами, во время которого происходит заполнение ассоциативной памяти набором ситуаций и соответствующих им оптимальных решений в

виде настройки первой схемы на рис. 5.3, а или управляющей реакции второй на рис. 5.3,б.

Таким образом, мы рассмотрели два основных типа адаптивных систем управления приводами:

- управление с эталонной моделью в функции от рассогласования объекта и модели;
- управление с оценкой и стабилизацией качества управления с обучением экспертами.

5.2.2. Адаптивное управление манипулятором

Способы адаптивного управления, известные в теории автоматического управления, носят общий характер, поэтому в системах совместного управления приводами манипулятора применяются те же способы адаптации, что и при управлении отдельными приводами. На рис. 5.4 показана схема системы адаптивного управления манипулятором. Она представляет собой конкретизацию той части общей схемы сенсорного управления на рис. 5.1, которая участвует в таком управлении. В соответствии с этой схемой адаптивное управление может осуществляться в виде следующих трех вариантов:

- В функции от оцениваемого качества управления движением с целью его стабилизации, т. е. устранения отклонения показателя качества от предписанного выбранного уровня, или путем поиска и поддержания его оптимального значения выбранного качества управления.
- По отклонению от эталонной модели (по рассогласованию выходных координат при одинаковом входном воздействии или входных воздействий, определяемых для модели решением обратной задачи динамики, как, например, в схеме на рис. 3.8);
- В функции от измеряемых сенсорными системами координат рабочего органа манипулятора относительно объектов внешней среды, с которыми он взаимодействует, или от усилия их взаимодействия (например, при обходе препятствий, силовом воздействии и т. п.).

Остановимся на последнем типе адаптивного управления движением, поскольку оно характерно именно для совместного управления приводами манипуляторов, т. е. для внешней адаптации, и не встречалось ранее при рассмотрении адаптивного управления отдельными приводами. Особенностью алгоритмов такого управления - наличие в них логических дискретных операций наряду с непрерывным управлением движением. На рис. 5.5 и 5.6 приведены примеры алгоритмов такого управления для выполнения некоторых из упоминавшихся выше типовых операций — поиск и взятия произвольно расположенных предметов и вставление стержня в отверстие.

Для выполнения таких операций двухпальцевый схват оснащается сенсорами в виде датчиков, расположенных на пальцах, и датчиком наличия предмета между пальцами. На рис. 5.5 приведена структурная схема

алгоритма взятия манипулятором произвольно расположенного на рабочей плоскости предмета.

После вывода схвата по программе в зону ожидаемого нахождения предмета производится сканирование схватом рабочей плоскости в окрестностях точки вывода (например, строчное сканирование в квадрате с центром в этой точке). Схват при этом ориентируется торцами пальцев перпендикулярно рабочей плоскости. При обнаружении сенсорами предмета схват размещается над ним и ориентируется так, чтобы его пальцы находились симметрично относительно середины предмета с двух сторон его более узкой части. После этого схват опускается и по сигналу датчика наличия предмета пальцы схвата сводятся, захватывая предмет. В случае неудачи манипулятор останавливается и сигнал об этом поступает на пульт оператора. Однако обычно до этого, если допускает время, осуществляется повторение операции.

На рис. 5.6 упрощено показан один из алгоритмов выполнения типовой сборочной операции вставления стержня в отверстие (вал и втулка). Здесь применяются сенсоры выявляющие относительное положение сопрягаемых деталей и усилие сопряжения. Операция выполняется по методу направленного ориентирования и заключается в перемещение стержня, зажатого в схвате манипулятора, относительно отверстия до совпадения их осей настолько, чтобы стало возможным вставление стержня в отверстие. После этого осуществляется последнее движение.

Для выполнения этой операции двухпальцевый схват оснащен сенсорами в виде датчиков, расположенных на пальцах, и датчиком наличия предмета между пальцами.

На рис. 5.5 приведена структурная схема алгоритма взятия манипулятором произвольно расположенного предмета. После вывода схвата по программе в зону ожидаемого нахождения предмета производится сканирование схватом рабочей плоскости в окрестностях точки вывода (например, строчное сканирование в квадрате с центром в этой точке). Схват при этом ориентируется торцами пальцев перпендикулярно рабочей плоскости. При обнаружении сенсорами предмета схват размещается над ним и ориентируется так, чтобы его пальцы находились симметрично относительно середины предмета с двух сторон его более узкой части. После этого схват опускается и по сигналу датчика наличия предмета пальцы схвата сводятся, захватывая предмет. В случае неудачи манипулятор останавливается и сигнал об этом поступает на пульт оператора. Однако обычно до этого, если допускает время, осуществляется повторение операции.

На рис. 5.6 упрощенно показан один из алгоритмов выполнения типовой сборочной операции вставления стержня в отверстие (вал и втулка). Здесь

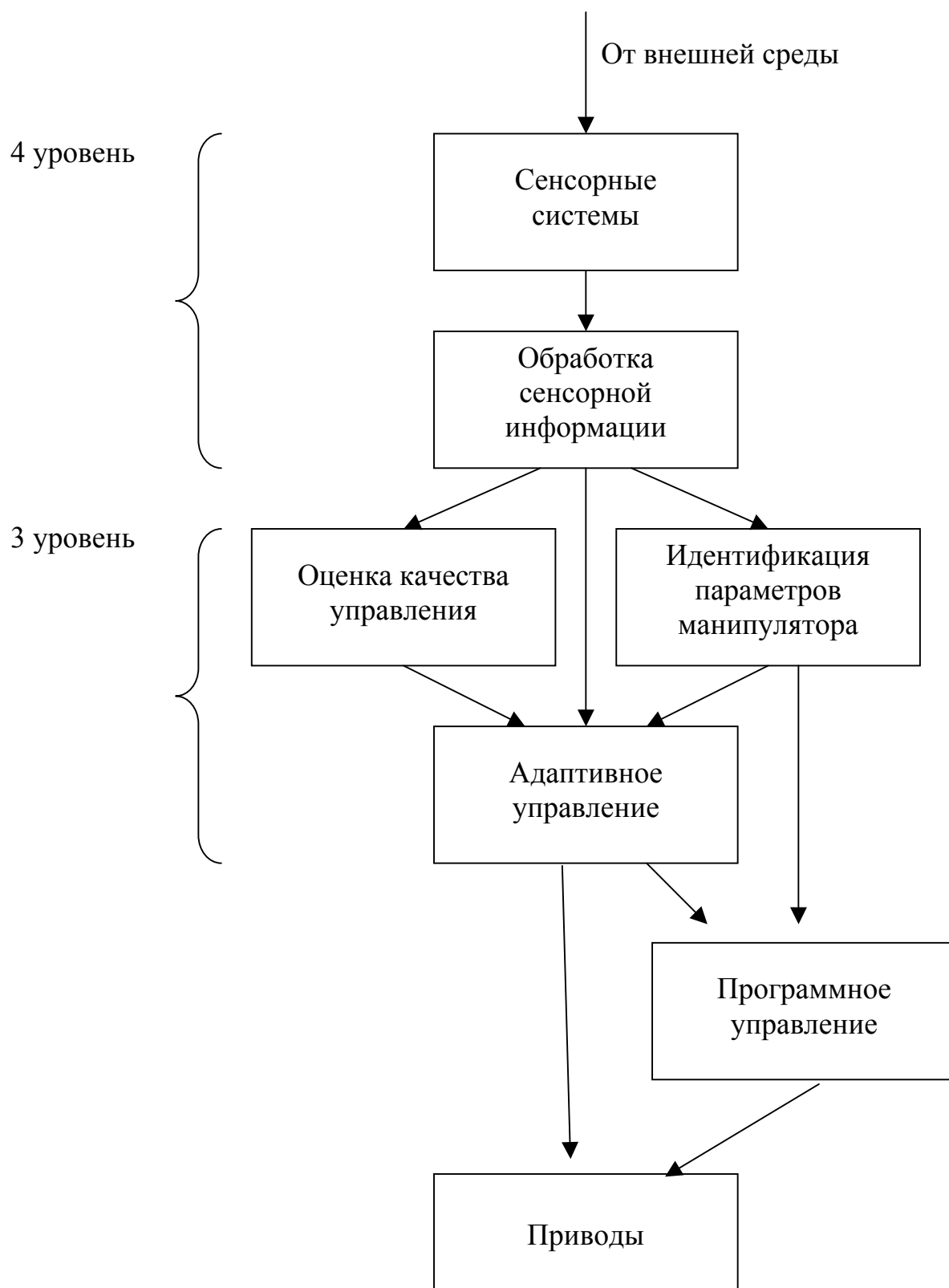


Рис. 5.4. Схема системы адаптивного управления манипулятором.

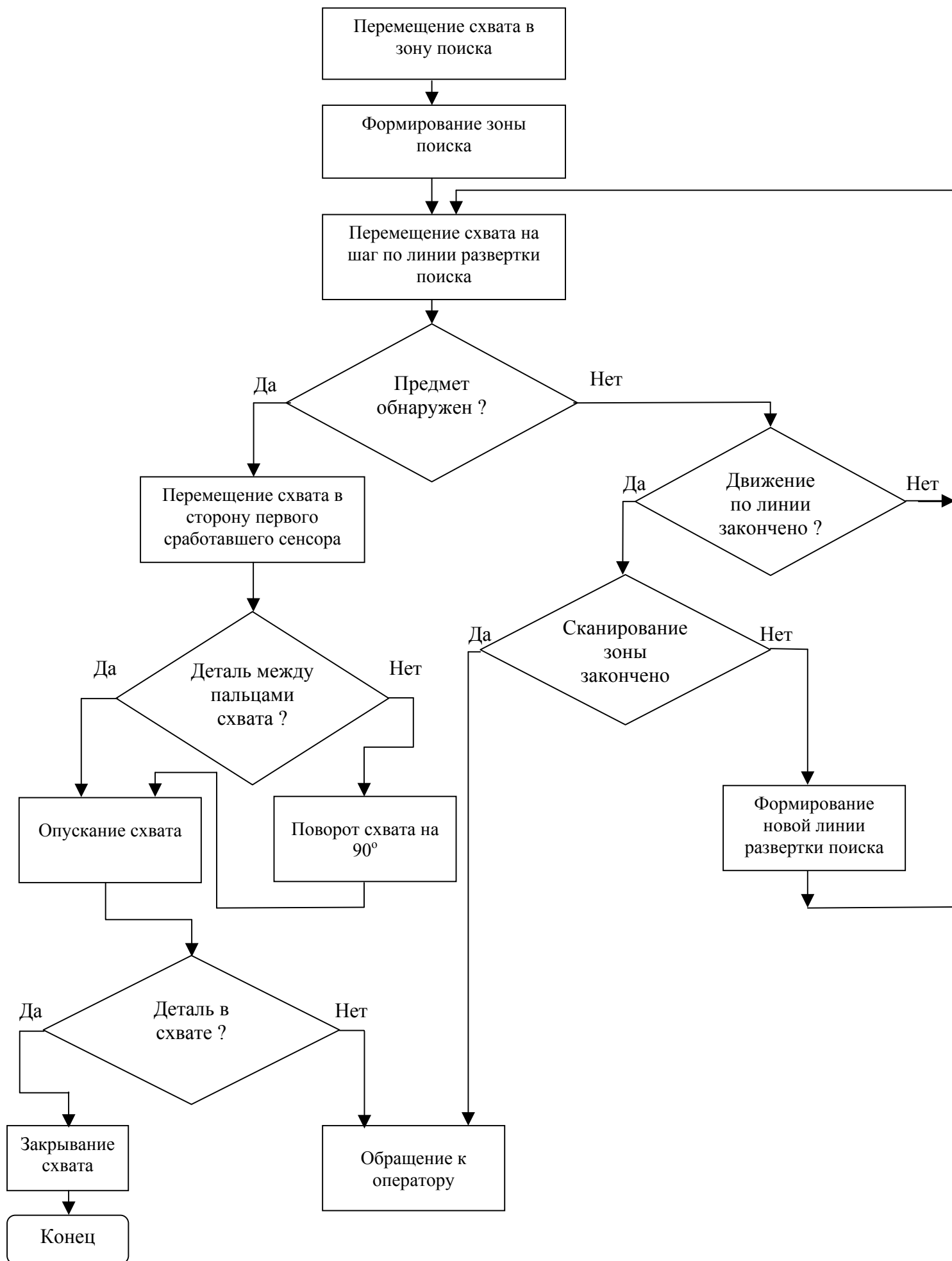


Рис. 5.5. Структурная схема алгоритма поиска и взятия предмета.

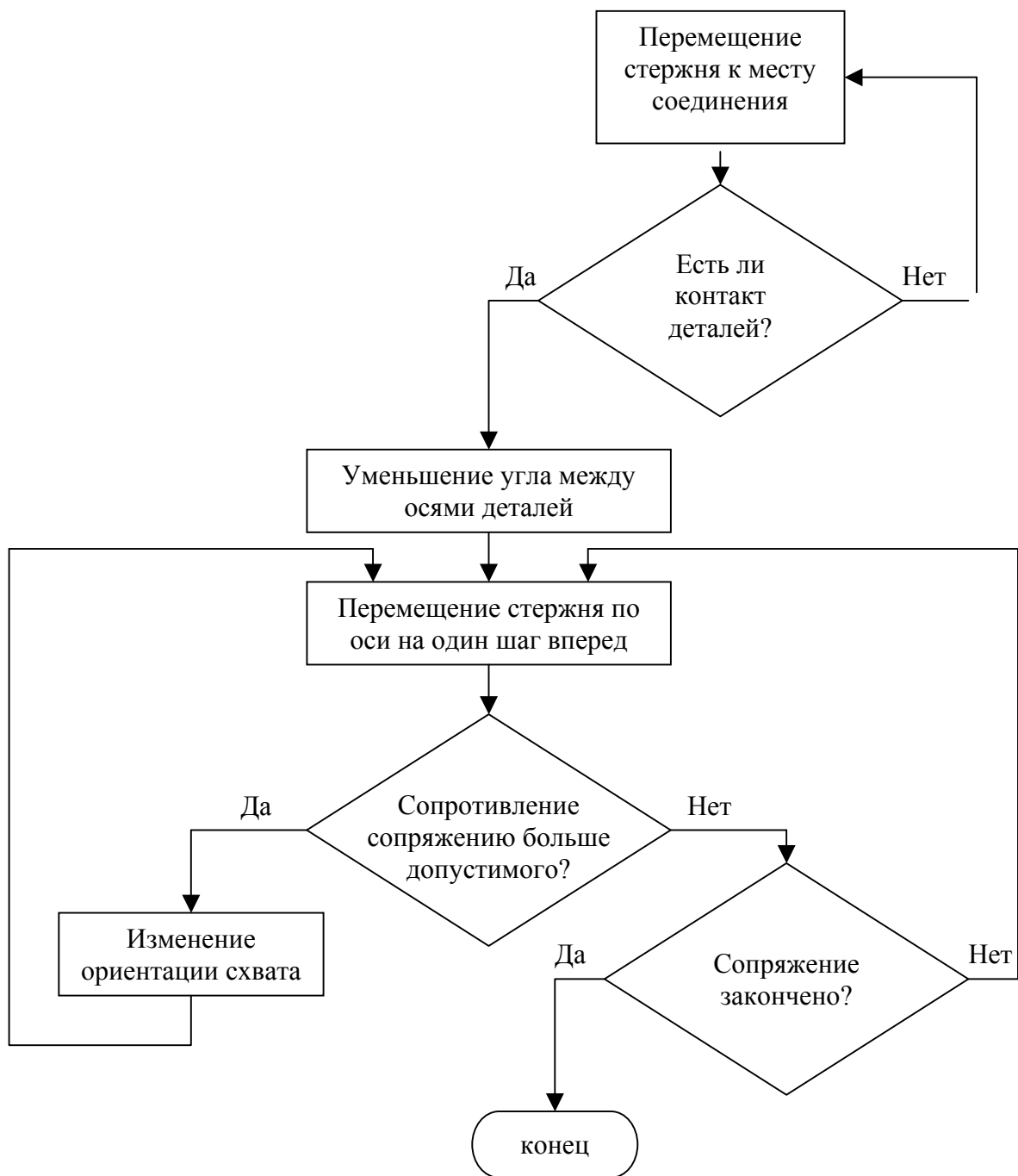


Рис. 5.6. Структурная схема алгоритма соединения типа вал-втулка.

§ 5.3. Системы интеллектуального управления

Интеллектуальное управление — высшая ступень управления в теории автоматического управления после программного и адаптивного, отличающаяся применением искусственного интеллекта (отсюда само название этого способа управления).

Искусственный интеллект — это наименование научно-технического направления, основной целью которого является создание информационных машин и систем, способных решать неформализуемые творческие задачи, которые сегодня решает только человек. Иными словами, эта цель заключается в создании в указанном смысле технического аналога человеческого интеллекта.

Естественный интеллект — это способность приобретать и целенаправленно использовать знания. Это значит, что интеллект предполагает наличие хорошо организованной памяти. Человеческие знания, как и сам окружающий мир нечетки, и зачастую противоречивы, хотя, конечно, содержат и вполне однозначные фрагменты. Представляются они образно на естественном языке, а их обработка осуществляется параллельно и объемно.

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

Сегодня интеллектуальные системы строятся как биотехнические системы, т. е. в них творческие задачи решает человек, а необходимые при этом “четкие” знания и их логическая обработка остается за компьютером. Современные интеллектуальные системы, функционирующие без участия человека (т. е. интеллектуальные технические системы), включая системы интеллектуального управления, пока обладают весьма ограниченными интеллектуальными

возможностями. В них используют теорию нечетких множеств и нечеткой логики, различные эвристические алгоритмы и технологии экспертных систем, ассоциативной памяти и технических нейронных сетей (обычно в комбинации) [15, 16]. Все поддающиеся при этом формализации процедуры реализуются на аппарате математической логики.

Основная область применения интеллектуального управления — это сложные и большие объекты и системы, для которых доступно описание только на семиотическом уровне. К ним прежде всего относятся биотехнические системы, включающие человека. Поскольку такие системы обладают естественным интеллектом, управление ими так же должно быть интеллектуальным. Вместе с тем интеллектуальное управление требуется и для достаточно простых объектов, если с их помощью решаются интеллектуальные задачи или если сама задача управления ими требует интеллектуального подхода, например, в силу сложности внешних условий.

В робототехнике искусственный интеллект может потребоваться прежде всего для решения следующих задач:

обработка сенсорной информации (фильтрация, сжатие информации, распознавание образов);

создание моделей внешней среды;

планирование поведения;

управление движением;

создание интеллектуального интерфейса между человеком-оператором и роботом.

Между системами интеллектуального и адаптивного управления нет резкой границы. Интеллектуальные системы являются результатом развития адаптивных систем в направлении расширения возможностей автономного выполнения все более сложных заданий во все более неопределенной среде и при все большей неполноте информации, требующейся для выполнения этих заданий. В ходе этой эволюции к настоящему времени созданы пока только адаптивные системы с некоторыми элементами искусственного интеллекта в виде способности воспринимать и анализировать достаточно сложную и изменяющуюся внешнюю

среду и принимать адекватные решения по поведению. Для качественного скачка в направлении создания полноценных интеллектуальных систем требуется, как сказано выше, новое аппаратное обеспечение на принципиально новой элементной базе.

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

Одним из наиболее обобщенных типов моделей среды являются логико-лингвистические модели. Они применяются для сложных объектов с неоднозначной реакцией на одни и те же ситуации, которые не могут быть описаны формально математически и поэтому описываются эвристически на основе экспертных оценок на языке, близком естественному. Примеры таких объектов управления — это прежде всего системы, включающие в себя людей.

Методы искусственного интеллекта могут применяться в системах управления не только в общесистемном контуре управления, т. е. для формирования управления, но и для решения различных локальных задач отдельных подсистем робота. В этом случае процесс управления роботом, естественно, не становится интеллектуальным; подобно тому, как в системах адаптивного управления наличие внутренней адаптации в отдельных частях системы не делает управление в целом адаптивным. (В этом смысле следует отличать термин “система интеллектуального управления” от более общего термина “интеллектуальная система”, который относится к системам, использующим искусственный интеллект для решения любых задач).

На рис. 5.7 показана обобщенная схема системы интеллектуального управления робота, которая представляет собой конкретизацию общей схемы управления оцувствленного робота (см. рис. 5.1) в части применения искусственного интеллекта при решении перечисленных выше пяти задач. В центре схемы находится блок памяти, двусторонне связанный с другими системами, перерабатывающими информацию. В этот блок входит база знаний о внешней среде — иерархическая модель внешней среды, база данных как о внешней среде, так и о самом роботе и об операциях, которые он должен выполнять. Кроме того, специализированные оперативные базы знаний и данных, связанные с центральной памятью, могут находиться и в отдельных системах робота.

База знаний о внешней среде содержит априорную информацию, вводимую до начала работы, и оперативную сенсорную, которая приобретается в процессе восприятия окружающей среды при выполнении роботом заданных действий, а также в процессе его специальных познавательных действий для изучения этой среды. Сама информация включает в себя описание геометрических и других физических характеристик объектов среды и их взаимосвязь. Это описание имеет иерархическую структуру. Например, описание рабочей зоны манипулятора включает набор планов всей зоны и ее частей, различающихся как масштабом и соответственно точностью, так и степенью обобщения первичной сенсорной информации (выделение линий, контуров, поверхностей, объектов, групп объектов).

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

между ними. Применяются сети фреймов, описывающих объекты среды, и семантические сети [16].

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

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

Блок оценки ситуации и блок планирования поведения получают из блока памяти текущую модель внешней среды, а передают в него соответственно ее оценку по определенным критериям и синтезированный план управления движением робота.

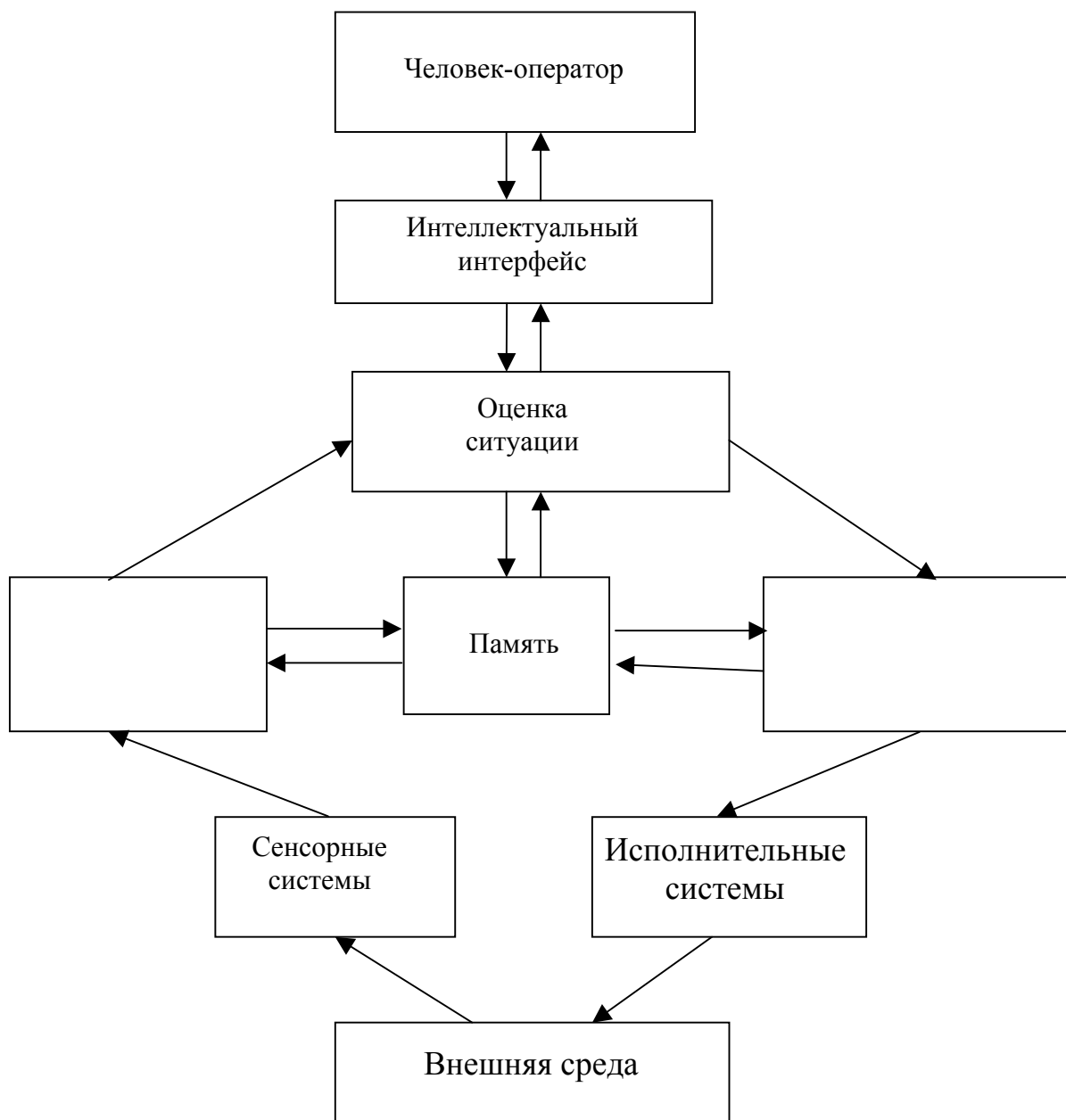


Рис. 5.7. Схема системы интеллектуального управления роботом

При синтезе этого плана применяются различные способы решения задач, разработанные в рамках искусственного интеллекта, в том числе поиск: решения в пространстве состояний (нахождение последовательности преобразования исходного состояния в конечное целевое); сведением задачи к подзадачам (последовательное разбиение задачи на подзадачи вплоть до элементарных, решение которых известно);

в форме доказательства теорем (формулирование задачи как теоремы и ее решение (доказательство) на базе системы аксиом).

В задачу блока оценки ситуации входит также оперативная корректировка целей управления и их приоритетов. Это верхний интеллектуальный уровень в иерархии управления роботом.

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

Обратим внимание на такую особенность рассмотренной обобщенной схемы системы интеллектуального управления, как и общей схемы (см. рис. 5.1): что в ней отсутствует в явном виде блок, ответственный за реализацию способа интеллектуального управления, как это имеет место для адаптивного и программного управления. Объясняется это тем, что искусственный интеллект распределен по всем функциональным блокам схемы в соответствии с перечисленными функциями, при реализации которых он может требоваться. В конкретных системах он может присутствовать в любом из этих блоков. Именно поэтому вместо термина “системы интеллектуального управления” получил распространение термин “интеллектуальные системы управления”.

В настоящее время применение искусственного интеллекта в системах управления роботами, как уже отмечалось, начинается с введения элементов искусственного интеллекта в системы адаптивного управления на основе применения перечисленных интеллектуальных технологий. Сегодня наибольшее распространение получили технологии экспертных систем.

На рис. 5.8 показана типовая структура экспертной системы управления приводами манипулятора [15]. Такая система может быть использована и на уровне планирования поведения. Здесь использована база знаний, которая содержит теоретические и эмпирические сведения о динамике манипулятора, областях применения алгоритмов идентификации и управления. Эти знания представлены совокупностью правил, структура которых соответствует продукционным системам искусственного интеллекта.

База данных включает в себя информацию о текущем состоянии системы управления и цели управления, а база алгоритмов — алгоритмы обработки данных, идентификации и управления. Блок логического вывода формирует экспертное заключение об оптимальной текущей структуре и настройке системы приводов, которая затем реализуется аппаратно и программно в системе управления.

На рис. 5.9 приведен пример схемы трехуровневой системы управления манипулятором по x_{pz} с интеллектуальной экспертной системой настройки с помощью обучающейся базы данных [19]. Первый уровень включает в себя устройства управления отдельных приводов, второй общесистемный уровень охватывает компенсатор и блок оценки качества управления приводами БОК, в третий уровень входят блок программирования БП, рассчитывающий $q_3(t)$ по $x_{pz}(t)$, и блок настройки приводов БН.

Блок оценки качества БОК выявляет отклонения выбранного показателя качества для каждого привода по их выходным переменным. Это осуществляется экспертной системой с базой знаний с прямым выводом.

Блок настройки БН приводов на третьем уровне так же построен на базе знаний, содержащей лингвистические утверждения экспертов. Этот уровень по мере накопления информации в ходе эксплуатации системы дополняет содержание как своей базы знаний, так и базы знаний второго уровня, т. е. осуществляет процесс самоусовершенствования обучением.

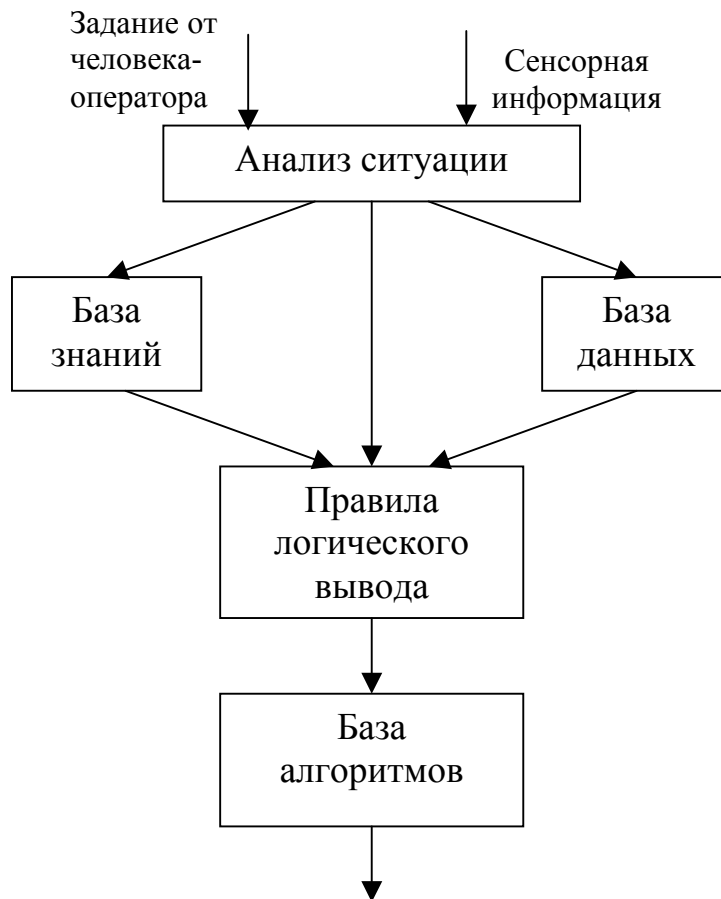


Рис. 5.8. Структура экспертной системы адаптации для системы управления

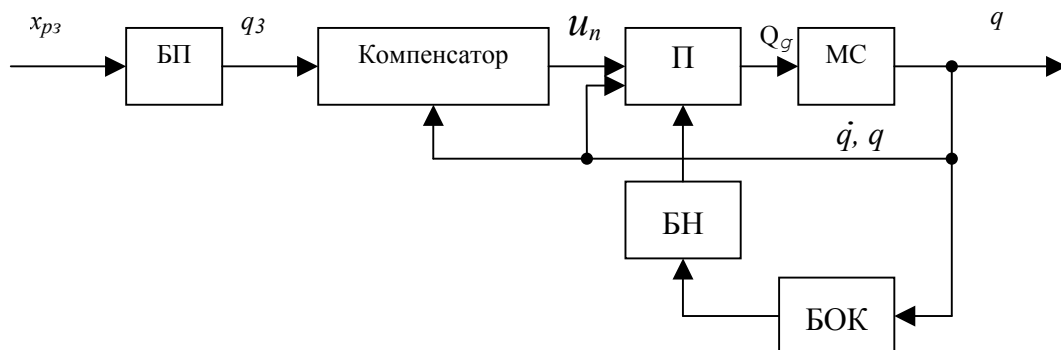


Рис. 5.9. Схема системы управления манипулятором с самообучающейся экспертной системой настройки: БП — блок программирования; БН — блок настройки; БОК — блок оценки качества; П — система приводов; МС — механическая система манипулятора

Путем изменения настройки приводов устраняются неточности, осуществляемые на втором уровне, компенсаций нелинейностей и взаимовлияний приводов, и все параметрические возмущения в системе управления в целом.

Вместо компенсатора с подстройкой, описанного в § 4.4, в этой схеме можно применить в качестве его имитационной модели обучающуюся многослойную искусственную нейронную сеть. В этом случае отпадает необходимость в знании математической модели управляемого объекта. На рис. 5.10,*а* показана структура системы управления приводом на базе искусственных нейронных сетей [15: НС-УУ — нейронное устройство управления, а НС-Модель — нейросетевая модель объекта управления (идентификатор). НС-Модель настраивается на объект по сигналу рассогласования их выходов и формирует обучающую выборку для подстройки НС-УУ в соответствии с принятым критерием качества управления (быстродействие, энергопотребление и т. п.) при изменении параметров объекта и среды. Здесь использованы трехслойные нейронные сети прямого распространения, осуществляющие статическое нелинейное преобразование входного вектора в выходной (см. рис. 5.10,*б*). Для обеспечения необходимых динамических свойств у НС-Модели в ней введены внешние обратные связи. Настройка нейронных сетей осуществляется изменением весовых коэффициентов связей и параметров нейронов методом обратного распространения ошибки.

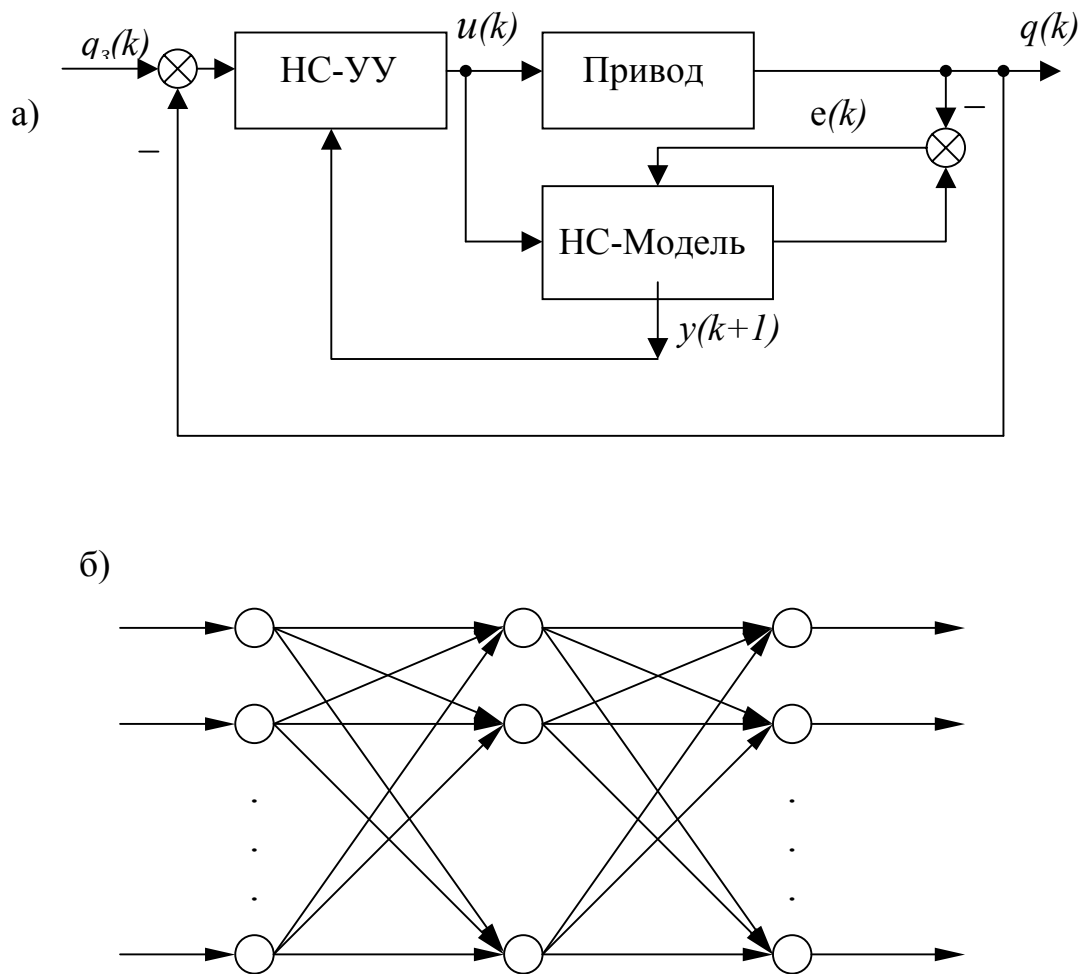


Рис. 5.10. Система управления приводом на базе нейронных сетей: а — структура системы; б — структура НС-Модели.

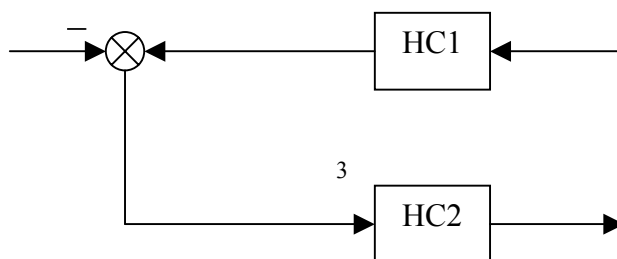


Рис. 5.11. Обобщенная структура системы управления манипулятором по абсолютным координатам его рабочего органа на базе нейронных сетей.

На основе этой схемы была разработана система управления манипулятора, которая приведена на рис. 5.11. Здесь нейронная сеть $НС_1$ решает прямую задачу кинематики $x_p = f(q)$, а $НС_2$ — обратную $q = f^{-1}(x_p)$. Критерий настройки нейронных сетей здесь — рассогласование векторов q_3 и q .

Основные достоинства искусственных нейросетевых систем — быстроедействие, обусловленное параллельной обработкой компонентов векторных перемещений и простотой, связанной, в частности, с простотой имитационных нейросетевых моделей.

Пример системы управления на ассоциативной памяти был приведен на рис. 5.3 при рассмотрении систем адаптивного управления приводами. Наличие и степень интеллектуальности этой системы определяются содержанием и способом заполнения ассоциативной памяти. Например, если эта память заполняется на основе экспертных данных, уровень интеллекта системы будет, естественно, определяться уровнем этих данных.

По сравнению с рассмотренными системами управления на базе экспертных систем, системы, использующие ассоциативную память, выгодно отличаются быстроедействием благодаря практически мгновенному формированию ассоциаций с выбором из памяти настроек или управляющих сигналов без процесса сопоставления альтернативных решений и выбора наилучшего. Конечно, это дается ценой неизбежного снижения качества управления по сравнению с полноценной экспертной системой с организацией логического вывода на знаниях из-за большей грубости принимаемых решений и соответственно большего отклонения от их оптимума. Отметим, что системы управления на базе ассоциативной памяти по быстроедействию более чем на порядок превосходят также и все традиционные системы адаптивного управления [15].

Как было отмечено, в системах интеллектуального управления находит все большее применение нечеткая логика [15]. Она позволяет формализовать описание процессов и систем при неполном знании о них, т. е. формализовать неопределенности. Пусть, например, для некоторого объекта известны (выбраны) значения компонентов вектора выходной переменной только для нескольких

дискретных значений вектора выходного воздействия. С помощью аппарата нечеткой логики по этим данным можно описать зависимость “вход – выход” во всем диапазоне возможных значений выходного воздействия. Делают это следующим образом. Для каждой компоненты выходного вектора во всем диапазоне ее изменений устанавливается последовательность лингвистических (дискретных) переменных (например, очень большое, большое, среднее, малое, очень малое и т. п.). Каждому такому дискретному значению придается функция принадлежности, которая определяет степень уменьшения доверия к факту принадлежности выходной компоненты к этому дискретному значению по мере удаления входного воздействия от соответствующего ему значения.

Удобной аппаратной реализацией таких логико-лингвистических зависимостей на основе нечеткой логики являются, в частности, нейронные сети.

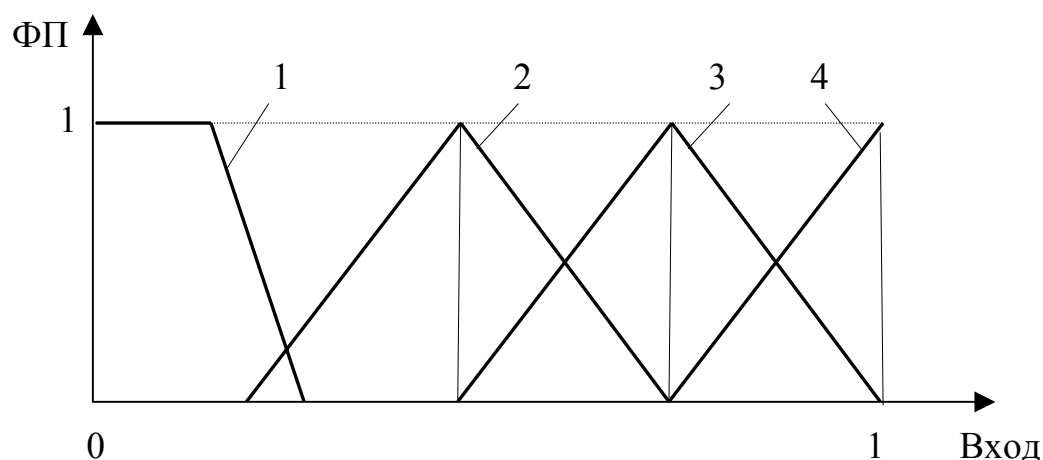


Рис. 5.12. Пример функций принадлежности (ФП)

На рис. 5.12 показан пример описания зависимости “вход — выход” для объекта с одним входом с помощью четырех функций принадлежности. Последние построены в относительных единицах. Каждая функция принадлежности определяет свое дискретное значение выходной величины, а ее ордината — степень доверия к факту принадлежности выходной величины к этому значению.

На рис. 5.13 приведена функциональная схема системы нечеткого управления скоростного привода, основанная на нечеткой логике [15], где Φ_1 и Φ_2 — фузификаторы (fuzzy (англ.) — нечеткий), которые осуществляют преобразование входных переменных e , $\dot{e}$ в лингвистические (дискретные) переменные E_e , $E_{\dot{e}}$ с помощью функций принадлежности. На рис. 5.14 показаны эти функции для рассогласования по скорости $\dot{e}$. Здесь три функции принадлежности — П, Н и О, которые соответствуют трем выраженным в относительных единицах дискретным значениям лингвистической переменной: положительному +1, нулевому 0 и отрицательному -1.

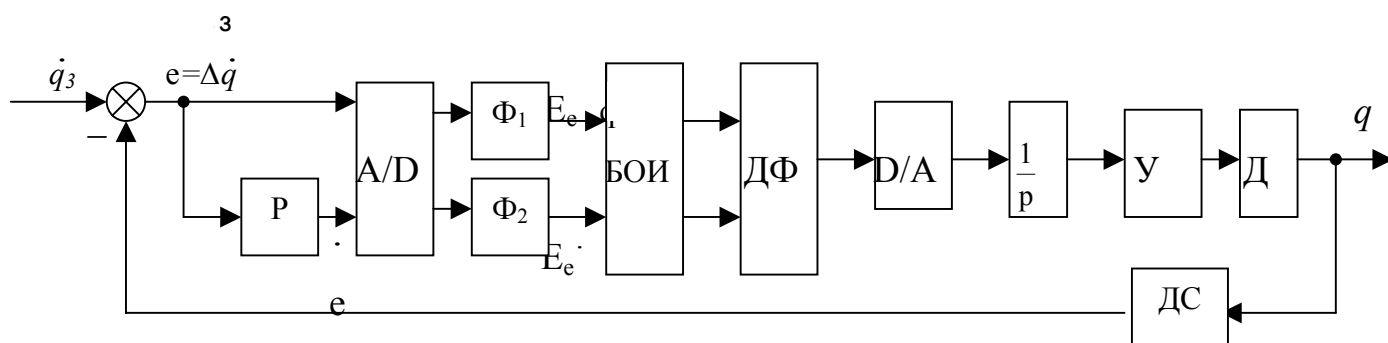


Рис. 5.13. Функциональная схема системы нечеткого управления привода: Φ_1 , Φ_2 — фузификаторы; ДФ — дефузификатор; А/Д, Д/А — аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи; БОИ — блок обработки информации

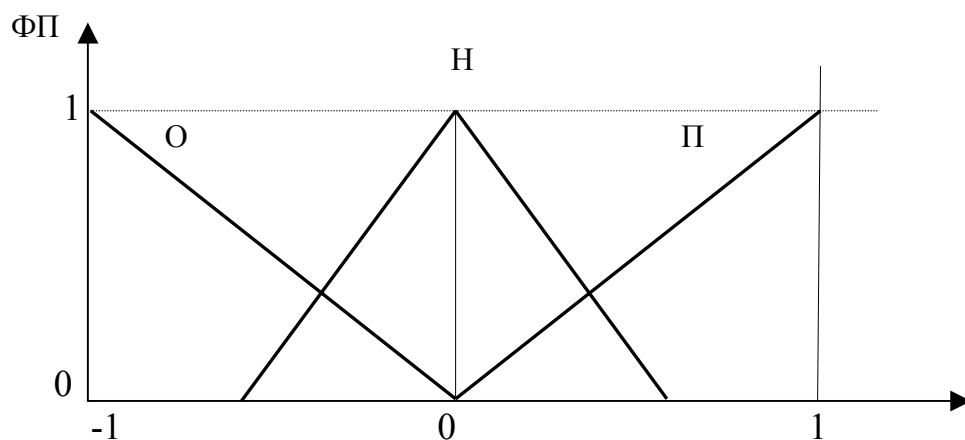


Рис. 5.14. Функции принадлежности рассогласования по скорости: П — положительная скорость; Н — нулевая; О — отрицательная

Сложение двух входных лингвистических переменных E_e , $E_{\bar{e}}$, каждая из которых может принимать одно из трех дискретных значений, дает девять возможных значений выходной лингвистической переменной E_{Π} (табл. 5.1)

Таблица 5.1

Значения E_e

E_e	E_e	П	Н	О
П		ПП (0,4)	ПН (0,8)	ПО (1)
Н		НП (-0,05)	НН (0)	НО (0,05)
О		ОП (-1)	ОН (0,8)	ОО (-0,4)

В скобках указаны экспертно подобранные численные значения E_{Π} . Далее чтобы реализовать нечеткое управление, с помощью функций принадлежности осуществляется переход к нечетким значениям логических переменных. Это делают в дефузификаторе ДФ по формуле

$$u = \frac{\sum_i \alpha_i x_i}{\sum_i \alpha_i},$$

где x_i — лингвистические переменные на входе ДФ, определяемые таблицей, α_i — значения соответствующих функций принадлежности. Пусть, например, для некоторых значений входных переменных e , $\bar{e}$ по функциям принадлежности их лингвистические переменные имеют значения $E_e = 0,15П + 0,5Н$ и $E_{\bar{e}} = 0,7П$. С помощью табл. 5.1 по формуле находим значение непрерывной входной переменной:

$$u = \frac{(0,15 + 0,7)П + (0,5 + 0,7)Н}{0,15 + 0,7 + 0,5 + 0,7} = \frac{0,85 \cdot 0,4 - 1,2 \cdot 0,05}{2,05} \cong 0,2$$

Основная трудность синтеза систем нечеткого управления заключается в выборе числа и значений логических переменных и функций принадлежности. Сегодня это осуществляется с помощью экспертных оценок. Наряду с самостоятельным использованием в системах нечеткого управления нечеткая логика применяется во всех рассмотренных интеллектуальных технологиях — экспертных системах, нейронных сетях, ассоциативной памяти, когда имеет место

неопределенность, которую нельзя описать с помощью традиционного вероятностного подхода.

Как уже упоминалось, наиболее сложным типом систем интеллектуального управления являются системы семиотического управления, основанные на логико-лингвистических моделях объекта управления. Основные компоненты устройства управления таких систем:

анализатор ситуации, который определяет, когда требуется воздействие на объект; классификатор, который на основании получаемого от анализатора описания текущей ситуации, осуществляет ее классификацию, относя к одному из классов ситуаций, каждому из которых соответствует одно определенное управляющее воздействие на объект;

коррелятор, который по полученной от классификатора информации о классе текущей ситуации выбирает из базы управляющих воздействий соответствующее этому классу;

экстраполятор, который включается, если предложено несколько решений, и выбирает наилучшее из них;

блок случайного выбора, который включается в противоположном случае, когда решение не найдено, вырабатывает не слишком сильное воздействие на объект, чтобы как-то изменить ситуацию, сделав ее более определенной.

До начала работы такой системы семиотического управления необходим этап ее обучения, когда с помощью экспертов формируется база знаний в виде набора классов ситуаций и соответствующих им решений в виде реакций на ситуации каждого класса. С помощью экспертов формируется так же и процедура экстраполяции.

§ 5.4. Особенности управления средствами передвижения роботов

Управление передвижением мобильных роботов — это чисто транспортная задача, которая не имеет принципиальной специфики применительно к робототехнике. Это относится и к самой системе передвижения роботов за

исключением маломощных транспортных машин, которые в силу близости их педипуляторов (“ног”) к манипуляторам традиционно являются специальным разделом робототехники. Однако и этот предмет выходит за рамки настоящего общего курса управления роботами. Поэтому мы остановимся только на особенностях управления передвижением роботов по сравнению с управлением манипуляторами.

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

Рассмотрим эти особенности применительно к мобильным роботам, передвигающимся по произвольной местности. В этом случае модель этой среды представляет собой карту местности, которая помимо априорных сведений составляется и уточняется в ходе движения на основе сенсорной информации (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые локаторы, системы технического зрения). Эта модель должна иметь как минимум два уровня по масштабу: первый — в пределах достигаемости сенсорных систем, второй — для местности непосредственно перед роботом.

Модель первого уровня местности служит для прокладки маршрута движения в соответствии с заданной целью. Варианты целей: поиск конкретных объектов (по заданным признакам), достижение определенной точки на местности, заданной координатами, движение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (инспекция, нанесение покрытия, очистка и т. д.).

Вторая, более подробная, модель ближайшего участка местности необходима для уточнения трассы непосредственно перед роботом, включая обход мелких и

скрытых препятствий, не отмеченных на общей карте местности первого уровня, и обеспечения безопасности движения.

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

На рис. 5.15 приведена типовая схема системы управления движением мобильного робота. Блок управления движением БУД осуществляет управление тяговыми приводами и приводами повтора шасси. Блок построения маршрута синтезирует траекторию движения, оптимизируя ее обычно по минимуму расхода энергии, что особенно важно для роботов с автономным энергопитанием, или по минимуму времени выполнения задания, когда в постановку задачи входит условие обеспечения максимального быстродействия. Блок построения карты местности представляет ее в форме, удобной для решения задачи выбора маршрута, в частности, с выделением непреодолимых препятствий и опасных или неясных участков.

Если выполнение задачи требует знания большего участка местности, чем дают сенсорные системы в начальном положении робота, т. е. до начала движения, карта местности формируется и передается в блок построения маршрута фрагментами по мере передвижения робота. Такими же участками последовательно осуществляется и синтез траектории движения. В этом случае первое приближение для всей траектории делается по имеющейся априорной информации о местности или, как минимум, определяется только общее направление движения.

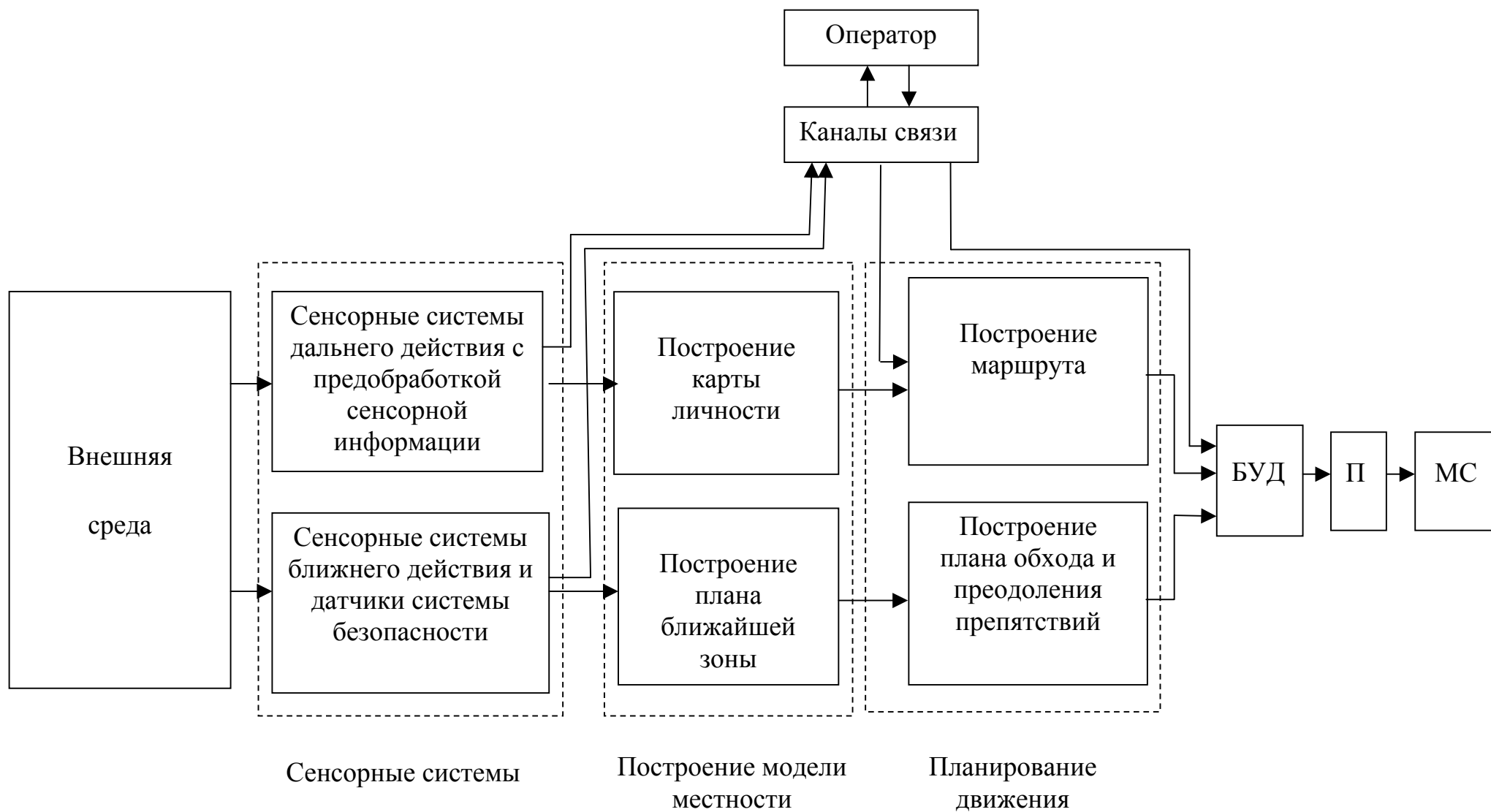


Рис.5.15. Функциональная схема системы управления движением по местности мобильного робота:

БУД – блок управления движением

Рис. 5.15. Функциональная схема системы управления движением по местности мобильного робота: БУД — блок управления движением

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

Требуемый уровень адаптации и искусственного интеллекта системы определяется степенью неопределенности и сложности местности и характером подлежащих выполнению заданий, т. е. назначением робота. В последнем отношении основное значение имеет минимально необходимая степень автономности управления роботом, определяемая перечнем его действий, которые должны выполняться без участия человека-оператора. При этом учитывается и возможность временной потери связи с оператором, ограниченная пропускная способность каналов связи, неполнота и ограниченная достоверность получаемой оператором от робота информации и ее задержка во времени. Например, если из-за высокого уровня помех в канале передачи оператору не видно изображения панорамы местности перед роботом, оператор только эпизодически получает эту информацию, он имеет возможность вмешиваться в автономное движение робота только в порядке контроля и корректировки маршрута движения путем целеуказания отдельных промежуточных точек трассы в моменты ее достоверного наблюдения. (О способах управления передвижением робота со стороны человека-оператора см. в § 6.6.).

ГЛАВА 6. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ РОБОТОТЕХНИКИ ЧЕЛОВЕКОМ-ОПЕРАТОРОМ

§ 6.1. Классификация системы управления средствами робототехники человеком-оператором

Рассмотрим системы управления роботов и других средств робототехники с человеком-оператором в контуре управления. Такие системы, как известно, относятся уже не к системам автоматического управления (САУ), рассмотренным ранее, а к автоматизированным системам управления (АСУ), в более широком плане — к человеко-машинным или биотехническим системам.

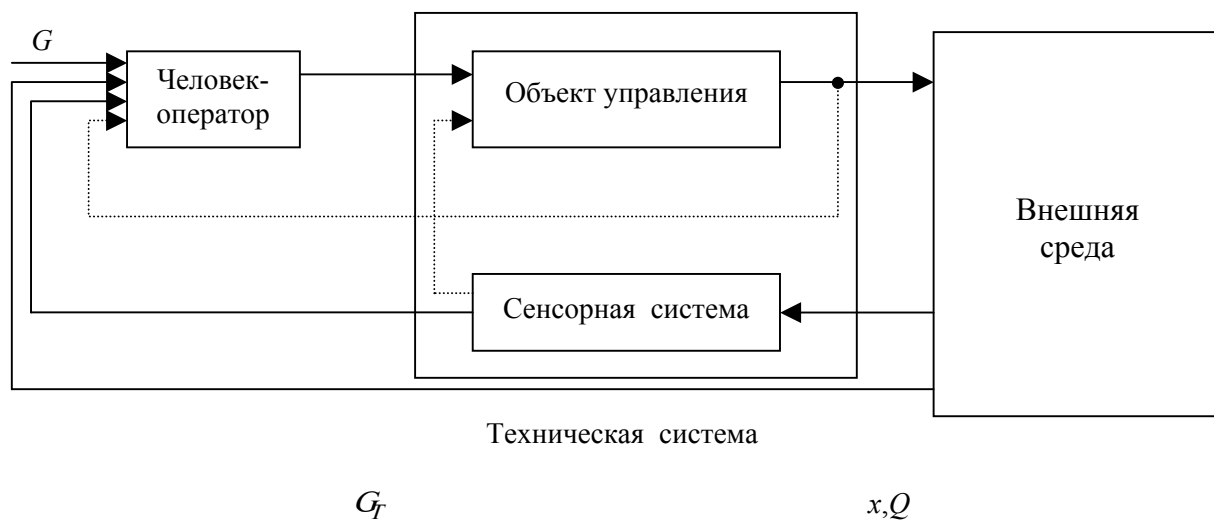


Рис. 6.1. Схема человеко-машинной системы управления

На рис. 6.1 приведена схема системы управления техническим объектом с человеком-оператором в контуре управления. Здесь человек-оператор выполняет функции устройства управления. Он получает или сам формирует задание G для управляемой им технической системы, получает информацию от сенсорной системы и помимо нее с помощью своих органов чувств о состоянии внешней среды и самой управляемой технической системы и формирует управляющие воздействия G_m на эту систему так, чтобы обеспечить изменение контролируемых ее выходных переменных x и Q в соответствии с заданием.

Области применения такого управления — когда реализация автоматического управления невозможна на базе современной техники или невыгодна по сравнению с управлением человеком.

Первый вариант соответствует достаточно сложным техническим операциям и объектам управления. Примеры технологических операций: свободнаяковка, дуговая сварка сложных изделий, некоторые сборочные и настроечные операции, различные аварийно-спасательные операции. Примеры объектов: мобильные роботы в сложной непредсказуемой обстановке, космические и подводные манипуляторы.

Ко второму варианту, когда человеческое управление может оказаться более предпочтительным. относятся некоторые технологические операции, которые человек делает быстрее, качественнее и дешевле, хотя они вполне поддаются роботизации (например, некоторые сборочные и сварочные операции) или особо ответственные операции, которые человек не может доверить автомату (некоторые операции в космосе, под водой в экстремальных ситуациях). В последнем случае оптимальным решением обычно является комбинация автоматического и автоматизированного от человека-оператора управления.

Практически во всех системах называемых автоматическими, человек-оператор, все-таки эпизодически участвует в процессе управления. Это может быть на этапе программирования, при взятии на себя оператором управления в аварийной или нештатной ситуации, оперативной корректировка действий робота при изменении ситуации или с целью повышения их эффективности.

Рассмотрение систем управления со стороны человека-оператора начнем с их классификации.

1. В зависимости от уровня в иерархии управления движением, на котором участвует человек (см. рис. 5.1), различают следующие типы такого управления:

командное управление отдельными приводами на первом уровне управления; управление копирующее и с помощью задающей рукоятки на втором (программном) и третьем (адаптивном) уровнях; супервизорное и интерактивное управление на четвертом уровне.

2. По месту нахождения (удалению) человека-оператора относительно управляемого объекта различают:

местное управление;

дистанционное управление;

с механической или электрической связью с управляемым объектом (на десятки метров);

кабельное управление (до сотен метров);

телеуправление (управление по каналам связи, дальность не ограничена).

Иногда телеуправление рассматривается как вариант дистанционного управления, однако его целесообразно выделить, поскольку переход к телеуправлению предполагает введение в систему управления системы связи, в которой передаваемая информация претерпевает преобразование в форму, специально предназначенную для передачи на большие расстояния. При этом эта система связи может оказаться значительно сложнее всей остальной системы управления.

3. По виду режима работы, в котором участвует человек, возможны следующие варианты такого участия:

выполнение функций верхних уровней системы управления (обработка сенсорной информации, оценка ситуации, синтез модели внешней среды, планирование поведения);

управление выполнением конкретных технологических операций;

программирование.

4. По способу подключения человека-оператора к технической системе существуют следующие варианты соответствующих устройств:

устройства управления, входящие в состав управляемого объекта (средства робототехники) и специально предназначенные для управления объектом только от человека-оператора (например, задающий манипулятор в системе копирующего манипулятора);

устройства, входящие в состав устройства автоматического управления и предназначенные для перехода на управление со стороны человека-оператора (например, пульт оператора для программирования робота методом обучения);

специальные устройства, выполняющие функции интерфейса “человек-робот“, которые могут подключаться к устройству управления робота для выполнения каких-либо (из перечисленных выше) функций по его управлению.

Далее рассмотрим системы управления согласно первой классификации по уровню управления.

§ 6.2. Системы командного управления

Такое управление предполагает подключение человека-оператора на нижнем уровне управления роботом для управления отдельными приводами, и осуществляется в релейном режиме управления перемещением и скоростью.

Командное управление применяется исключительно как дополнительный способ управления, например, в промышленных роботах для их программирования методом обучения, а также в аварийных и нештатных ситуациях. Точность такого управления определяется умением оператора, через которого замыкается зрительная обратная связь в контуре управления. Быстродействие при этом очень низкое, так как, во-первых, для получения приемлемой точности такое управление ведется обычно на сниженной скорости, а, во-вторых, потому, что здесь приводы работают последовательно.

§ 6.3. Системы копирующего управления манипулятором

Этот способ дистанционного управления манипуляторами человеком-оператором был изобретен для выполнения работ в опасных для человека условиях. Рис. 6.2 иллюстрирует принцип такого управления. Объектом управления является исполнительный манипулятор ИМ, который можно назвать также копирующим, а органом управления им служит задающий манипулятор ЗМ. Задающий манипулятор кинематически подобен исполнительному. Вместо рабочего органа, как у исполнительного манипулятора, у задающего имеется рукоятка, которую оператор держит в своей руке. Оператор, перемещая эту рукоятку, заставляет рабочий орган исполнительного манипулятора повторять это движение. Таким образом, исполнительный манипулятор повторяет, копирует движение задающего. Отсюда название этой манипуляционной системы — копирующий манипулятор.

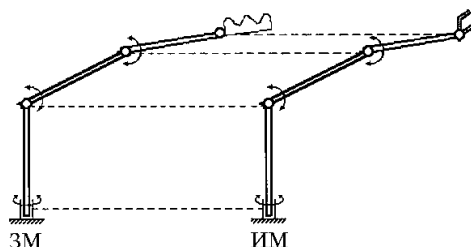


Рис. 6.2. Принцип действия копирующего манипулятора

В самых первых конструкциях таких манипуляторов не было приводов. Звенья исполнительного и задающего манипуляторов были соединены механическими тросами и тягами, посредством которых исполнительный манипулятор перемещался под действием усилия со стороны человека-оператора, приложенного к задающему манипулятору. В следующем поколении копирующих манипуляторов эти механические связи были заменены электрическими в виде синхронных передач. На рис. 6.3 показан внешний вид такой системы из двух копирующих манипуляторов типа МЭМ со снятыми кожухами с блоков приводов.

Значительно большие точность, быстродействие и практически неограниченную грузоподъемность имеют копирующие манипуляторы на следящих приводах, которые отрабатывают рассогласование датчиков положения соответствующих звеньев обоих манипуляторов. В результате исполнительный манипулятор в целом и его рабочий орган отслеживают положение задающего манипулятора, перемещаемого оператором.

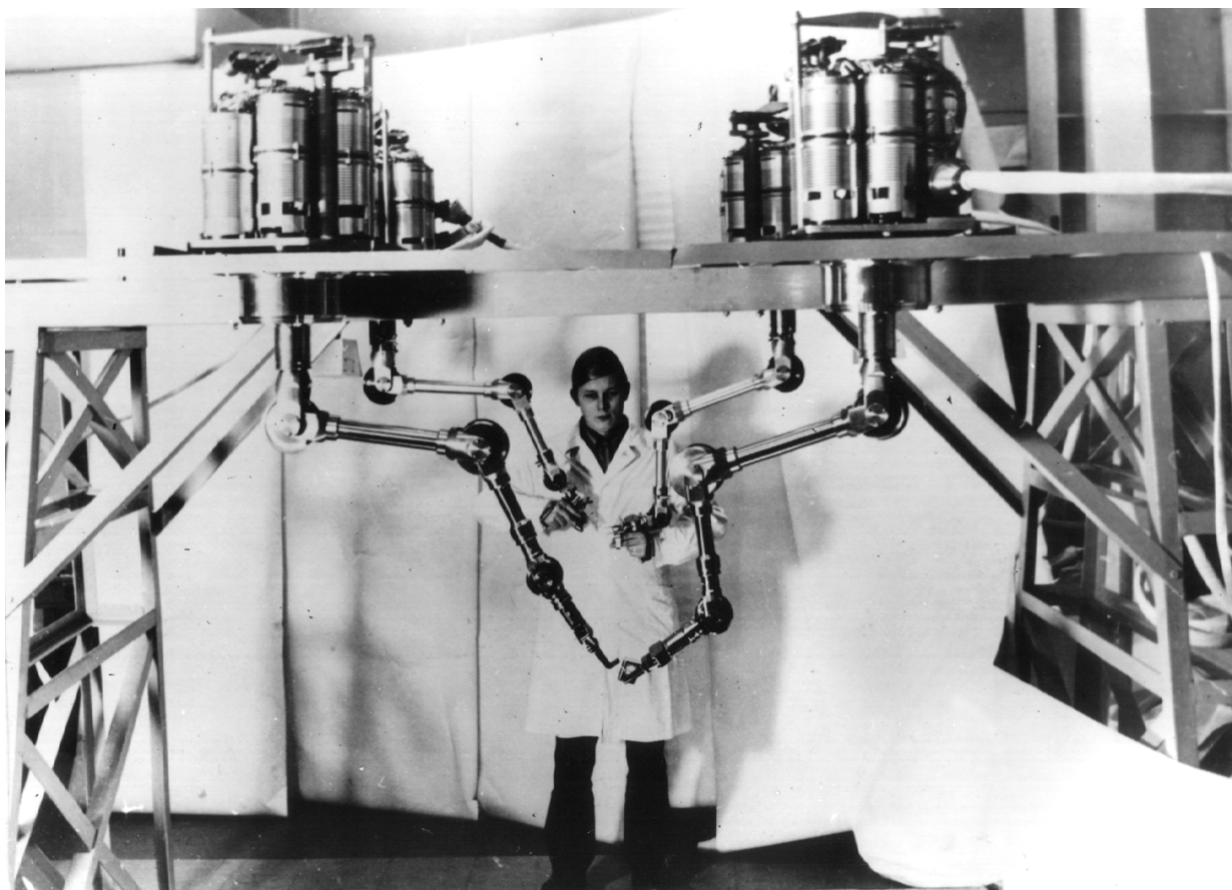


Рис. 6.3 Электрический копирующий манипулятор типа МЭМ

Задающий манипулятор может быть намного меньше исполнительного, чтобы лучше соответствовать размерам рабочей зоны руки человека, а также ограничениям на пространство, предоставляемое оператору с пультом управления, где размещается задающий манипулятор.

Существуют два типа систем копирующих манипуляторов — необратимые, или одностороннего действия (ОДС), и обратимые, или двустороннего действия (ДСД). Второй тип отличается от первого наличием эффекта силового очувствления. Оператор, перемещая задающий манипулятор, ощущает на своей руке противодействующее усилие, пропорциональное усилию, с которым рабочий орган исполнительного манипулятора действует на объекты внешней среды (так называемый эффект отражения усилия). В предыдущей главе уже говорилось, что такое очувствление необходимо для выполнения движений при наличии внешних связей и препятствий (операции сборки типа “вал – втулка” и резьбового соединения, силовое сканирование поверхности и т. п.)

Если в копирующих манипуляторах одностороннего действия приводы отсутствуют, то в системах двустороннего действия они необходимы для осуществления указанного эффекта силового очувствления. Описанные виды копирующих манипуляторов относятся к манипуляторам двустороннего действия.

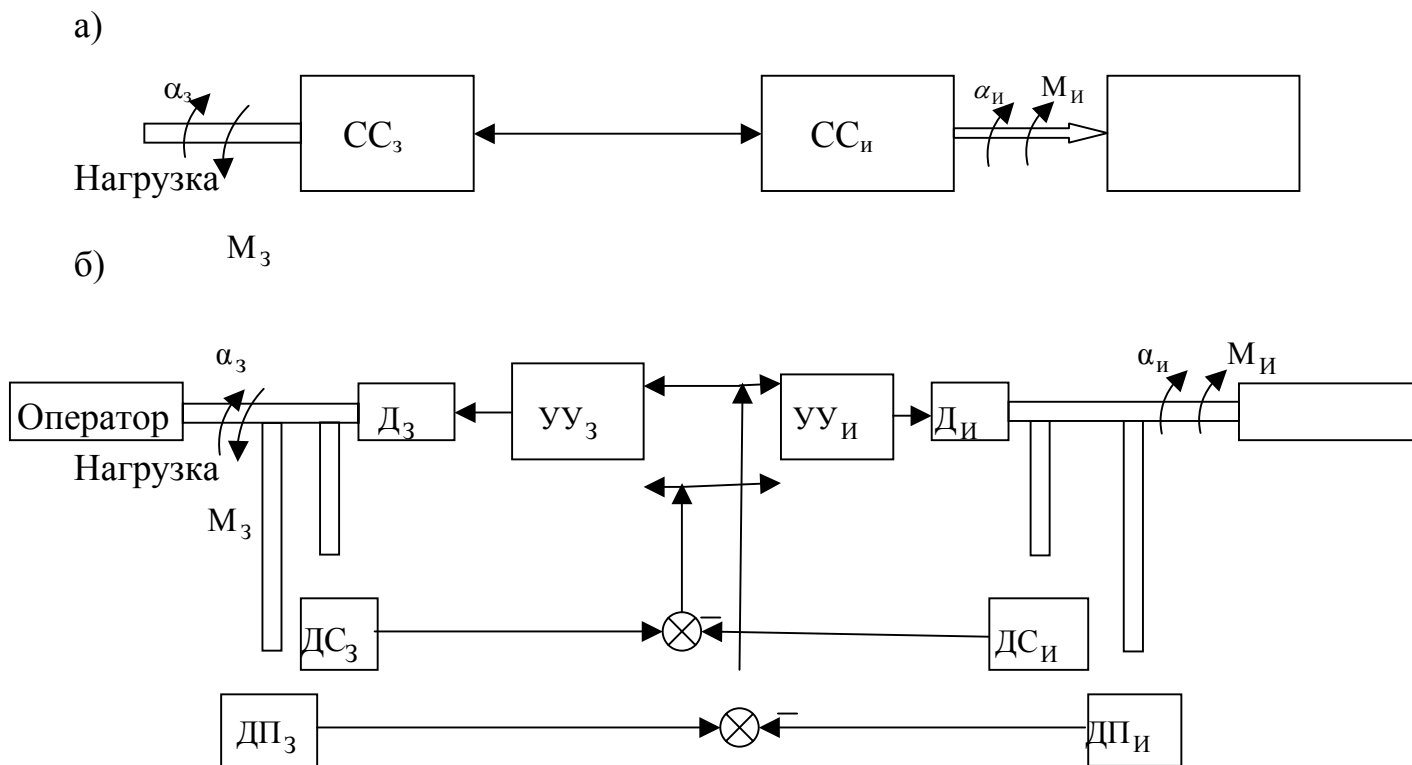


Рис. 6.4. Функциональная схема симметричной системы управления степенью подвижности копирующего манипулятора: УУ_з, УУ_и — устройства управления привода задающего и исполнительного манипуляторов

На рис. 6.4 приведена типовая функциональная схема одного канала копирующего манипулятора двустороннего действия со следящими приводами. Эта схема называется симметричной, так как в ней задающая и исполнительная части идентичны. На вход приводов подается с разным знаком рассогласование

$$\Delta\alpha = \alpha_{и} - \alpha_{з},$$

где $\alpha_{и}$ и $\alpha_{з}$ — углы поворота приводов одной степени подвижности соответственно исполнительного и задающего манипуляторов. Скоростная обратная связь, осуществляемая с помощью датчиков скорости ДС_и, ДС_з, создает обычную динамическую коррекцию.

При повороте оператором задающей оси на угол $\alpha_{з}$ возникает рассогласование $\Delta\alpha$, которое приводит к созданию на исполнительной оси движущего момента $M_{и}$, сонаправленного с $\alpha_{з}$ и вызывающего изменение $\alpha_{и}$ в том же направлении.

На задающей стороне под действием этого же сигнала рассогласования $\Delta\alpha$, поступающего с обратным знаком, возникает такой же по величине момент, но соответственно направленный против поворота $\alpha_{и}$, т. е. противодействующий изменению $\alpha_{и}$. Оператор воспринимает этот момент, так как если бы он непосредственно поворачивал исполнительную ось,

преодолевая сопротивление нагрузки. Это и есть эффект отображения усилия.

Динамика системы (см. рис. 6.3) в линейном приближении может быть описана следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} J_3 p^2 \alpha_3 + k'_3 p \alpha_3 &= M_3 + W'_3(p) p \Delta p + W_3(p) \Delta p, \\ (J_{\text{И}} + J_{\text{Н}}) p^2 \alpha_{\text{И}} + k'_{\text{И}} &= -M_{\text{И}} - W'_{\text{И}}(p) p \Delta p - W_{\text{И}}(p) \Delta p, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где $\Delta \alpha = \alpha_{\text{И}} - \alpha_3$; $k'_3, k'_{\text{И}}$ — коэффициенты демпфирующих скоростных сил; $J_3, J_{\text{И}}, J_{\text{Н}}$ — моменты инерции; $W'_3(p), W_3(p); W'_{\text{И}}(p), W_{\text{И}}(p)$ — передаточные функции скоростных и позиционных контуров приводов на задающей и исполнительной сторонах.

Выразив из второго уравнения $\Delta \alpha$ и подставив это выражение в первое, получим:

$$M_3 = \frac{W_3(p) + p W'_3(p)}{W_{\text{И}}(p) + p W'_{\text{И}}(p)} [M_{\text{И}} + (J_{\text{И}} + J_{\text{Н}}) p^2 \alpha_{\text{И}} + k'_{\text{И}} p \alpha_{\text{И}}] \quad (6.2)$$

$$+ J_3 p^2 \alpha_3 = k'_3 p \alpha_3$$

Полагая задающую и исполнительную системы управления идентичными, можно упростить выражение перед квадратной скобкой следующим образом:

$$\frac{W_3(p) + p W'_3(p)}{W_{\text{И}}(p) + p W'_{\text{И}}(p)} \cong \frac{W_3(0)}{W_{\text{И}}(0)} = \frac{k_3}{k_{\text{И}}} = k_{\text{М}}. \quad (6.3)$$

Здесь $k_{\text{М}}$ — коэффициент масштабирования ощущения оператором нагрузки на исполнительной оси.

С учетом (6.3)

$$M_3 = k_{\text{М}} [M_{\text{И}} + (J_{\text{И}} + J_{\text{Н}}) p^2 \alpha_{\text{И}} - k'_{\text{И}} p \alpha_{\text{И}}] + J_3 p^2 \alpha_3 + k'_3 p \alpha_3. \quad (6.4)$$

Погрешность отражения усилия

$$\Delta M = M_3 - k_{\text{М}} (M_{\text{И}} + J_{\text{Н}} p^2 \alpha_{\text{И}}) = (J_3 p^2 + k'_3 p) \alpha_3 + k_{\text{М}} (J_{\text{И}} p^2 + k'_{\text{И}} p) \alpha_{\text{И}}.$$

Первый член этого выражения — внутренний момент на задающей стороне, а второй — на исполнительной стороне. В этих членах первое слагаемое определяет погрешность, вызванную инерционностью приводов, а второе — скоростными силами сопротивления. Для уменьшения этой погрешности в приводах применяют положительную скоростную обратную связь, компенсирующую члены $k'_3 p \alpha_3$ и $k'_{\text{И}} p \alpha_{\text{И}}$, и последовательную коррекцию в виде ПИ-звеньев для устранения статической ошибки слежения.

Однако кардинальный путь повышения точности отражения усилия — это применение на задающей стороне контура управления непосредственно по разности $(M_3 - k_M M_{II})$.

На рис. 6.5 показана схема соответствующей системы управления. Это несимметричная схема, в которой исполнительный привод отражает угол α_3 , в то время как задающий привод отрабатывает момент M_{II} . Для демпфирования этого привода и получения необходимого качества отработки момента применяют гибкие обратные связи и последовательные корректирующие звенья.

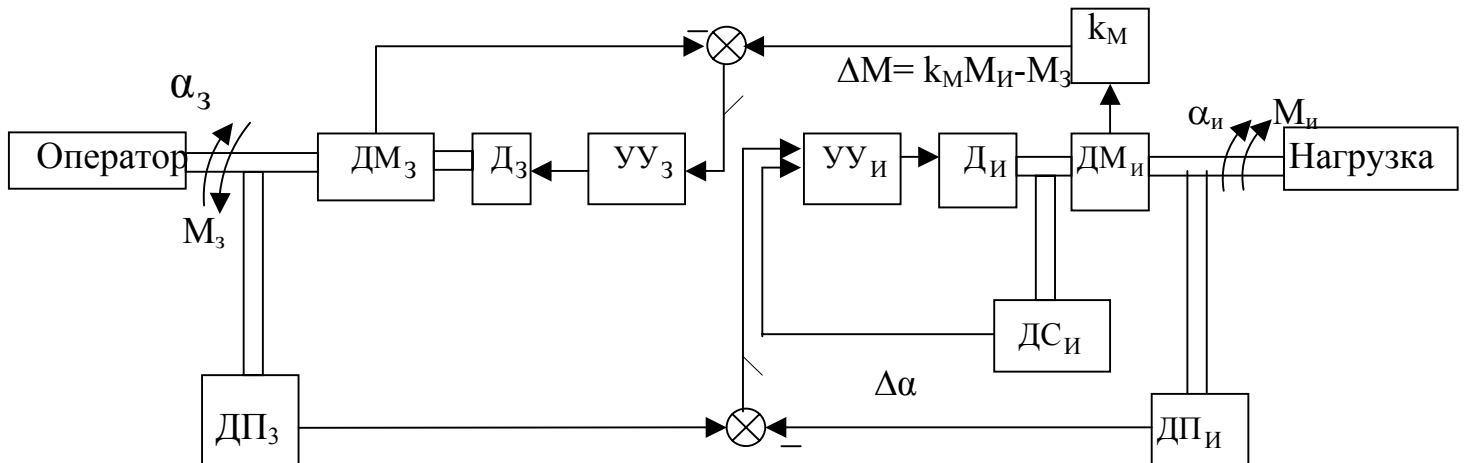


Рис. 6.5. Функциональная схема несимметричной системы управления степенью подвижности копирующего манипулятора: ДМ_з, ДМ_и — датчики момента

В рассматриваемых системах копирующего управления, т. е. в копирующих манипуляторах, для максимального расширения их функциональных возможностей с целью приведения их в соответствие с возможностями управляющего манипулятором человека-оператора широко применяются средства адаптации вплоть до структурной, когда при изменении задания или внешних условий осуществляется изменение алгоритма управления, т. е. структуры системы. Так, например, при выполнении транспортных операций по перемещению грузов или просто перемещению рабочего органа исполнительного манипулятора к месту предстоящего выполнения технологической операции целесообразно отключать ненужный для такой операции контур отражения усилия с тем, чтобы облегчить оператору выполнение этой операции и устранить необходимость физического преодоления этого противодействующего усилия. Особенно это существенно при перемещении больших грузов и в течение длительного времени.

Этот эффект превращения системы в различных режимах работы из обратимой в необратимую может быть достигнут и чисто конструктивно введением в привод самотормозящих передач (например, червячных). Такие передачи исключают движение и передачу усилия в обратном направлении,

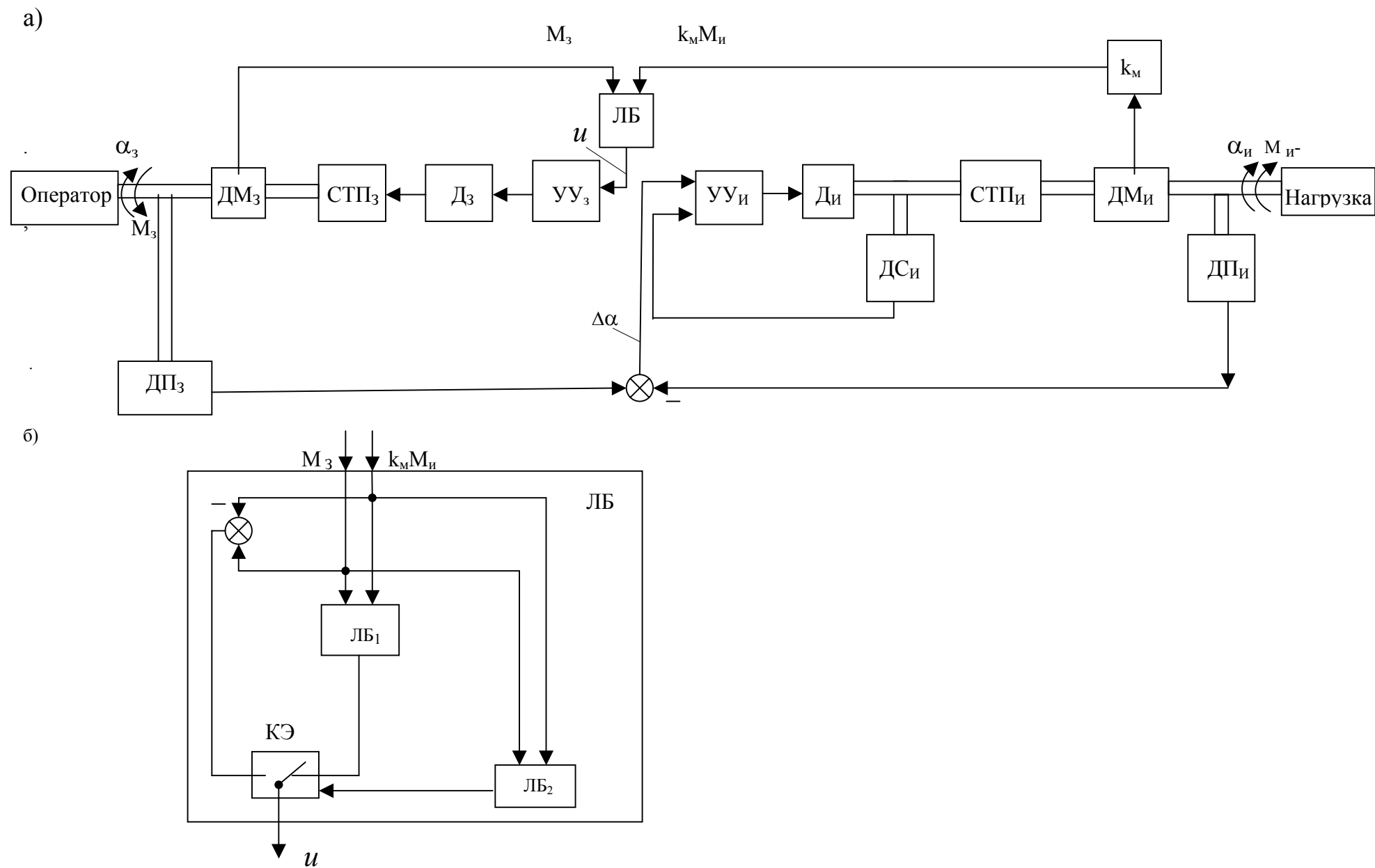


Рис.6.6. Функциональная схема системы управления с переменной структурой для одной степени подвижности копирующего манипулятора :ДМ - датчики моментов, СТП- самотормозящая передача, ЛБ- логический блок, КЭ- коммутирующий элемент.

делая систему необратимой. Если ввести, например, самотормозящие передачи в оба привода (после двигателей) в схеме симметричной системы (см. рис. 6.5), то оператор получает возможность, повернув задающую ось, отпустить ее на время, пока привод на исполнительной стороне отработает это перемещение. Задающая ось при этом будет самотормозиться. В то же время, когда оператор поворачивает задающую ось, будет действовать эффект отражения усилия.

На рис. 6.6 показана схема одного канала системы управления копирующего манипулятора с переменной структурой. Изменения последней и соответственно алгоритма управления на задающей стороне осуществляет логический блок ЛБ. В системе применены и самотормозящиеся передачи СТП.

Алгоритм управления задающим приводом имеет вид [15]:

$$u = \begin{cases} k(M_3 - k_M M_{II}), & \text{при } |M_3| > k_M |M_{II}| \text{ и } M_3 M_{II} < 0, \\ kM_3 & \text{при } |M_3| > k_M |M_{II}| \text{ и } M_3 M_{II} > 0, \\ 0 & \text{при } |M_3| \leq k_M |M_{II}|, \end{cases}$$

где k — коэффициент передачи датчиков момента. Здесь первая строка соответствует основному режиму работы системы как обратимой с отражением усилия, вторая — варианту, когда знак M_{II} совпадает со знаком M_3 и благодаря самотормозящей передаче оператор не ощущает нагрузку M_{II} . Третья строка соответствует неподвижному состоянию задающей оси, когда $k_M M_{II} \geq M_3$. Переключение режимов может осуществляться и вручную оператором.

В заключение рассмотрения систем управления копирующих манипуляторов перечислим все возможные режимы работы этих систем по-прежнему применительно к одной их степени подвижности. В соответствии с имеющимися четырьмя переменными на входе и выходе: $\alpha_I, \alpha_3, M_3, M_{II}$ возможны следующие четыре режима, в каждом из которых одна из этих переменных является независимой:

1. Режим отработки задаваемого оператором перемещения $\alpha_3(t)$. В этом режиме независимой переменной является $\alpha_3(t)$. Момент M_{II} является реакцией внешней среды, которую оператор преодолевает, перемещая задающую ось.

2. Режим отработки заданного момента $M_3(t)$. Здесь оператор, перемещая задающую ось и чувствуя возникающее при этом противодействующее усилие, поддерживает заданную величину этого усилия. Подобный режим требуется по отдельным степеням подвижности, например, при выполнении манипулятором операций, связанных с дозированным силовым воздействием на объект внешней среды (очистка и полировка поверхности, резка и т. п.).

3. Режим задаваемого извне вынужденного движения исполнительской оси $\alpha_{\text{и}}(t)$. Задача оператора в этом режиме — приложить к исполнительской оси определенное усилие. Операцией, требующей такого режима для степеней подвижности копирующего манипулятора, может быть силовое участие в осуществляемом под действием внешних сил вынужденном движении исполнительской оси путем развития на этой оси определенного управляемого оператором момента $M_{\text{и}}$. Пример такой операции — участие в перемещении какого-то объекта совместно с другим средством, которое определяет траекторию этого движения.

4. Режим компенсации (уравновешивания) момента нагрузки $M_{\text{и}}(t)$. К исполнительской оси приложено извне произвольно меняющееся усилие, которое оператор уравновешивает, создавая противоположного знака момент и тем самым препятствуя перемещению исполнительской оси под действием этого внешнего усилия.

§ 6.4. Системы управления с задающей рукояткой

Принцип действия этих систем управления поясняет рис. 6.7. Задающая рукоятка (джойстик) с вычислителем выполняет ту же функцию, что и задающий манипулятор в предыдущей системе (см. рис. 6.2), т. е. по задаваемой рукой оператора траектории рабочего органа $x_{\text{рз}}(t)$ определяет задания $q_3(t)$ его приводам. Однако здесь это делается с помощью математической модели манипулятора решением обратной задачи кинематики.

На рис. 6.7,б показан вариант кинематической схемы трехстепенной шарнирной задающей рукоятки. Каждая степень подвижности оснащена датчиком положения. Оператор, смещая своей рукой задающую рукоятку с нейтрального положения, задает с помощью этих датчиков координаты $x_{\text{рз}}$ рабочего органа манипулятора. Вычислитель по ним определяет задания для приводов q_3 .

Для управления движением рабочего органа в общем случае требуется задавать шесть координат — три переносные его центра и три ориентирующие угловые. Для этого применяются две трехстепенные задающие рукоятки: одна для управления перемещением, а другая — ориентацией рабочего органа. Применяют также и шестистепенные рукоятки.

Преимущества задающей рукоятки по сравнению с задающим манипулятором:

минимальное число степеней подвижности, не связанное с числом степеней подвижности управляемого манипулятора, и соответственно большая простота и компактность;

возможность реализации большего числа различных режимов управления (см. ниже).

В системах управления с задающей рукояткой возможны следующие режимы (способы управления):

управление по положению — позиционное;

управление по скорости — скоростное;

управление по силе — силовое.

Именно позиционный способ управления и имелся в виду выше и на (см. рис. 6.7) при описании принципа действия системы управления с задающей рукояткой. Здесь, как было описано, перемещение задающей рукоятки определяет установку абсолютных координат рабочего органа x_{pz} . По ней, как уже говорилось, вычислитель определяет задания приводам $q_3 = f^{-1}(x_{pz})$, отработка которых и перемещает рабочий орган в заданную позицию. Таким образом, этот способ управления идентичен способу с задающим манипулятором.

а)

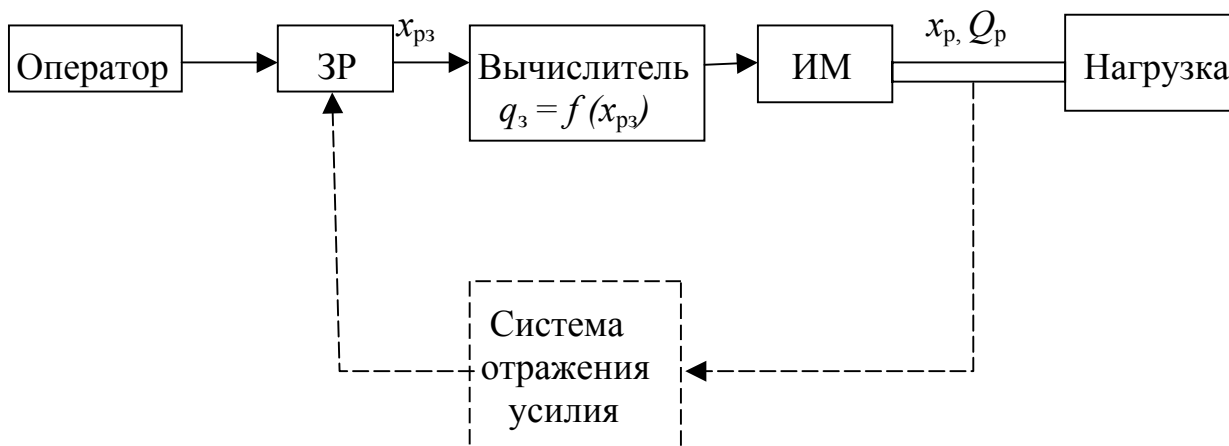


Рис. 6.7. Функциональная схема системы управления с задающей рукояткой (ЗР)

Скоростной способ управления предполагает, что смещение задающей рукоятки с нейтрального положения задает вектор скорости рабочего органа манипулятора, т. е. направление смещения рукоятки определяет направление движения, а величина смещения — величину скорости движения рабочего органа. Меняя положение задающей рукоятки в ходе движения манипулятора, оператор может маневрировать его рабочим органом в реальном масштабе времени. Вычислитель при этом рассчитывает задания для скоростей приводов $\dot{q} = J^{-1}(\dot{x}_{pz})$, а те отрабатывают их в режиме скоростных следящих систем. Такой способ наиболее удобен для управления транспортными операциями в свободном пространстве, т. е. в отсутствие препятствий.

Силовой (сило-моментный) способ управления предполагает, что перемещение задающей рукоятки задает вектор силы, с которой рабочий орган должен воздействовать на объекты внешней среды. Приводы манипулятора в этом случае имеют соответственно управление по силе (см.

§ 4.5) и отрабатывают рассчитываемые вычислителем уставки для силы (момента):

$$Q_{пз} = J^T(Q_{рз}).$$

Этот способ управления применяется при выполнении технологических операций, требующих управляемого силового воздействия на объект операции. В этом случае задающая рукоятка должна иметь силовое очувствление, создающее эффект отражения усилия, действующего на рабочий орган манипулятора, как в копирующих манипуляторах (см. пунктир на рис. 6.7,а).

С учетом особенностей каждого из трех способов управления для выполнения конкретных операций часто целесообразно применять их следующие комбинации.

Позиционно-скоростное управление. Здесь для осуществления чисто транспортного движения в свободном пространстве применяется скоростное управление, а для выполнения последующих точных технологических операций, например, сборочных — позиционное.

Переход от одного способа управления к другому может осуществляться самим оператором или автоматически в функции от отклонения рукоятки. При приближении рабочего органа манипулятора к месту выполнения операции, требующей позиционирования, оператор снижает скорость движения, подводя задающую рукоятку к нейтральному положению. Автоматическое переключение на позиционное управление осуществляется при этом в функции от отклонения задающей рукоятки, т. е. от величины скорости, когда последняя становится достаточно малой. Само переключение состоит в изменении режима работы вычислителя.

Сило (моментно)-скоростное управление. В отличие от предыдущего способа здесь при подходе к месту выполнения технологической операции осуществляется переход не к позиционному, а к силовому управлению, которое требуется для выполнения данной операции. Для автоматического изменения способа управления может использоваться сигнал о контакте с объектом выполнения технологической операции, получаемый от датчика силы (момента), находящегося в контуре силового управления.

Сило-позиционно-скоростное управление. В этом случае в последовательности, определяемой технологической операцией, осуществляется применение всех трех способов управления.

Системы управления, в которых используется одна из рассмотренных комбинаций нескольких способов управления, относятся к адаптивным системам с переменной структурой. Изменение структуры, как отмечено выше, может осуществляться автоматически или оператором.

§ 6.5. Системы супервизорного и интерактивного управления

Супервизорный способ управления роботом представляет собой последовательность автоматически выполняемых роботом заранее

заключенных в его память типовых операций, в промежутке между которыми оператор называет очередную операцию, обеспечивая таким образом выполнение определенной заданной сложной работы.

Директивы оператора при этом включают в себя два вида информации: название (код) типовой операции и ввод численных значений некоторых заранее не определенных параметров программы этой операции. Типичным видом последней информации являются необходимые для выполнения операции координаты внешней среды (координаты подлежащих взятию предметов или места, куда требуется вывести рабочий орган манипулятора и т. п.). Это осуществляется через систему целеуказания с помощью, например, задающей рукоятки, световой метки на экране дисплея, светового пера, мыши, средств виртуальной реальности в компьютерном трехмерном пространстве. Операция может задаваться через клавиатуру, в том числе виртуальную на экране дисплея, с помощью речевого командного устройства и других средств общения.

Более совершенное интерактивное управление предполагает двустороннюю, т. е. диалоговую, связь с роботом. Робот после получения определенного задания может запросить у оператора недостающую для его выполнения информацию или какие-либо уточнения, сообщить о невыполнимости какой-то операции с указанием причин, о возникновении неисправности и т. п. В свою очередь оператор может запросить у робота дополнительную информацию о состоянии отдельных его систем, содержании памяти, дополнительную сенсорную информацию о внешней среде. Для реализации диалогового режима в развитой форме, включая речевой обмен, требуется интеллектуальный интерфейс (см. § 5.3).

Рассмотренные способы управления человеком-оператором часто применяются совместно с автоматическим управлением. Так, в промышленных роботах широко используется способ программирования обучением, основанный на управлении со стороны оператора. Наоборот, в системах, где основным способом управления является управление от человека-оператора, стремятся отдельные операции, которые могут выполняться автоматически, осуществлять в автоматическом режиме. Объединение этих двух типов управления может осуществляться как последовательно, когда один тип управления сменяется другим, так и параллельно, когда, например, человек-оператор корректирует ход в целом автоматически выполняемой операции.

На рис. 6.8 представлен вариант такого комбинированного управления роботом. Через блок программирования осуществляется автоматическое позиционно-контурное программное управление движением исполнительных систем робота. Через задающую рукоятку оператор может корректировать этот процесс (в том числе, как показано на схеме, в режиме силового управления с отражением усилия) или полностью брать на себя управление, например, в аварийных ситуациях. Кроме того, он может включаться в процесс управления в режиме супервизорного управления через блок программирования.

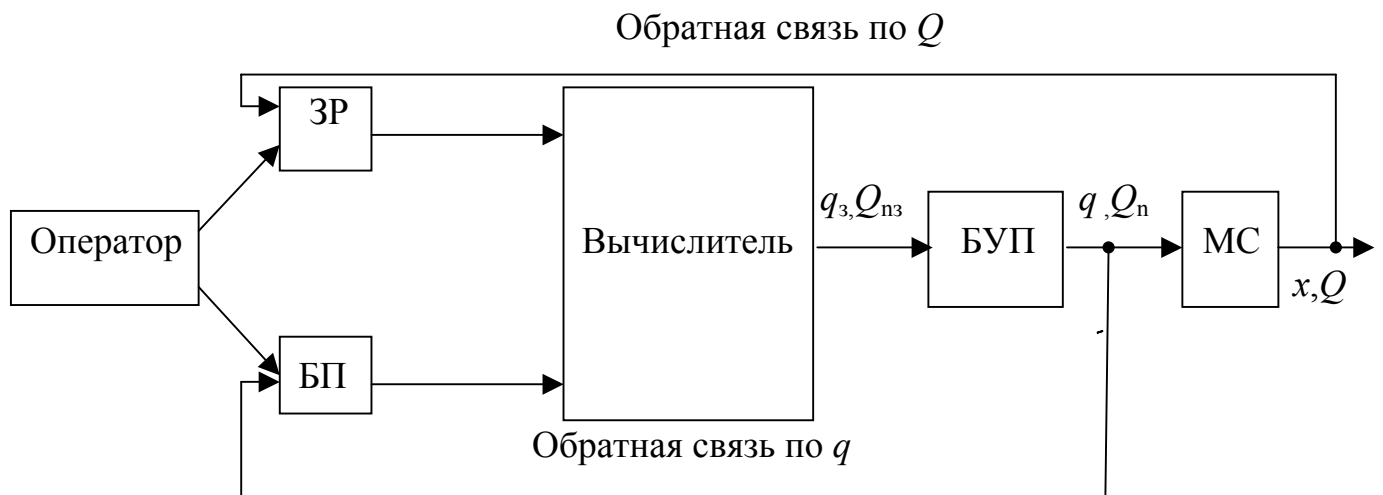


Рис. 6.8. Функциональная схема системы комбинированного автоматического и автоматизированного управления от задающей рукоятки: БП — блок программирования; БУП — блок управления приводами

На рис. 6.9 показана схема управления двумя бортовыми манипуляторами многоразового космического корабля “Буран”, которая реализует следующие режимы управления:

автоматическое программное управление выполнением типовых технологических операций (взятие полезного груза в грузовом отсеке корабля или с орбиты, перемещение груза или рабочего органа ненагруженного манипулятора в заданную точку окружающего пространства, выполнение какой-либо запланированной технологической операции);

автоматизированное управление с помощью телевизионной системы целеуказания;

ручное командное управление отдельными приводами манипулятора, подвижными передающими телевизионными камерами и светильниками, расположенными на бортах корабля.

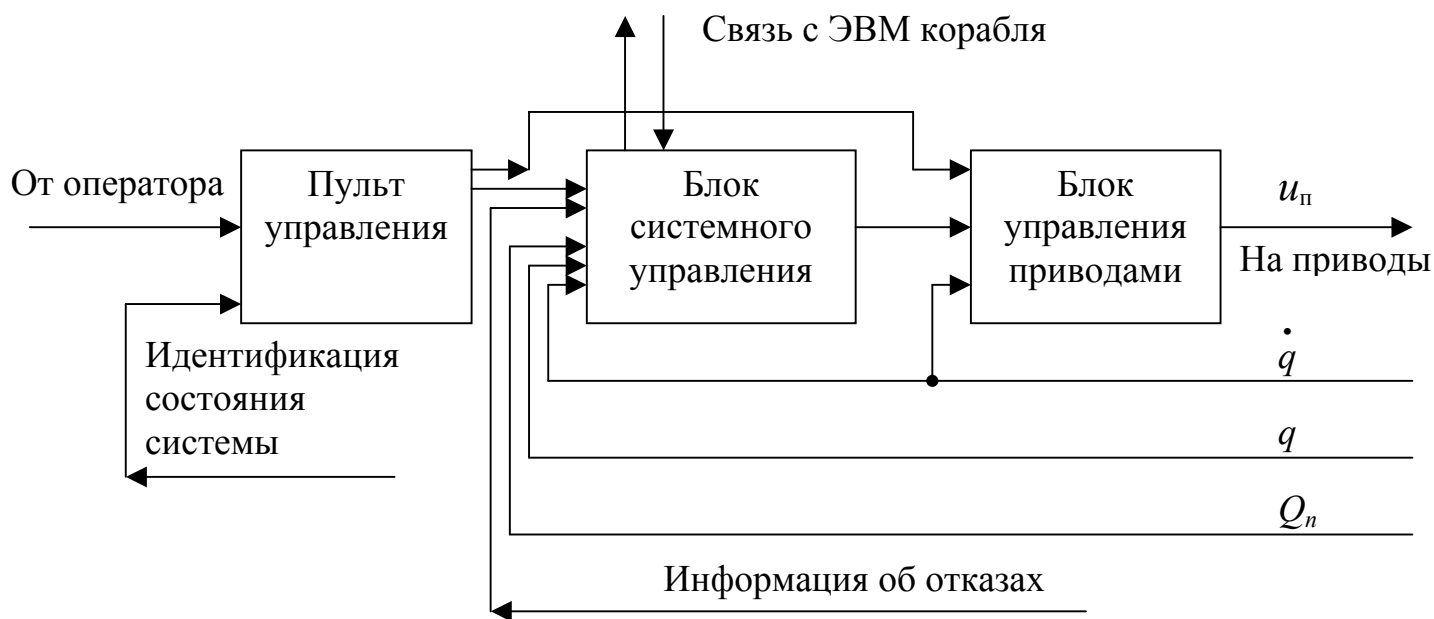


Рис. 6.9. Состав устройства управления бортовых манипуляторов космического корабля “Буран”

Оба манипулятора идентичны. Они имеют шарнирную кинематику с шестью степенями подвижности на электроприводах.

Алгоритмы автоматического управления включают в себя решение задачи планирования движения путем построения программной траектории с учетом препятствий. Последние моделируются простыми телами типа параллелепипедом, цилиндром, шаром, а траектория — кубическим сплайном. В описании динамики манипулятора учитывается его гибкость и нелинейности, включая сухое и вязкое трения.

В системе управления от задающих рукояток применены две трехстепенные рукоятки: одна для управления переносными, а другая — ориентирующими степенями подвижности рабочего органа. Алгоритм управления основан на решении обратной задачи кинематики для скорости. При этом, для того чтобы оператор мог осуществлять управление манипулятором по одним и тем же правилам вне зависимости от места расположения используемых передающих телекамер, а также при наблюдении через иллюминатор кабины, используется специальный алгоритм интерпретации задающих рукояток, эквивалентный инвариантности наблюдаемой оператором картины от используемого визуального канала.

Математическое обеспечение системы управления реализует:
 алгоритмы управления для перечисленных режимов;
 алгоритмы диагностики системы, включая ее программное обеспечение;
 математические модели рабочей зоны манипуляторов и самих манипуляторов, используемые при их программировании.

§ 6.6. Особенности управления человеком-оператором средствами передвижения

При рассмотрении систем управления в качестве основного объекта управления исследовались прежде всего манипуляционная система. Остановимся теперь на особенностях применения описанных способов и систем управления со стороны человека-оператора для управления средствами передвижения роботов. Общая функциональная схема управления движением мобильного робота с участием человека-оператора была описана в § 5.3 (см. рис. 5.15.). Из рассмотренных способов управления оператором для управления передвижением робота не применяются только системы копирующего управления, поскольку они основаны на использовании кинематики манипуляторов.

Командное управление приводами, в данном случае приводами колес шасси, применяется для выполнения дискретных команд “вперед — назад”, “влево — вправо” с дискретным заданием скорости движения и “стоп”. Кроме того, такое же управление используется для подвижных, обычно двухступенных, передающих телевизионных камер обзора местности, локаторов и различного навесного оборудования, которым может быть оснащено шасси робота.

Управление с помощью задающей рукоятки — сегодня основной способ дистанционного управления (по кабелю или радио)мобильными роботами, который как транспортная операция осуществляется в режиме управления по скорости.

О задачах супервизорного управления мобильными роботами, в дополнение к автоматическому, говорилось в п. 5.3.1.

Интерактивный режим управления имеет особенно большое значение при движении мобильных роботов по неизвестной местности. В этом случае диалоговый режим часто необходим при планировании маршрута и при возникновении сложных и непредвиденных препятствий, а также других нештатных ситуаций. Как правило, оперативное подключение при этом человека-оператора особенно эффективно.

Системы управления мобильными роботами подводного, воздушного и космического базирования имеют в целом ту же функциональную структуру и используют те же способы управления, что и наземные роботы. Однако, конечно, они отличаются системами передвижения, а также динамикой.

Основные тенденции развития систем управления мобильными роботами со стороны человека-оператора в следующие:

- развитие систем отображения внешней ситуации вокруг робота, включая эффект присутствия оператора непосредственно на работе и визуализацию внешней среды (виртуальная реальность);
- развитие интеллектуальных компьютерных систем информационной поддержки оператора, основанных на моделировании и прогнозировании в реальном времени поведения робота и окружающей среды;

развитие чисто электронных, лишенных подвижных механических частей средств управления роботом со стороны оператора.

ГЛАВА 7. ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

§ 7.1. Задачи группового управления

Групповое управление — это совместное связанное управление несколькими объектами. Основной целью такого управления является выполнение объектами общей технологической операции с определенным распределением между ними отдельных ее частей. Кроме того, оно может требоваться и для предотвращения взаимных помех, например, столкновений движущихся объектов, при выполнении ими самостоятельных операций.

Примеры задач группового управления:

- управление группой подвижных объектов (летательные аппараты, автомашины и т. п.), движущихся строем или решающих другую общую задачу;
- управление электрогенерирующими агрегатами, работающими на общую нагрузку с контролем распределения ее между агрегатами;
- управление производственным оборудованием, совместно реализующим единый технологический процесс, например, в составе технологической линии.

Применяемые в робототехнике системы группового управления могут быть классифицированы по следующим иерархическим уровням:

- совместное управление приводами исполнительных систем роботов;
- управление несколькими манипуляторами одного робота;
- управление несколькими роботами;
- управление роботами и совместно работающим с ними другим технологическим оборудованием в составе технологических комплексов.

Первый вариант группового управления был уже рассмотрен в рамках систем управления манипуляторами.

§ 7.2. Способы группового управления

Существуют следующие способы группового управления:

- централизованное управление;
- управление с ведущим;
- децентрализованное управление.

Пример централизованного управления — упомянутое выше совместное управление приводами манипулятора. (Хотя иногда в этих системах применяются и другие способы группового управления.) При таком способе управления все управляемые объекты подчинены общему устройству управления, которое и осуществляет координацию работы этих объектов. При управлении приводами манипулятора такая координация определяется решением обратной задачи динамики, которое задает установки отдельным приводам исходя из требуемого общего движения манипулятора.

При способе группового управления несколькими объектами с ведущим один из этих объектов является ведущим, а другие — ведомыми. Первый имеет автономное управление, остальные управляются в режиме слежения за ведущим, т. е. в функции от его перемещения. В робототехнике к такому варианту управления относится способ управления манипулятором, в котором его рабочий орган является ведущим звеном, а остальные звенья манипулятора отслеживают каждый перемещение предыдущего звена. Такой способ управления предложен, в частности, для осуществления движения манипулятора в стесненных условиях типа лабиринта [18]. Другой пример — режим вынужденного движения исполнительной оси копирующего манипулятора (см. конец § 6.3). Этот режим, например, имеет место при перемещении протяженного груза с помощью двух манипуляторов — одного ведущего, а второго ведомого, копирующего движение первого.

По сравнению с централизованным управлением такой способ управления обеспечивает большую точность относительного движения управляемых объектов, так как именно последнее контролируется системой управления. Отсутствие такого контроля при централизованном управлении и является причиной, ограничивающей точность позиционирования рабочего органа манипулятора при централизованном управлении его приводами, которое в настоящее время получило широкое распространение из-за своей простоты.

При групповом управлении несколькими роботами рассматриваемый способ управления предполагает, что при выполнении совместной операции один робот выполняет функции ведущего, а другие являются ведомыми. Например, при выполнении операции сканирования местности группой мобильных роботов (очистка, обработка поверхности, нанесении покрытия, инспекция) плановый маршрут сканирования реализует ведущий робот, а остальные, поддерживая заданную дистанцию относительно ведущего, движутся определенным строем.

При способе децентрализованного управления все объекты, участвующие в групповом движении, имеют одинаковый алгоритм управления по отклонению друг от друга. В случае двух объектов — это управление по их относительному положению. Такой способ управления движением, таким образом, обеспечивает поддержание заданного взаимного расположения управляемых объектов, т. е. решает по существу задачу не управления, а регулирования, например, стабилизацию строя движущихся мобильных роботов. Что касается общего движения, то для этого необходимо добавить один из двух других способов, например, централизованное управление. Последняя комбинация позволяет, например, реализовать централизованное управление предельно тесным строем объектов без опасности их столкновения.

Как видно из последнего примера, перечисленные три основных способа группового управления могут эффективно применяться совместно, образуя комбинированные способы группового управления, которые обладают новыми свойствами, отсутствующими у исходных способов. В частности, различные способы могут применяться на разных уровнях управления и в разных подсистемах.

Принципиально возможны два способа сочетания различных способов — во времени, т. е. последовательное, и в пространстве, т. е. параллельное. В первом варианте один способ сменяется другим при переходе от одной операции к другой или при изменении внешней обстановки, а во втором — в разных частях группы объектов применяются разные способы или они образуют несколько иерархических уровней, охватывающих всю группу или ее часть. Пример параллельной комбинации централизованного и децентрализованного способов управления был приведен выше. Другим примером может быть система управления транспортным движением объектов в колонне. В этом случае естественно применить способ управления с ведущим, когда первый объект определяет маршрут, а каждый последующий движется в режиме ведомого для предыдущего объекта и ведущего для последующего. (Получается параллельная комбинация одного и того же способа группового управления). Однако при увеличении скорости движения и наличии достаточно крутых поворотов трассы в этой системе могут возникать волновые колебания колонны по ее длине с опасностью выброса хвоста колонны за допустимый коридор. Повышение предельной скорости движения колонны может быть достигнуто добавлением децентрализованного управления с использованием при управлении каждым объектом информации о его относительном положении не только от непосредственно впереди движущегося объекта, но и находящихся перед ним.

Описанная комбинация децентрализованного и централизованного способов управления является примером двухуровневой системы. На нижнем уровне объекты объединяются общей системой управления в группу, а на верхнем уровне осуществляется управление этой группой как единым сложным объектом.

В робототехнике простейшая функция группового управления — синхронизация выполняемых отдельными роботами или другими средствами робототехники операций, т. е. согласование их действий во времени. Это требуется при выполнении группой роботов общей работы, которая распадается на последовательно выполняемые отдельными роботами технологические операции. При этом рабочие зоны этих роботов не пересекаются, и, следовательно, опасность столкновения их манипуляторов отсутствует. Простейший пример — программное управление последовательностью включения приводов в цикловых роботах (см. гл. 2). Более сложный пример — управление группой роботов на сборочной линии, где роботы последовательно выполняют пооперационную сборку какого-либо изделия (например, клапана, электрической машины, механизма часов).

Следующая по сложности функция группового управления роботами — это координация их движения в пространстве. Простейшая задача такого группового управления — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Для манипуляторов это может иметь место при одновременной работе двух и более манипуляторов, рабочие зоны которых пересекаются. Предельный случай здесь — это работа манипуляторов на одном рабочем месте, например, в составе сборочного центра.

Общее решение здесь — это применение системы децентрализованного управления как системы безопасности от столкновений. Однако при возможности программно обеспечить с достаточным запасом несоприкосновение манипуляторов

возможно применение и централизованного управления без контроля относительных координат или с их контролем, но уже в качестве дополнительной системы аварийной блокировки.

Наконец, более сложная функция группового управления - это обеспечение совместной работы при координации движений одновременно и в пространстве и во времени, т. е. координация траекторий движения в реальном масштабе времени. Примером может быть операция сборки путем механического соединения деталей, перемещаемых манипуляторами. Перемещение деталей в зону сборки может осуществляться путем централизованного управления манипуляторами. Однако сама операция сборки требует перехода к децентрализованному управлению по относительным координатам.

Наиболее сложная задача группового управления роботами — это уже упомянутое выше управление коллективами разнесенных в пространстве мобильных роботов, которые решают общую задачу при определенном распределении между ними отдельных ее частей. Предельно сложный вариант такой задачи — конфликтное противодействие таких коллективов, например, боевых роботов. Стратегия и тактика решения таких задач интенсивно исследуются и отрабатываются, в частности, на различных соревнованиях по групповым играм роботов — футболистов и т. п. на компьютерных и физических моделях [19,20].

Как было показано выше, в робототехнических системах и комплексах групповое управление всегда многоуровневое, иерархическое. Рассмотрим наиболее общий случай группового управления роботами совместно с другим оборудованием в составе крупного производственного подразделения уровня цеха. На рис. 7.1 показан состав такой гибкой производственной системы. Она называется гибкой, поскольку основана на современной идеи гибкой автоматизации, т. е. ее компонентами является оборудование с ЧПУ, объединенное вычислительными сетями. Такие производственные системы ориентированы на быструю смену выпускаемой продукции в основном путем замены управляющих программ и соответствуют основной тенденции развития современного производства в условиях конкуренции [21].

Основные части такого производства, показанные на рис. 7.1:

- технологические модули (технологические ячейки), выполняющие отдельные технологические операции и состоящие из единицы соответствующего основного технологического оборудования (металло-режущий станок, пресс и т. д.), накопителей (магазинов) на входе и выходе, транспортных и других вспомогательных устройств и приспособлений, охваченных общей системой управления;
- складская система (для хранения материалов, предметов и отходов производства, инструмента и т. д.);



Рис. 7.1. Состав гибкой производственной системы. Двойными стрелками показаны материальные потоки.

- транспортная система, связывающая все части производства материальными потоками;
- система контроля качества продукции;
- система технической диагностики самой производственной системы;
- система локальных вычислительных сетей, связывающая все части производственной системы информационными потоками;
- система управления производством в целом.

Каждая из перечисленных систем имеет многоуровневую структуру. Ее уровни внутри своей системы соединяются друг с другом по вертикалям, а между системами — по горизонталям, т. е. на своих иерархических уровнях. В табл.7.1. показаны эти уровни. Их четыре: 1 — единица технологического оборудования, 2 — технологический модуль (ячейка), 3 — технологический участок и 4 — цех. Внутри этих основных уровней могут быть еще свои подуровни. В технологических модулях роботы и другие средства робототехники могут применяться на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования (роботизированный технологический модуль). В этих случаях устройство управления такого робота обычно подчиняется устройству управления этого оборудования. Однако возможна и обратная взаимосвязь. Например, в технологических модулях холодной штамповки часто управление прессом осуществляется от устройства управления обслуживающего его робота.

Если робот выполняет основную технологическую операцию в модуле, т. е. сам играет роль основного технологического оборудования, то в этих случаях все части модуля находятся под управлением устройства управления робота (робототехнические сварочные и сборочные центры, модули нанесения покрытий и т. д.).

В транспортных системах роботы применяются непосредственно как транспортное средство или только для выполнения погрузочно-разгрузочных операций. В этом случае он управляется от устройства управления соответствующей транспортной системы.

В складских автоматизированных системах средства робототехники нашли основное применение прежде всего в виде штабелеров, обслуживающих ячейки стелажных складов.

Каждый из четырех уровней управления, показанных на схеме рис. 7.2, реализован в виде системы микропроцессорных устройств управления, объединенных локальной вычислительной сетью. Поскольку здесь есть верхний уровень с интеллектуальным пультом общего управления всей этой пирамидальной структурой, то общим способом управления здесь является централизованное четырехуровневое управление со своим центром на каждом уровне, подчиненным центру вышестоящего уровня. Вместе с тем в частях отдельных уровней могут

применяться и рассмотренные ранее децентрализованные способы управления.

Оперативно — календарный план (ОКП) цеха определяет план выпуска продукции на ближайшее время, включая очередную рабочую смену, поставку на рабочие места всего необходимого материального обеспечения и ввод в устройства управления всего участвующего в этом производственном процессе оборудования управляющих программ.

Совокупность последних обеспечивает необходимую координацию действий всех частей рассматриваемого производственного комплекса. В результате осуществляется централизованно автоматический управляемый производственный процесс с контролем при этом качества продукции, технического состояния работающего оборудования, транспортировкой готовой продукции, отходов производства и пр.

Развитие способов и средств управления постоянно стимулирует поиски путей ослабления централизованного начала в управлении производством с тем, чтобы иметь возможность максимально учитывать местные условия при сокращении однако единой, т. е. централизованной стратегии поведения. Даже в показанной на рис. 7.2 схеме современной системы управления цехом эта тенденция отчетливо прослеживается, особенно если сравнить эту схему с типовыми структурными схемами управления цехами совсем недалекого прошлого. На уровне руководства цеха здесь определенно осталось только оперативно - календарное планирование, диспетчеризация, да еще сбор и хранение сводной информации по отдельным аспектам действий подразделений цеха и цеха в целом.

Таблица 7.1. Уровни управления гибкой производственной системы

Уровни управления	Функции	Состав
4 цех	- Совместное управление технологическими системами цеха. - Сбор и обработка информации о качестве продукции. - То же о техническом состоянии оборудования. - Подготовка и хранение программного обеспечения для подразделений цеха. - Опертивно-календарное планирование. - Связь с участками и с соседними и вышестоящими подразделениями предприятия.	Локальная вычислительная сеть цеха. ЭВМ с принтером. Интеллектуальный интерфейс. Запоминающее устройство (ЗУ) с базой данных (БД).
3 технологический участок	- Совместное управление технологическими модулями, складскими и транспортными системами участка. - Сбор и обработка информации о качестве продукции. - То же о техническом состоянии оборудования. - Подготовка и хранение программного обеспечения. - Ввод-вывод информации на пульт, локальную вычислительную сеть участка и сеть цеха.	Локальная вычислительная сеть участка. ЭВМ с принтером. Интеллектуальный интерфейс. Запоминающее устройство (ЗУ) с базой данных (БД).
2 технологический модуль (ячейка)	- Совместное управление частями модуля. - Контроль качества продукции. - Контроль технического состояния (диагностика) модуля. - Обработка сенсорной и другой информации. - Ввод-вывод информации на пульт, локальную вычислительную сеть участка.	Устройство управления модуля. Пульт управления, соединенный с локальной вычислительной сетью.
1 единица оборудования	- Совместное управление приводами. - Контроль технического состояния.	Устройство управления оборудованием, соединенное с устройством управления модуля, в который оно входит.

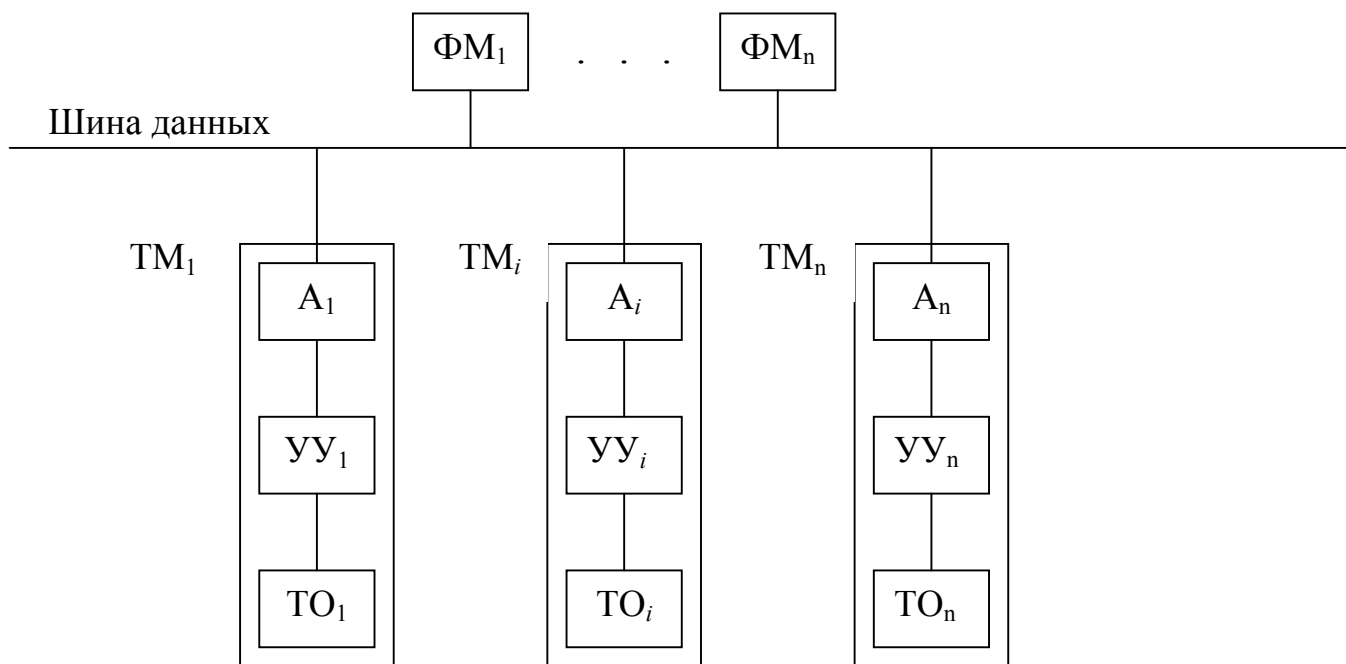


Рис. 7.2. Функциональная схема распределенной гибкой производственной системы.

На рис. 7.2 показан вариант дальнейшей децентрализации управления подобными производствами. Все участники производственного процесса в виде технологических модулей ТМ и функциональных модулей ФМ объединены локальной вычислительной сетью через шину данных. Функциональные модули — это устройства, специализированные на выполнении определенных общесистемных функций, т. е. в совокупности они реализуют функции уровня централизованного управления всем производственным процессом. Соответственно должны иметься функциональные модули загрузки оборудования, обеспечения инструментом, транспортировки, управляющих программ, подготовки сводной информации, интерфейса оператора и т. д.

Технологические модули помимо основного технологического оборудования со своим устройством управления, технологических приспособлений и оснастки имеют командное устройство А, называемое администратором (компьютер, управляющий контролер). Функции администратора: принимать заказы на выполнение очередной операции, запрашивать у соответствующих функциональных модулей необходимое для этого материальное и программное обеспечение, затем после начала выполнения операции определять с помощью администраторов других технологических модулей, на каком из них следует продолжить обработку изделия по окончании операции с ним на своем модуле. При этом учитывается загрузка модулей и особенности выполняемых на них операций.

В этой системе управления отсутствует единое планирование и диспетчеризация. Соответственно исключается возможность заблаговременного синтеза и оптимизации планов производства. Последовательность изготовления каждого определенного изделия определяется спонтанно уже в ходе самого производственного процесса. Здесь функциональные модули, реализующие функции центра, скорее обслуживают непосредственных производителей - технологические модули, чем управляют ими. Такая структура отличается предельно высокой надежностью, сфера ее оптимального применения, когда она наиболее экономически эффективна, - это условия случайного потока заявок на входе.

Выше были рассмотрены существующие способы группового управления и их различные комбинации. Была показана общая тенденция усиления децентрализации, обусловленная развитием необходимых для этого технических средств, прежде всего микроэлектроники и компьютерных сетей. В ходе развития последних возникла концепция мультиагентных систем, которая создает новые возможности создания распределенных систем управления. Здесь под агентом понимается интеллектуальный программный продукт, реализующий в самом общем случае функциональную триаду “сенсоры — процессор - эффектор” и предназначенный для автономного сбора информации, ее обработки, включая принятия решений и планирования действий в соответствии с целями, заложенными в память, обмена информацией с другими агентами и управления определенными процессами в сети. Агенты могут перемещаться по сети в соответствии с их целями, например, для сбора информации на местах. Кооперируясь друг с другом для достижения общих целей они образуют единую мультиагентную систему. Такие системы могут применяться как в рамках компьютерной системы одного робота с распределенным таким образом интеллектом между его подсистемами, так и для управления коллективами роботов. Неоптимальность во многих случаях чисто централизованного управления давно была очевидна, особенно для пространственно разнесенных объектов. Однако и для сосредоточенных объектов эффективность сочетания централизованного и децентрализованного способов управления тоже несомненна и она возрастает с усложнением объектов группового управления. При этом в различных функциональных системах этих объектов (сенсорные, планирующие, исполнительные, связи с оператором) и на их различных иерархических уровнях оптимальные сочетания централизованных и децентрализованных способов, очевидно, различны.

Оптимальная структура управления, сочетающая разные способы управления, определяется конкретным объектом и конкретными требованиями к его управлению. Приведенные выше соображения

определяют только границы и предельные возможности, в рамках которых надлежит искать решения.

Что касается рассмотренных во второй половине этого параграфа многоуровневые схемы группового управления крупными комплексами, то они уже выходят за рамки собственно проблемы управления средствами робототехники, отражая только особенности управления этими средствами в составе подобных комплексов. Проблема управления ими — это особый предмет изучения, связанный, в частности, с понятием больших систем.

ГЛАВА 7. ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

§ 7.1. Задачи группового управления

Групповое управление — это совместное связанное управление несколькими объектами. Основной целью такого управления является выполнение объектами общей технологической операции с определенным распределением между ними отдельных ее частей. Кроме того, оно может требоваться и для предотвращения взаимных помех, например, столкновений движущихся объектов, при выполнении ими самостоятельных операций.

Примеры задач группового управления:

- управление группой подвижных объектов (летательные аппараты, автомашины и т. п.), движущихся строем или решающих другую общую задачу;
- управление электрогенерирующими агрегатами, работающими на общую нагрузку с контролем распределения ее между агрегатами;
- управление производственным оборудованием, совместно реализующим единый технологический процесс, например, в составе технологической линии.

Применяемые в робототехнике системы группового управления могут быть классифицированы по следующим иерархическим уровням:

- совместное управление приводами исполнительных систем роботов;
- управление несколькими манипуляторами одного робота;
- управление несколькими роботами;
- управление роботами и совместно работающим с ними другим технологическим оборудованием в составе технологических комплексов.

Первый вариант группового управления был уже рассмотрен в рамках систем управления манипуляторами.

§ 7.2. Способы группового управления

Существуют следующие способы группового управления:

- централизованное управление;
- управление с ведущим;
- децентрализованное управление.

Пример централизованного управления — упомянутое выше совместное управление приводами манипулятора. (Хотя иногда в этих системах применяются и другие способы группового управления.) При таком способе управления все управляемые объекты подчинены общему устройству управления, которое и осуществляет координацию работы этих объектов. При управлении приводами манипулятора такая координация определяется решением обратной задачи динамики, которое задает установки отдельным приводам исходя из требуемого общего движения манипулятора.

При способе группового управления несколькими объектами с ведущим один из этих объектов является ведущим, а другие — ведомыми. Первый имеет автономное управление, остальные управляются в режиме слежения за ведущим, т. е. в функции от его перемещения. В робототехнике к такому варианту управления относится способ управления манипулятором, в котором его рабочий орган является ведущим звеном, а остальные звенья манипулятора отслеживают каждый перемещение предыдущего звена. Такой способ управления предложен, в частности, для осуществления движения манипулятора в стесненных условиях типа лабиринта [18]. Другой пример — режим вынужденного движения исполнительной оси копирующего манипулятора (см. конец § 6.3). Этот режим, например, имеет место при перемещении протяженного груза с помощью двух манипуляторов — одного ведущего, а второго ведомого, копирующего движение первого.

По сравнению с централизованным управлением такой способ управления обеспечивает большую точность относительного движения управляемых объектов, так как именно последнее контролируется системой управления. Отсутствие такого контроля при централизованном управлении и является причиной, ограничивающей точность позиционирования рабочего органа манипулятора при централизованном управлении его приводами, которое в настоящее время получило широкое распространение из-за своей простоты.

При групповом управлении несколькими роботами рассматриваемый способ управления предполагает, что при выполнении совместной операции один робот выполняет функции ведущего, а другие являются ведомыми. Например, при выполнении операции сканирования местности группой мобильных роботов (очистка, обработка поверхности, нанесении покрытия, инспекция) плановый маршрут сканирования реализует ведущий робот, а остальные, поддерживая заданную дистанцию относительно ведущего, движутся определенным строем.

При способе децентрализованного управления все объекты, участвующие в групповом движении, имеют одинаковый алгоритм управления по отклонению друг от друга. В случае двух объектов — это управление по их относительному положению. Такой способ управления движением, таким образом, обеспечивает поддержание заданного взаимного расположения управляемых объектов, т. е. решает по существу задачу не управления, а регулирования, например, стабилизацию строя движущихся мобильных роботов. Что касается общего движения, то для этого необходимо добавить один из двух других способов, например, централизованное управление. Последняя комбинация позволяет, например, реализовать централизованное управление предельно тесным строем объектов без опасности их столкновения.

Как видно из последнего примера, перечисленные три основных способа группового управления могут эффективно применяться совместно, образуя комбинированные способы группового управления, которые обладают новыми свойствами, отсутствующими у исходных способов. В частности, различные способы могут применяться на разных уровнях управления и в разных подсистемах.

Принципиально возможны два способа сочетания различных способов — во времени, т. е. последовательное, и в пространстве, т. е. параллельное. В первом варианте один способ сменяется другим при переходе от одной операции к другой или при изменении внешней обстановки, а во втором — в разных частях группы объектов применяются разные способы или они образуют несколько иерархических уровней, охватывающих всю группу или ее часть. Пример параллельной комбинации централизованного и децентрализованного способов управления был приведен выше. Другим примером может быть система управления транспортным движением объектов в колонне. В этом случае естественно применить способ управления с ведущим, когда первый объект определяет маршрут, а каждый последующий движется в режиме ведомого для предыдущего объекта и ведущего для последующего. (Получается параллельная комбинация одного и того же способа группового управления). Однако при увеличении скорости движения и наличии достаточно крутых поворотов трассы в этой системе могут возникать волновые колебания колонны по ее длине с опасностью выброса хвоста колонны за допустимый коридор. Повышение предельной скорости движения колонны может быть достигнуто добавлением децентрализованного управления с использованием при управлении каждым объектом информации о его относительном положении не только от непосредственно впереди движущегося объекта, но и находящихся перед ним.

Описанная комбинация децентрализованного и централизованного способов управления является примером двухуровневой системы. На нижнем уровне объекты объединяются общей системой управления в группу, а на верхнем уровне осуществляется управление этой группой как единым сложным объектом.

В робототехнике простейшая функция группового управления — синхронизация выполняемых отдельными роботами или другими средствами робототехники операций, т. е. согласование их действий во времени. Это требуется при выполнении группой роботов общей работы, которая распадается на последовательно выполняемые отдельными роботами технологические операции. При этом рабочие зоны этих роботов не пересекаются, и, следовательно, опасность столкновения их манипуляторов отсутствует. Простейший пример — программное управление последовательностью включения приводов в цикловых роботах (см. гл. 2). Более сложный пример — управление группой роботов на сборочной линии, где роботы последовательно выполняют пооперационную сборку какого-либо изделия (например, клапана, электрической машины, механизма часов).

Следующая по сложности функция группового управления роботами — это координация их движения в пространстве. Простейшая задача такого группового управления — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Для манипуляторов это может иметь место при одновременной работе двух и более манипуляторов, рабочие зоны которых пересекаются. Предельный случай здесь — это работа манипуляторов на одном рабочем месте, например, в составе сборочного центра.

Общее решение здесь — это применение системы децентрализованного управления как системы безопасности от столкновений. Однако при возможности программно обеспечить с достаточным запасом несоприкосновение манипуляторов

возможно применение и централизованного управления без контроля относительных координат или с их контролем, но уже в качестве дополнительной системы аварийной блокировки.

Наконец, более сложная функция группового управления - это обеспечение совместной работы при координации движений одновременно и в пространстве и во времени, т. е. координация траекторий движения в реальном масштабе времени. Примером может быть операция сборки путем механического соединения деталей, перемещаемых манипуляторами. Перемещение деталей в зону сборки может осуществляться путем централизованного управления манипуляторами. Однако сама операция сборки требует перехода к децентрализованному управлению по относительным координатам.

Наиболее сложная задача группового управления роботами — это уже упомянутое выше управление коллективами разнесенных в пространстве мобильных роботов, которые решают общую задачу при определенном распределении между ними отдельных ее частей. Предельно сложный вариант такой задачи — конфликтное противодействие таких коллективов, например, боевых роботов. Стратегия и тактика решения таких задач интенсивно исследуются и отрабатываются, в частности, на различных соревнованиях по групповым играм роботов — футболистов и т. п. на компьютерных и физических моделях [19,20].

Как было показано выше, в робототехнических системах и комплексах групповое управление всегда многоуровневое, иерархическое. Рассмотрим наиболее общий случай группового управления роботами совместно с другим оборудованием в составе крупного производственного подразделения уровня цеха. На рис. 7.1 показан состав такой гибкой производственной системы. Она называется гибкой, поскольку основана на современной идеи гибкой автоматизации, т. е. ее компонентами является оборудование с ЧПУ, объединенное вычислительными сетями. Такие производственные системы ориентированы на быструю смену выпускаемой продукции в основном путем замены управляющих программ и соответствуют основной тенденции развития современного производства в условиях конкуренции [21].

Основные части такого производства, показанные на рис. 7.1:

- технологические модули (технологические ячейки), выполняющие отдельные технологические операции и состоящие из единицы соответствующего основного технологического оборудования (металло-режущий станок, пресс и т. д.), накопителей (магазинов) на входе и выходе, транспортных и других вспомогательных устройств и приспособлений, охваченных общей системой управления;
- складская система (для хранения материалов, предметов и отходов производства, инструмента и т. д.);



Рис. 7.1. Состав гибкой производственной системы. Двойными стрелками показаны материальные потоки.

- транспортная система, связывающая все части производства материальными потоками;
- система контроля качества продукции;
- система технической диагностики самой производственной системы;
- система локальных вычислительных сетей, связывающая все части производственной системы информационными потоками;
- система управления производством в целом.

Каждая из перечисленных систем имеет многоуровневую структуру. Ее уровни внутри своей системы соединяются друг с другом по вертикалям, а между системами — по горизонталям, т. е. на своих иерархических уровнях. В табл. 7.1. показаны эти уровни. Их четыре: 1 — единица технологического оборудования, 2 — технологический модуль (ячейка), 3 — технологический участок и 4 — цех. Внутри этих основных уровней могут быть еще свои подуровни. В технологических модулях роботы и другие средства робототехники могут применяться на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования (роботизированный технологический модуль). В этих случаях устройство управления такого робота обычно подчиняется устройству управления этого оборудования. Однако возможна и обратная взаимосвязь. Например, в технологических модулях холодной штамповки часто управление прессом осуществляется от устройства управления обслуживающего его робота.

Если робот выполняет основную технологическую операцию в модуле, т. е. сам играет роль основного технологического оборудования, то в этих случаях все части модуля находятся под управлением устройства управления робота (робототехнические сварочные и сборочные центры, модули нанесения покрытий и т. д.).

В транспортных системах роботы применяются непосредственно как транспортное средство или только для выполнения погрузочно-разгрузочных операций. В этом случае он управляется от устройства управления соответствующей транспортной системы.

В складских автоматизированных системах средства робототехники нашли основное применение прежде всего в виде штабелеров, обслуживающих ячейки стелажных складов.

Каждый из четырех уровней управления, показанных на схеме рис. 7.2, реализован в виде системы микропроцессорных устройств управления, объединенных локальной вычислительной сетью. Поскольку здесь есть верхний уровень с интеллектуальным пультом общего управления всей этой пирамидальной структурой, то общим способом управления здесь является централизованное четырехуровневое управление со своим центром на каждом уровне, подчиненным центру вышестоящего уровня. Вместе с тем в частях отдельных уровней могут

применяться и рассмотренные ранее децентрализованные способы управления.

Оперативно — календарный план (ОКП) цеха определяет план выпуска продукции на ближайшее время, включая очередную рабочую смену, поставку на рабочие места всего необходимого материального обеспечения и ввод в устройства управления всего участвующего в этом производственном процессе оборудования управляющих программ.

Совокупность последних обеспечивает необходимую координацию действий всех частей рассматриваемого производственного комплекса. В результате осуществляется централизованно автоматический управляемый производственный процесс с контролем при этом качества продукции, технического состояния работающего оборудования, транспортировкой готовой продукции, отходов производства и пр.

Развитие способов и средств управления постоянно стимулирует поиски путей ослабления централизованного начала в управлении производством с тем, чтобы иметь возможность максимально учитывать местные условия при сокращении однако единой, т. е. централизованной стратегии поведения. Даже в показанной на рис. 7.2 схеме современной системы управления цехом эта тенденция отчетливо прослеживается, особенно если сравнить эту схему с типовыми структурными схемами управления цехами совсем недалекого прошлого. На уровне руководства цеха здесь определенно осталось только оперативно - календарное планирование, диспетчеризация, да еще сбор и хранение сводной информации по отдельным аспектам действий подразделений цеха и цеха в целом.

Таблица 7.1. Уровни управления гибкой производственной системы

Уровни управления	Функции	Состав
4 цех	- Совместное управление технологическими системами цеха. - Сбор и обработка информации о качестве продукции. - То же о техническом состоянии оборудования. - Подготовка и хранение программного обеспечения для подразделений цеха. - Опертивно-календарное планирование. - Связь с участками и с соседними и вышестоящими подразделениями предприятия.	Локальная вычислительная сеть цеха. ЭВМ с принтером. Интеллектуальный интерфейс. Запоминающее устройство (ЗУ) с базой данных (БД).
3 технологический участок	- Совместное управление технологическими модулями, складскими и транспортными системами участка. - Сбор и обработка информации о качестве продукции. - То же о техническом состоянии оборудования. - Подготовка и хранение программного обеспечения. - Ввод-вывод информации на пульт, локальную вычислительную сеть участка и сеть цеха.	Локальная вычислительная сеть участка. ЭВМ с принтером. Интеллектуальный интерфейс. Запоминающее устройство (ЗУ) с базой данных (БД).
2 технологический модуль (ячейка)	- Совместное управление частями модуля. - Контроль качества продукции. - Контроль технического состояния (диагностика) модуля. - Обработка сенсорной и другой информации. - Ввод-вывод информации на пульт, локальную вычислительную сеть участка.	Устройство управления модуля. Пульт управления, соединенный с локальной вычислительной сетью.
1 единица оборудования	- Совместное управление приводами. - Контроль технического состояния.	Устройство управления оборудованием, соединенное с устройством управления модуля, в который оно входит.

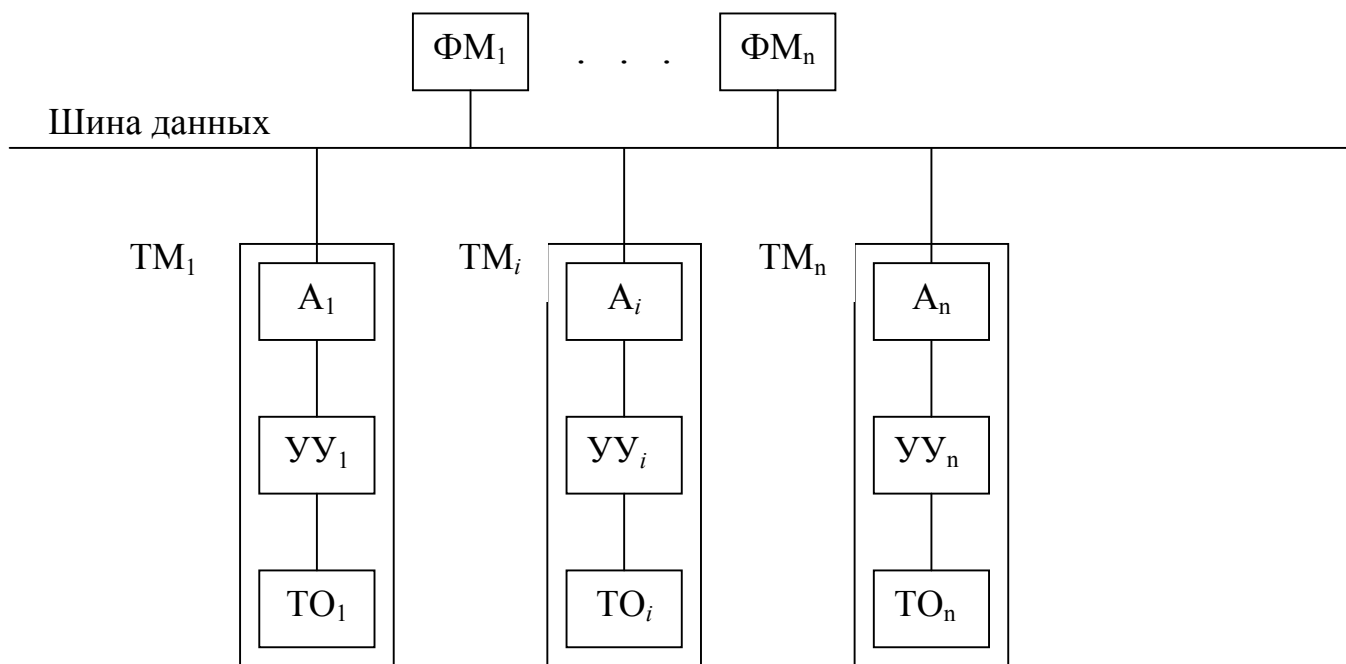


Рис. 7.2. Функциональная схема распределенной гибкой производственной системы.

На рис. 7.2 показан вариант дальнейшей децентрализации управления подобными производствами. Все участники производственного процесса в виде технологических модулей ТМ и функциональных модулей ФМ объединены локальной вычислительной сетью через шину данных. Функциональные модули — это устройства, специализированные на выполнении определенных общесистемных функций, т. е. в совокупности они реализуют функции уровня централизованного управления всем производственным процессом. Соответственно должны иметься функциональные модули загрузки оборудования, обеспечения инструментом, транспортировки, управляющих программ, подготовки сводной информации, интерфейса оператора и т. д.

Технологические модули помимо основного технологического оборудования со своим устройством управления, технологических приспособлений и оснастки имеют командное устройство А, называемое администратором (компьютер, управляющий контролер). Функции администратора: принимать заказы на выполнение очередной операции, запрашивать у соответствующих функциональных модулей необходимое для этого материальное и программное обеспечение, затем после начала выполнения операции определять с помощью администраторов других технологических модулей, на каком из них следует продолжить обработку изделия по окончании операции с ним на своем модуле. При этом учитывается загрузка модулей и особенности выполняемых на них операций.

В этой системе управления отсутствует единое планирование и диспетчеризация. Соответственно исключается возможность заблаговременного синтеза и оптимизации планов производства. Последовательность изготовления каждого определенного изделия определяется спонтанно уже в ходе самого производственного процесса. Здесь функциональные модули, реализующие функции центра, скорее обслуживают непосредственных производителей - технологические модули, чем управляют ими. Такая структура отличается предельно высокой надежностью, сфера ее оптимального применения, когда она наиболее экономически эффективна, - это условия случайного потока заявок на входе.

Выше были рассмотрены существующие способы группового управления и их различные комбинации. Была показана общая тенденция усиления децентрализации, обусловленная развитием необходимых для этого технических средств, прежде всего микроэлектроники и компьютерных сетей. В ходе развития последних возникла концепция мультиагентных систем, которая создает новые возможности создания распределенных систем управления. Здесь под агентом понимается интеллектуальный программный продукт, реализующий в самом общем случае функциональную триаду “сенсоры — процессор - эффектор” и предназначенный для автономного сбора информации, ее обработки, включая принятия решений и планирования действий в соответствии с целями, заложенными в память, обмена информацией с другими агентами и управления определенными процессами в сети. Агенты могут перемещаться по сети в соответствии с их целями, например, для сбора информации на местах. Кооперируясь друг с другом для достижения общих целей они образуют единую мультиагентную систему. Такие системы могут применяться как в рамках компьютерной системы одного робота с распределенным таким образом интеллектом между его подсистемами, так и для управления коллективами роботов. Неоптимальность во многих случаях чисто централизованного управления давно была очевидна, особенно для пространственно разнесенных объектов. Однако и для сосредоточенных объектов эффективность сочетания централизованного и децентрализованного способов управления тоже несомненна и она возрастает с усложнением объектов группового управления. При этом в различных функциональных системах этих объектов (сенсорные, планирующие, исполнительные, связи с оператором) и на их различных иерархических уровнях оптимальные сочетания централизованных и децентрализованных способов, очевидно, различны.

Оптимальная структура управления, сочетающая разные способы управления, определяется конкретным объектом и конкретными требованиями к его управлению. Приведенные выше соображения

определяют только границы и предельные возможности, в рамках которых надлежит искать решения.

Что касается рассмотренных во второй половине этого параграфа многоуровневые схемы группового управления крупными комплексами, то они уже выходят за рамки собственно проблемы управления средствами робототехники, отражая только особенности управления этими средствами в составе подобных комплексов. Проблема управления ими — это особый предмет изучения, связанный, в частности, с понятием больших систем.

ГЛАВА 8. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

§ 8.1. Развитие устройств управления роботов

Системы управления роботов и их аппаратное обеспечение развиваются не изолированно от систем управления другим технологическим оборудованием. Устройства управления первых роботов и их приводы целиком были заимствованы из станкостроения. Поэтому перед рассмотрением эволюции аппаратуры управления роботов перечислим этапы развития устройств числового программного управления (УЧПУ) станков, как предшественников этой аппаратуры.

Станки с ЧПУ появились в 1950-е годы. Это был первый и, как показало будущее, решающий шаг в развитии идеи гибкой автоматизации. Потребность в последней была обусловлена быстро растущей тенденцией ускорения сроков освоения производства новой продукции, в выпуске ее в том числе мелкими сериями при одновременном сохранении и даже повышении качества и производительности по сравнению с традиционным жестко автоматизированным крупносерийным и массовым производством.

Первые системы с ЧПУ станков, созданные в Массачусетском технологическом институте США, программировались обучением с помощью центральной ЭВМ с записью на перфоленте и последующей передачей управляющих программ на станки.

Следующий, второй, этап их развития — 1960-е годы — это прямое дистанционное централизованное управление несколькими станками от одной ЭВМ в режиме разделения времени. Управляющие программы при этом записывались уже на магнитных носителях (на магнитной ленте, диске и т. п.). Однако доля станков с ЧПУ при этом была ещё очень мала — не более 0,1%.

Третий этап связан с революционным скачком в развитии и распространении этой новой техники, который произошел в 1970-е годы с появлением микропроцессоров. На их основе были созданы компьютерные УЧПУ: для управления отдельными станками. При этом резко снизилась стоимость УЧПУ с 50% общей стоимости станка до 20% и менее. Одновременно была коренным образом повышена надежность систем управления, в том числе благодаря переходу от дистанционного по кабелю централизованного управления к децентрализованному автономному управлению.

Четвертый этап развития УЧПУ — это переход к иерархическим системам комбинированного управления, в которых местные компьютерные УЧПУ отдельных станков объединены централизованной системой управления от общей ЭВМ. Функции последней — групповое управление всем производственным комплексом, содержащим эти станки, включая планирование, хранение библиотек управляющих программ, контроль отказов и другие общесистемные функции.

Современная тенденция развития этих систем, о чем уже говорилось в гл. 7, — это переход к распределенным модульным системам ЧПУ путем

постепенного уменьшения функций центрального управления с передачей их местным УЧПУ.

Вернемся к аппаратуре управления роботов. У первых роботов устройства управления конструктивно часто размещались на общем основании робота. Однако в дальнейшем они стали выполняться в виде самостоятельного шкафа (стойки) или настольной конструкции. Это увеличило эффективно используемую часть рабочей зоны манипуляторов робота, а также повысило безопасность персонала.

Устройства управления роботов вначале создавались свои для каждого конкретного робота (в гл. 2 на рис. 2.1 показан пневматический робот МП-9С с устройством управления, в последнем предусмотрена возможность выдачи дискретных управляющих сигналов, синхронизированных с циклом работы робота, на другое оборудование, функционирующее вместе с роботом).

Затем появились унифицированные устройства управления, предназначенные для роботов с определенным типом приводов (пневматических, гидравлических, электрических) и с определенным способом управления (цикловое, позиционное, контурно-позиционное, контурное). Для роботов с простым цикловым управлением были созданы устройства группового управления. На рис. 8.1 показано одно из первых отечественных устройств группового циклового управления, которое имеет 512 управляющих выходов с возможностью организации локальной сети.

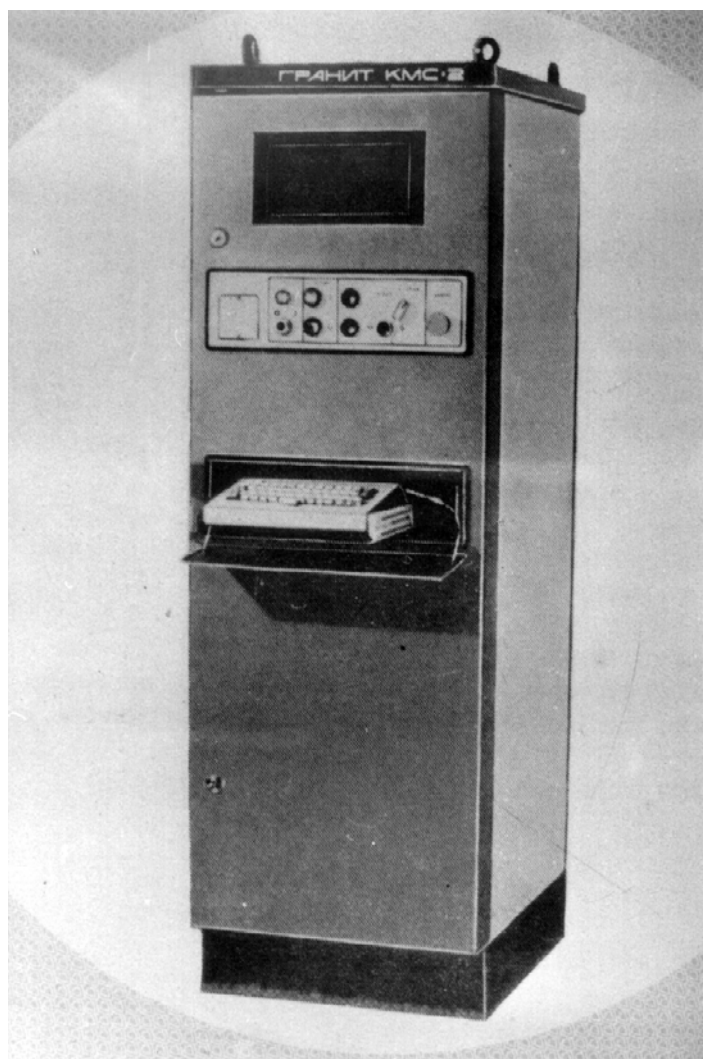


Рис. 8.1. Унифицированное устройство группового циклового программного управления “Гранит КМС-2”

Первые отечественные унифицированные устройства дискретного позиционного программного управления типа УПМ были построены как синхронный микропрограммный автомат. Основным программным носителем был кассетный накопитель на магнитной ленте. Программирование осуществлялось методом обучения с помощью выносного пульта и с записью в блоке оперативной памяти. Устройство было ориентировано на датчики положения типа синусно-косинусных вращающихся трансформаторов и фотоэлектрических кодовых датчиков (внешний вид аналогичного устройства иностранной фирмы показан на рис. 3.2.)

Унифицированные устройства контурно-позиционного типа подобны позиционным, но дополнены интерполятором, обеспечивающим режим непрерывного движения между запрограммированными узловыми точками на заданной траектории.

В первых устройствах чисто контурного управления программирование осуществлялось методом обучения путем перемещения рукой оператора рабочего органа манипулятора с синхронной записью управляющих программ для приводов на кассетном накопителе на магнитной ленте, с которого они и считывались в

режиме воспроизведения. На рис. 8.2 показана одна из модификаций такого отечественного устройства типа УКМ. Эти унифицированные устройства были построены на базе микроЭВМ типа “Электроника-60” (внешний вид аналогичных устройств управления иностранных фирм показан на рис. 4.1 и 4.2).

Опыт создания первых серийных устройств управления промышленных роботов, их применения и быстрорастущие требования к ним по мере расширения областей применения робототехники привели к постепенному формированию следующих тенденций развития этих устройств:

развитие унификации на уровне основных компонентов вплоть до модульного построения как аппаратного, так и программного обеспечения систем управления;

развитие принципов параллельной обработки информации;

децентрализация управления с переходом к распределенным системам управления.

Суть модульного принципа построения аппаратуры управления заключается в объединении функциональной унификации с конструктивной, что позволяет собирать различного типа устройства управления из единого иерархического набора унифицированных активных и пассивных модулей без каких-либо конструктивных доработок и дополнений. Это не только предельно упрощает создание новых устройств управления и сокращает сроки освоения их производством, но одновременно существенно снижает их стоимость и повышает надежность (так как такие модули могут выпускаться крупносерийно), а также упрощает эксплуатацию и техническое обслуживание.

О проблемах распараллеливания обработки информации и децентрализации управления, возникших в связи с усложнением алгоритмов управления, говорилось в гл. 4 и 5.

В полной мере перечисленные перспективы развития устройств управления смогли получить развитие и реализацию только после появления микропроцессоров в качестве их основного унифицированного компонента. Микропроцессоры произвели настоящую революцию в управлении промышленным оборудованием и производством в целом. Это привело, как показано выше, к созданию децентрализованных и распределенных систем управления, что, естественно, проявилось и в робототехнике.

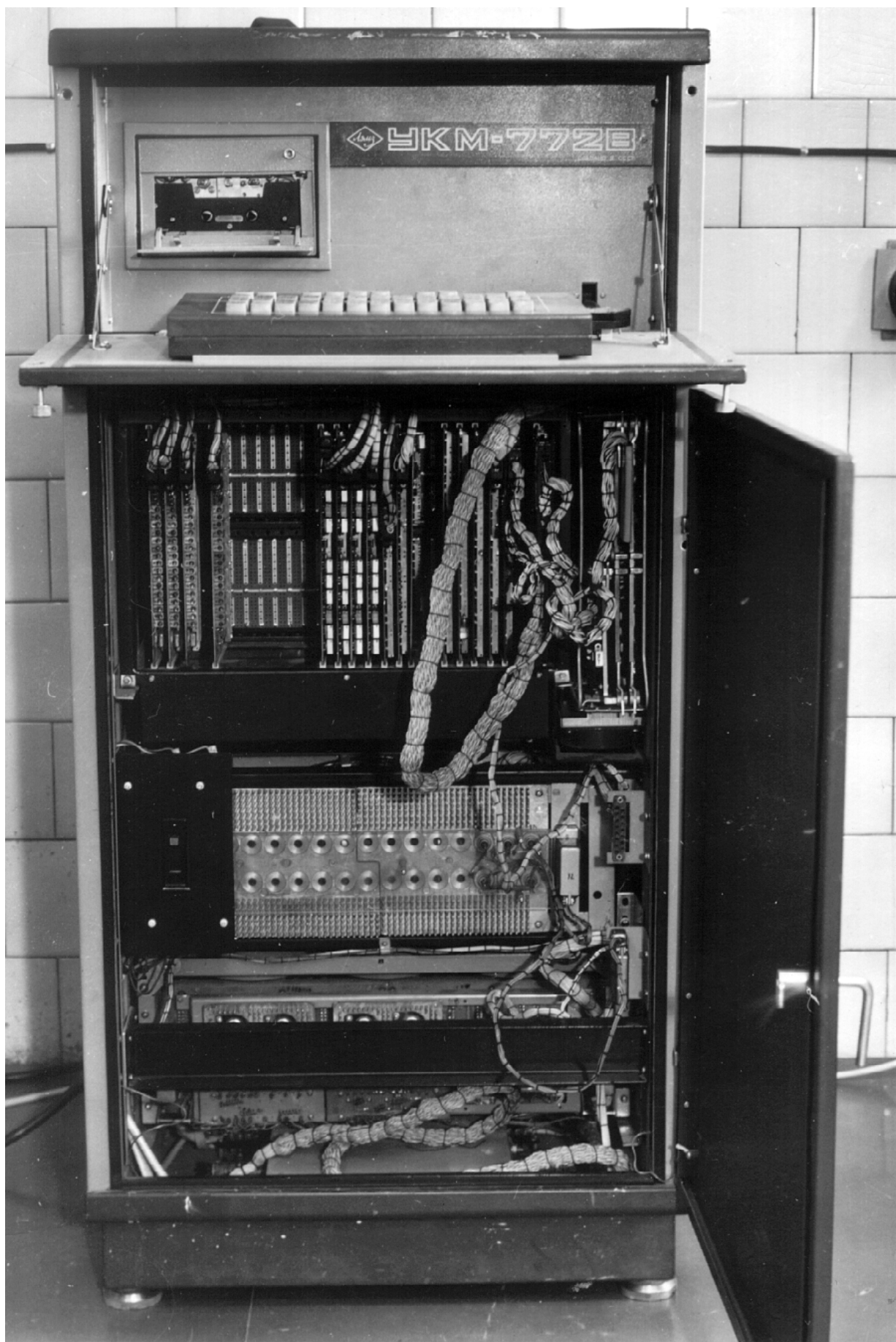


Рис. 8.2. Внешний вид унифицированного устройства контурного программного управления УКМ-7728

§ 8.2 Современные устройства управления средствами робототехники и тенденции их развития

Типовая схема современного микропроцессорного устройства программного управления роботом состоит из ряда одинаковых микропроцессоров, каждый из которых управляет отдельным приводом, и центрального микропроцессора, осуществляющего совместное управление ими. Позже были созданы более мощные по своим вычислительным возможностям микропроцессоры для управления приводами, каждый из которых управлял несколькими приводами. Однако главное направление развития таких устройств управления связано с решением задач совместного группового управления приводами.

Одна из таких задач — вычисление $q_3(t)$ и $x_{p3}(t)$. При достаточно сложной кинематике манипулятора для решения этой задачи даже в рамках обратной задачи кинематики может оказаться недостаточно одного микропроцессора. Тем более это относится к быстродействующим манипуляторам с контурным управлением, где требуется решать обратную задачу не кинематики, а динамики. Отсюда возникает необходимость использования на втором уровне управления многопроцессорных структур с распараллеливанием решения этой задачи. Синтез архитектуры и алгоритмов распределения макрооператоров, на которые распадается решение рассматриваемой обратной задачи, осуществляется за минимум времени решения. Оптимальное число микропроцессоров при этом, которое, естественно, зависит от их вычислительной мощности, составляет 3–4.

Другая задача второго уровня — это общесистемная динамическая коррекция в виде последовательной коррекции типа компенсатора, перекрестных связей, компенсирующих взаимовлияние приводов, компенсации вариаций полезной нагрузки на рабочем органе манипулятора. Решение этих задач также требует соответствующих вычислительных мощностей и, следовательно, дополнительных микропроцессоров.

В устройствах управления очувствленных роботов реализация описанных в гл. 5 функций уровней управления (см. рис. 5.4 и 5.7), включая обработку сенсорной информации и выполнение других функций адаптивного и интеллектуального управления, осуществляется отдельными микропроцессорами, которые и реализуют эти уровни системы управления. Выбор числа микропроцессоров для этих уровней и синтез алгоритмов их совместной работы осуществляется прежде всего исходя из требования функционирования системы в реальном масштабе времени. Развитие самой микропроцессорной базы этих систем идет, во-первых, по пути увеличения разрядности от 8 к 16, 32 и далее разрядам и, во вторых, по пути увеличения емкости встроенной постоянной памяти от 8–32 Кбайт к 128 Кбайт, 1 Мбайт и более.

Опыт развития и всё более широкого применения таких унифицированных устройств управления, основанных на серийных микропроцессорах общепромышленного применения, естественным образом породил следующий

этап развития устройств управления для роботов, основанный на создании и применении специальных микропроцессорных функциональных модулей. С их помощью стало возможным не только собирать традиционные типы устройств управления для отдельных роботов (причем уже не унифицированные, а соответствующие без избыточности индивидуальным особенностям каждого робота), но и создавать из таких модулей, объединенных локальными сетями, распределенные системы группового управления роботами и целыми технологическими комплексами. Преимущества такого решения были рассмотрены выше.

В настоящее время этот принцип построения распределенных систем управления из специализированных функциональных модулей, объединенных локальными сетями, реализован многими ведущими в области создания систем управления роботами и робототехническими системами фирмами. Наборы таких модулей предлагают, например, фирмы: “Сименс“ (ФРГ), “Фанук“ (Япония), “Оливетти“ (Италия), “Вуков“ (Чехия), НПО “Электронмаш“ (Россия, СПб.), НПО “Гранат“ (Белоруссия, Минск).

В число типовых модулей входят управляющие контроллеры обработки сигналов сенсоров, сами сенсоры и датчики, сетевые контроллеры для подключения к локальной сети, силовые преобразователи, интерфейсы для связи с оператором и другими системами, источники питания. К ним предлагаются также локальные сети различного уровня на базе разработанного в США протокола MAP, принятого затем как европейский стандарт. Примеры распределенных модульных систем управления крупными технологическими комплексами были даны в гл. 7.

Программное обеспечение (системное, прикладное и инструментальное) рассмотренных систем управления является иерархическим, как структура самой системы управления (см., например, рис. 5.1), и модульным, как ее аппаратная реализация. Основой ее является иерархия языков, включающая в себя в общем случае интеллектуальной системы управления, языки следующих уровней:

языки общения человека-оператора с роботом через интеллектуальный интерфейс; проблемноориентированные языки для описания подлежащих выполнению технологических операций в координатах рабочей зоны робота (языки Autopass, LM-GED, Robex и др.);

роботоориентированные языки для описания движений самого робота (языки MHI, WAVE, MINI, AL, VAL, AML, HELP, PAL, TEACH и др.);

языки элементарных движений (SIGLA, EMILY, RCL, RPL, ANORAD);

языки управления отдельными приводами.

В системах управления робототехническими системами, входящими в технологические комплексы, где они работают совместно с другими техническими системами, в эту иерархию могут также входить унифицированные промежуточные языки, предназначенные для связывания технологических систем и комплексов, использующих различные языковые средства.

Одна из актуальных задач развития программного обеспечения — это повышение общности языка верхнего уровня, т. е. языка пользователя, до уровня профессионального языка технолога или другого специалиста, эксплуатирующего робототехническую систему, с тем, чтобы от них не требовалось специальных

знаний по программированию таких систем. Пределом в этом направлении будет, очевидно, возможность общаться с робототехническими системами на естественном человеческом языке [21].

Развитием принципа распределенного управления на базе специализированных модулей, объединенных в локальную сеть, являются транспьютеры. Это программируемые преобразователи дискретной информации с развитыми средствами связи с соседними транспьютерами, участвующими в совместной обработке информации. Из таких соединенных в сеть элементов можно собирать системы управления роботов в виде распределенных по подсистемам и параллельно работающих программно специализированных функциональных модулей.

Семейство транспьютеров постоянно пополняется новыми изделиями всё большей разрядности, с большими объемом памяти, скоростью обмена информацией и числом портов. Выпускаются транспьютеры и транспьютероподобные элементы фирмами INMOS, Intel, Motorola и др. Возможности распараллеливания обработки информации в транспьютерных системах имеют свой предел. Он определяется тем, что с увеличением числа параллельно функционирующих транспьютеров происходит, с одной стороны, снижение их загрузки, а с другой — рост загрузки соединяющих их каналов связи.

Такое ограничение имеет место в любых многопроцессорных распределенных системах, когда дальнейшее увеличение количества микропроцессоров не дает существенного увеличения вычислительной мощности. Причем этот предел далеко (на порядки) не соответствует перспективным потребностям интеллектуальных систем управления роботами по всем перечисленным в § 5.3 интеллектуальным функциям этих систем, начиная с обработки сенсорной информации и кончая интерфейсом между человеком-оператором и роботом. Кардинальным решением является переход к принципиально новому аппаратному обеспечению в виде нейронных (нейроноподобных) вычислительных структур. Компьютерное моделирование таких структур подтверждает перспективность этого направления, а первый опыт их создания на традиционной микропроцессорной элементной базе уже позволил существенно превзойти быстродействие современных распределенных систем управления, в частности, в обработке сенсорной информации и планирования поведения.

В настоящее время создание подобных однородных вычислительных структур и необходимой для них элементной базы является одной из главных проблем развития искусственного интеллекта в целом. Поэтому научные исследования в этой области интенсивно ведутся во всем мире.

Остановимся теперь на аппаратуре управления роботами со стороны человека-оператора. В устройствах управления роботов, выполненных в виде стоек, обычно предусмотрены встроенные пульта или небольшие переносные пульта для командного управления отдельными приводами в основном для целей программирования методом обучения. Для осуществления управления от человека-оператора с помощью задающей рукоятки и в виде супервизорного и интеллектуального способов управления применяют специальные пульта —

напольные, настольные, а для мобильных роботов переносные (носимые) (на рис. 5.2 на переднем плане виден такой напольный пульт с двумя задающими рукоятками, системами речевого супервизорного управления и целеуказания с помощью световой метки на дисплеях). На рис. 8.3 показан внешний вид пульта управления манипуляторами космического корабля “Буран”, (описание системы управления которых было дано в § 6.5 (см. рис. 6.9).

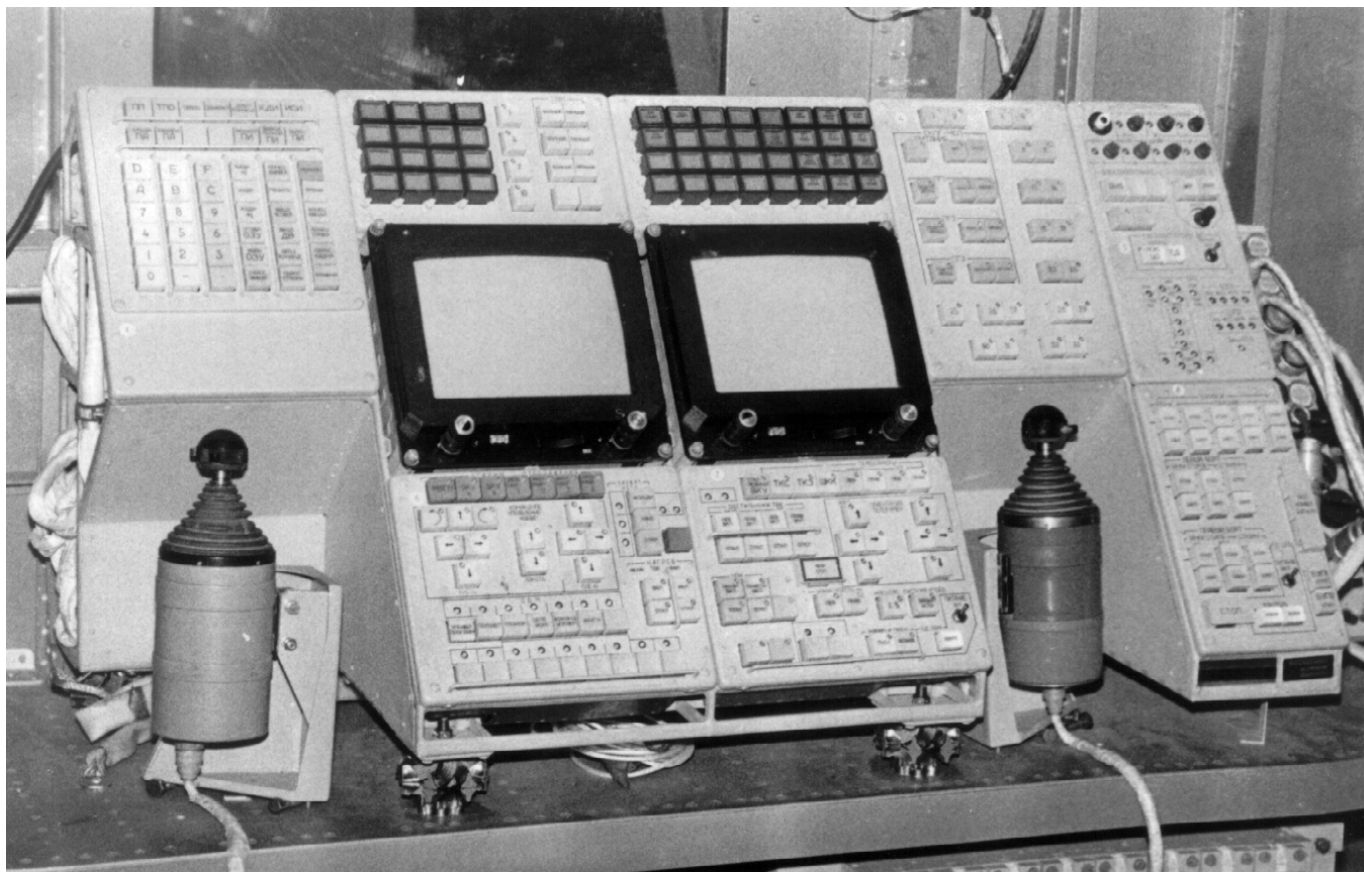


Рис. 8.3. Пульт управления манипуляторами космического корабля “Буран”

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Ф. Бурдаков. Элементы теории роботов. Механика и управление. ЛПИ им.М.И.Калинина, Ленинград,1985.
2. С.Ф. Бурдаков. Математические модели и идентификация роботов с упругими элементами. СПбГТУ, СПб,1990.
3. М.З. Коловский, А.В. Слоущ. Основы динамики промышленных роботов. М.:Наука,1988.
4. Динамика управления роботами. Под ред. Е.И. Юревича, М.:Наука,1984.
5. Н.М. Тищенко. Введение в проектирование систем управления. М.:Энергоатомиздат,1986.
6. Ж. Вертю, Ф. Куафе. Телеуправление роботами с помощью ЭВМ. М.:Мир,1989.
7. С.И.Киселев и др. Решение численных задач автоматики на ПЭВМ. СПбГТУ, СПб,1993.
8. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств. Книга 5 серии "Робототехника и гибкие автоматизированные производства". Под ред. И.М. Макарова. М.:Высшая школа,1986.
9. Манипуляционные системы роботов. Под ред. А.И. Корендясева. М.:Машиностроение,1989.
10. Г.В. Крейнин, Т.П. Саттер, Л.А. Смелов. К повышению быстродействия манипуляционных механизмов. Проблемы машиностроения и надежность машин, № 3, 1994.
11. С.Ф. Бурдаков. Синтез робастных регуляторов с упругими элементами. Сборник научных трудов N 443. Механика и процессы управления. СПбГТУ,1992.
12. П.Д Крутько. Управление исполнительными системами роботов. М.:Наука,1991.
13. Е.С. Пятницкий. Принцип декомпозиции в управлении механическими и электромеханическими системами. В сборнике трудов "Синтез систем управления манипуляционными роботами на принципе декомпозиции". М.:ИПУ,1987.
14. П.Д. Крутько, Г.А. Чхеидзе. Исследование динамики манипулятора, управляемого по ускорениям. Проблемы машиностроения и надежности. № 4, 1994.
15. И.М. Макаров, В.М. Лохин, М.П. Романов, С.В. Манько. Интеллектуальные системы управления. М., Наука, 1999.
16. Техническая имитация интеллекта. Книга 6 серии «Робототехника и гибкие автоматизированные производства». Под ред. И.М. Макарова. М., Высшая школа, 1986.
17. Дистанционно-управляемые роботы и манипуляторы. Под ред. В.С. Кулешова и Н.А. Лакоты.. М.:Машиностроение,1986.
18. В.Г. Кулейкин, А.А. Ласточкин, Н.К. Шкода. Многозвенные манипуляторы-проникатели. VII научно-техническая конференция "Экстремальная робототехника". Материалы конференции. СПбГТУ, 1997.
19. И.А. Каляев, С.Г. Капустин, Л.Ж. Усачев, С.В. Стоянов. Метод оптимального распределения целей в коллективе роботов. VIII научно-техническая конференция "Экстремальная робототехника". Материалы конференции. СПбГТУ, 1998

20. С.В. Ахапкин, В.И. Городецкий, С.В. Васильев, Л.А. Станкевич. Футбол роботов – многоагентная среда для исследования группового поведения интеллектуальных роботов. X Научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». Материалы конференции. СПбГТУ. 1999.
21. Вычислительная техника в робототехнических системах и гибких производственных производствах. Книга 4 серии “Робототехника и гибкие автоматизированные производства” под ред. И.М. Макарова, М.:Высшая школа,1986.