

ВВЕДЕНИЕ

Центральными понятиями курса теории автоматического управления являются понятия управления и системы управления.

Управление - это целенаправленное воздействие на объект (управляемый процесс), приводящее к заданному изменению (или поддержанию) его состояния.

Комплекс (система) взаимосвязанных элементов, участвующих в процессе управления называется системой управления.

Введенные понятия иллюстрируются рис. В.1, на котором представлены основные элементы (блоки) системы и показан характер их взаимодействия в процессе управления объектом.

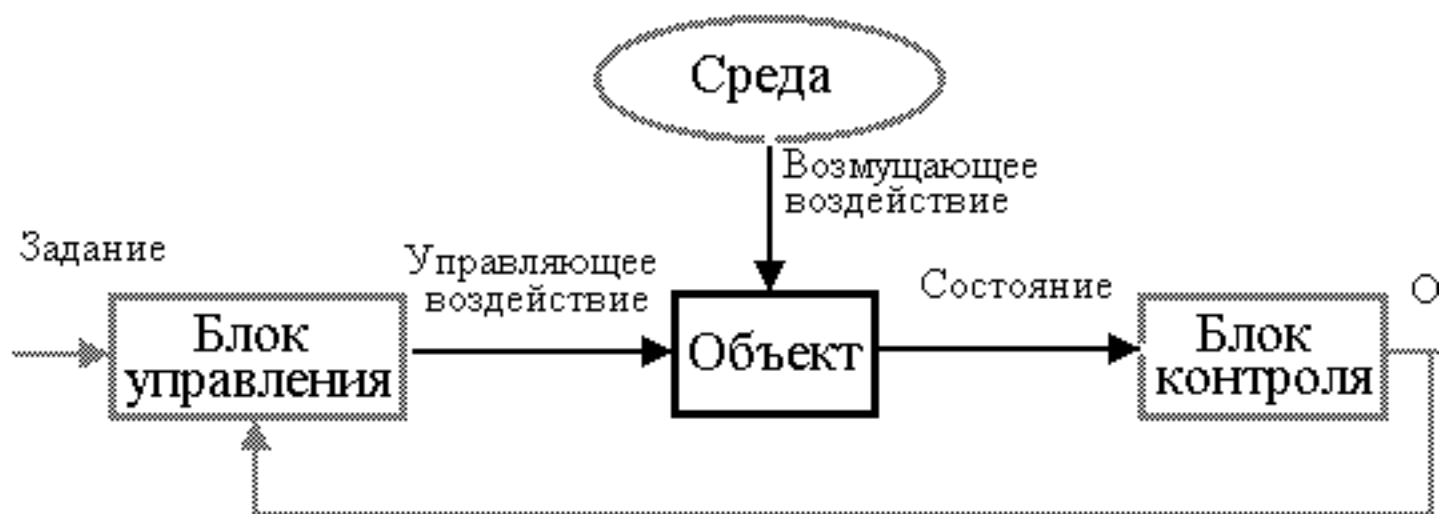


Рис. В.1. Система управления

Различают следующие типы *объектов* и управляемых процессов:

- природные (естественные), к которым относятся живые организмы, экологические и экономические процессы;
- технические, т.е. механизмы (роботы, станки, транспорт), термодинамические и химические процессы и т.д.

Состояние объекта характеризуется некоторыми количественными величинами, изменяющимися во времени, т.е. *переменными состояния* (см. п. 3.1.1). В естественных процессах в роли таких переменных может выступать температура, плотность или содержание определенного вещества в организме или среде обитания, объем выпускаемой продукции, курс ценных бумаг и т.д. Для технических объектов - это механические перемещения (угловые или линейные) и их скорости, электрические переменные, температуры и концентрации веществ и т.д.

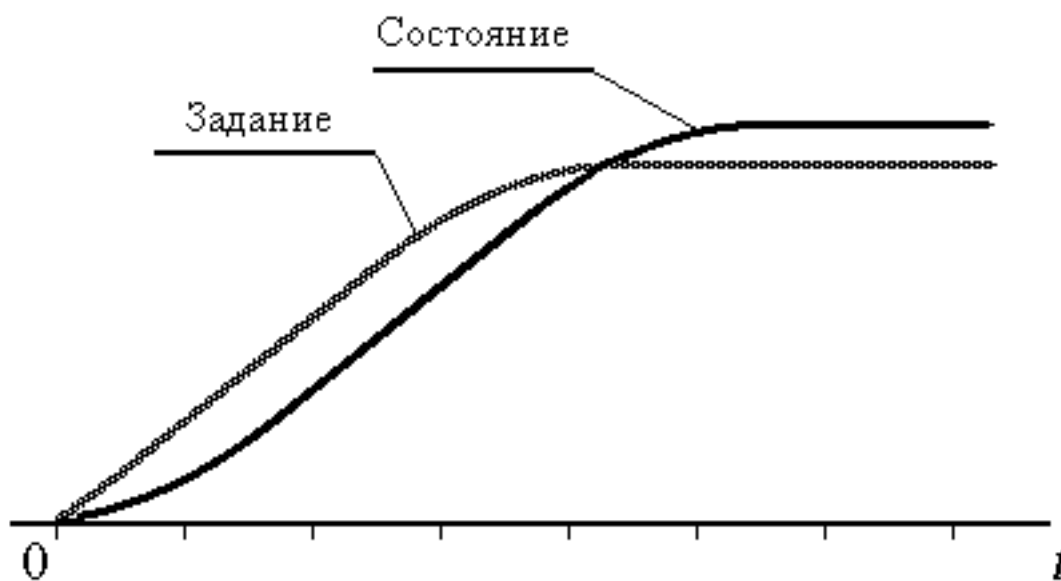


Рис. В.2. Целенаправленное изменение состояния

Целью управления является изменение состояния объекта в соответствии с заданным законом (*заданием*, рис. В.2). Такое изменение происходит в результате действия внешних факторов, среди которых выделяют

- *управляющие* (целенаправленные) *воздействия*, обеспечивающие выполнение задания;
- *возмущающие воздействия*, препятствующие желаемому протеканию управляемого процесса.

Физически управление объектом реализуется с помощью блоков управления и блоков контроля, а возмущающие воздействия являются результатом влияния внешней среды. Все эти блоки и образуют систему управления.

Блок контроля - это комплекс средств, участвующих в оценивании (идентификации) состояния управляемого процесса и/или внешней среды. К таким средствам относятся

- органы чувств живых организмов;
- статистические службы экономических систем;
- технические измерительные устройства (датчики);
- а также соответствующие вычислительные средства (природные или технические), обеспечивающие первичную обработку полученной информации. В развитых системах *оценка состояния*, полученная в результате работы блока контроля используется для управления объектом.

Комплекс взаимосвязанных элементов, участвующих в оценивании состояния объекта (объект, блок контроля и внешняя среда), называется *системой контроля*. Последняя может рассматриваться как самостоятельная система и, в то же время, является необходимой составной частью системы управления.

Блок управления - это комплекс факторов, оказывающих управляющее воздействие на объект с учетом задания и информации о текущем состоянии объекта (оценки). Основные функции этого блока сводятся к обработке информации, т.е. носят вычислительный характер. К блокам управления естественных и технических систем можно отнести:

- нейронные системы живых организмов;
- природные регулирующие факторы;
- искусственные средства, в роли которых выступают как человеческие факторы (операторы, организаторы), так и технические устройства (механические, электрические блоки, ЭВМ и нейронные процессоры).

В зависимости от природы управляемых объектов и других элементов системы можно выделить биологические, экологические, экономические и технические системы управления. Это системы стабилизации температуры живых организмов и фокусировки органов зрения; стабилизации концентрации веществ в организмах и газов в атмосфере, системы управления торговыми предприятиями, стабилизации курса ценных бумаг и регулирования спроса и предложения. В качестве примеров технических систем различного уровня сложности можно привести:

- системы дискретного действия, или автоматы (торговые, игровые, музыкальные);
- системы стабилизации уровня звука, изображения или магнитной записи;
- системы управления пространственным движением рабочего механизма станка или робота, механизмов транспортного средства;
- системы управления летательным аппаратом, включающие в свой состав САУ двигателей, рулевых механизмов, автопилоты и навигационные системы;
- аэро-космические комплексы, которые решают комплексные задачи организации (управления) полетами.

Основным предметом теории автоматического управления являются системы автоматического управления, системы автоматического контроля, и, отчасти, автоматизированные системы.

Автоматизированная система - это система, часть функций которой выполняется автоматически, а часть оператором (организатором).

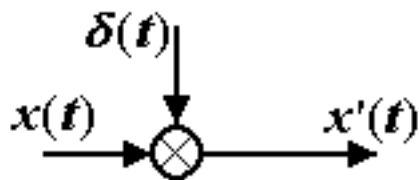
Замечание 1.1. Сигналы как и порождающие их процессы существуют вне

зависимости от наличия измерителей или наблюдателя.

В различных областях науки и техники приняты свои определения и подходы к изучению сигналов. Рассматриваемая здесь кибернетическая трактовка этого понятия предусматривает отказ от изучения физических особенностей как первичного процесса, так и носителя сигнала. Сигнал отождествляется с *информацией об изменении физических переменных* изучаемого процесса. При этом учитывается, что по различным причинам реальный сигнал не содержит всей информации о развитие физического явления, а, с другой стороны, может содержать постороннюю информацию. На информационное содержание сигналов оказывают влияние способы их кодирования, шумы и эффекты квантования.

В зависимости от способа кодирования различают аналоговые и цифровые сигналы. Для *аналоговых сигналов* интенсивность физического носителя пропорциональна (аналогична) изучаемой физической переменной, в то время как в *цифровых сигналах* информация представлена в виде чисел (например, в форме параллельных и последовательных двоичных кодов).

Методы преобразования, кодирования и передачи информации специально изучаются в прикладной теории информации. В теории управления представляет интерес насколько закодированная информация адекватна рассматриваемой физической переменной. Этот вопрос связан с понятиями идеального и реального сигнала.



Идеальный сигнал с информационной точки зрения тождествен некоторой физической переменной $x(t)$, в то время как *реальный сигнал* можно представить в виде

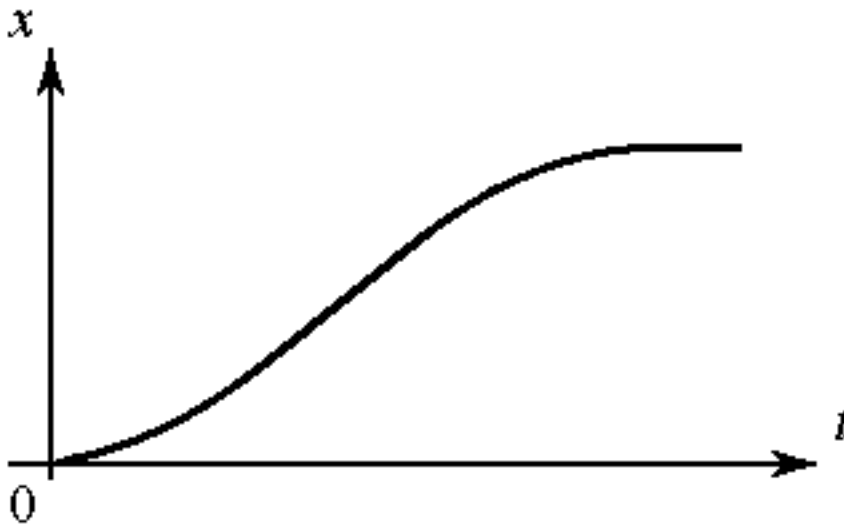
$$x'(t) = x(t) + \delta(t),$$

где $\tilde{\delta}(t)$ - помеха измерения или шум, т.е. посторонняя информация о канале связи, внешней среде или измерителе.

С понятием реального сигнала связаны вопросы *идентификации* (оценивания) динамических процессов по текущим измерениям $x'(t)$ и, в частности следующие задачи:

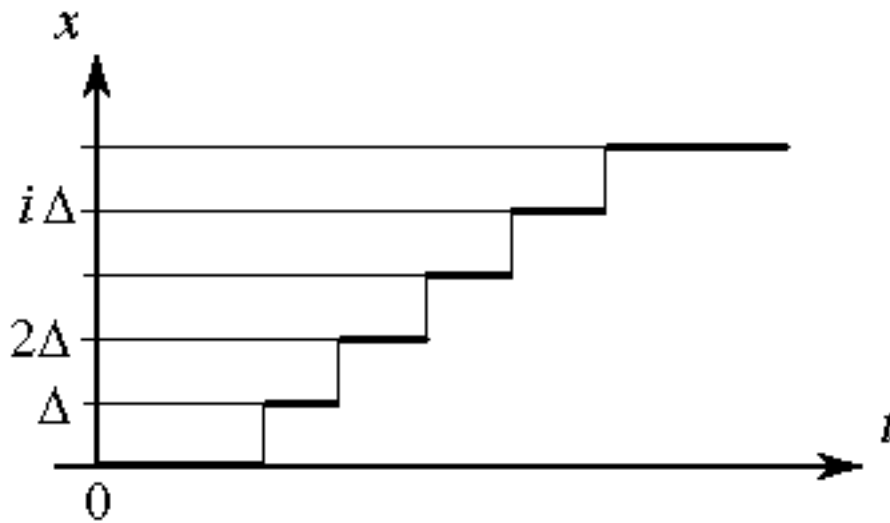
- *наблюдения*, или получения в реальном времени оценки $\hat{x}(t)$ изучаемого процесса $x(t)$;
- *фильтрации*, или получения апостериорной оценки процесса $\hat{x}(t-\tau)$, где τ - интервал запаздывания;
- *прогнозирование*, или предсказания будущих значений $\hat{x}(t+\tau)$.

Задачи оценивания первичного процесса по реальным измерениям рассматриваются в теории оценивания (идентификации).



Информационное содержание сигнала зависит и от эффектов квантования. По характеру изменения во времени процессы и сигналы подразделяются на непрерывные и дискретные. К последним, в свою очередь, относятся процессы квантованные по уровню и процессы квантованные по времени.

Развитие *непрерывного некантованного*) процесса характеризуется переменной $x(t)$, принимающей произвольные значения из числовой области X и определенной в любые моменты времени $t > 0$. К непрерывным процессам относится непрерывное механическое движение, электрические и тепловые процессы.



Развитие *дискретного (квантованного по уровню)* процесса характеризуется переменной $x(t)$, принимающей строго фиксированные значения x_i , $i=1,2,\dots$, и определенной в любые моменты времени $t > 0$. В большинстве практических случаев можно положить

$$x_i = i \Delta, \quad i = \overline{1, n},$$

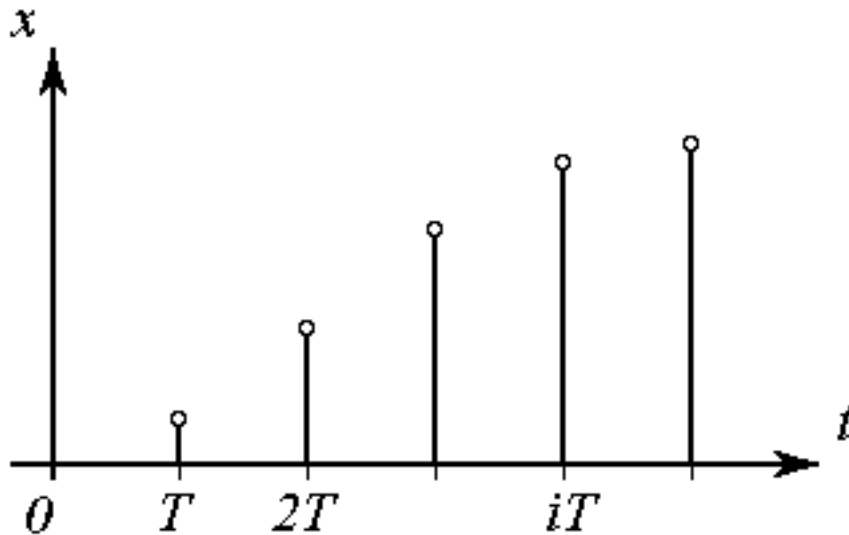
где Δ - приращение или уровень дискретности, n - число допустимых состояний.

К процессам квантованным по уровню можно отнести:

- бинарные процессы (релейные процессы и двоичные сигналы), где $n=2$;
- дискретные автоматические линии;
- пневматические роботы-манипуляторы, имеющие конечное число фиксированных положений в пространстве;
- k -разрядные двоичные регистры, имеющие 2^k состояний;

- все процессы в цифровых устройствах и ЭВМ.

Замечание 1.2. В тех случаях, когда число состояний n достаточно велико или интервал дискретности Δ x достаточно мал, квантованием по уровню пренебрегают.

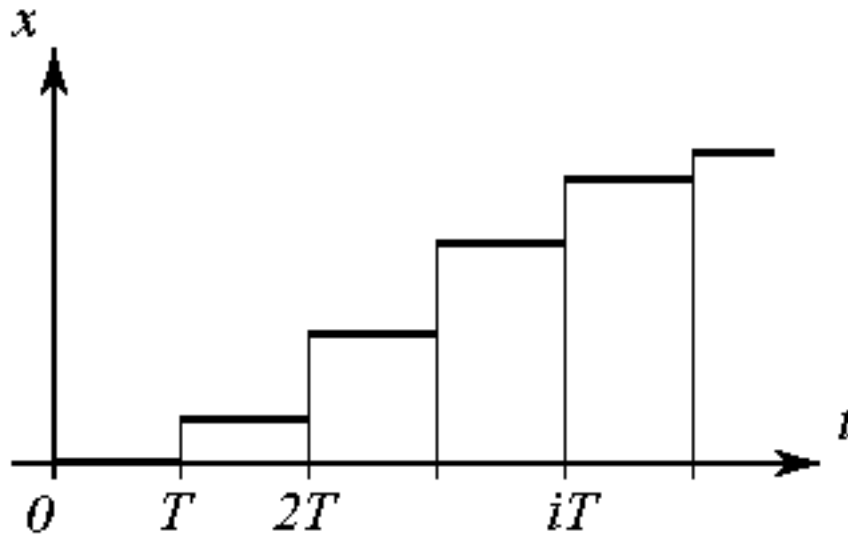


Развитие *дискретного(квантованного по времени)* процесса, или процесса дискретного времени, характеризуется переменной $x(t)$ принимающей произвольные значения x и определенной в фиксированные моменты времени $t_i, i=0,1,2,\dots$. Во многих случаях

$$t=iT, i \geq 0,$$

где T - интервал квантования (дискретности). К таким процессам относятся:

- экономические процессы, связанные с календарем (например, динамика курса ценных бумаг, где $T=1$ день);



- процессы в цифровых вычислительных устройствах, где $T=1/f$, f - тактовая частота процессора;
- процессы в цифровых системах управления, в которых дискретность по времени обусловлена циклическим характером обработки информации в реальном масштабе времени (здесь T - время обновления информации на выходном регистре управляющей ЭВМ).

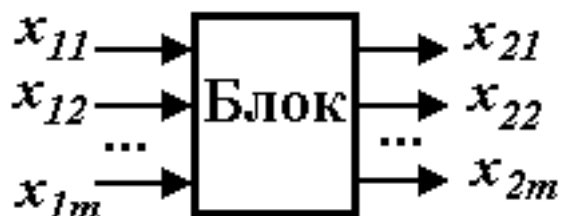
Замечание 1.3. При достаточно малых (по сравнению с длительностью других процессов) интервалах T дискретностью по времени пренебрегают и квантованный по времени процесс относят к процессам непрерывного времени.

Замечание 1.4. К дискретным обычно относят также кусочно-постоянные процессы и сигналы, которые характеризуются переменной $x(t)$, скачкообразно изменяющиеся в фиксированные моменты времени ti .



1.1.2. Кибернетические блоки. Кибернетический блок ("черный ящик") - это блок, для которого установлены связанные причинно-следственным отношением входные и выходные сигналы. Выходной сигнал блока $x_2(t)$ несет информацию о внутреннем процессе, причиной которого является входной сигнал $x_1(t)$.

Замечание 1.5. В определении блока отсутствует упоминание физической природы процессов внутри блока, что и определило термин "черный ящик".



В зависимости от числа входных и выходных сигналов различают *одноканальные блоки*, т.е. блоки с одним входом и одним выходом, и *многоканальные* с несколькими входными и выходными сигналами. Блоки, у которых отсутствуют входные сигналы называются *автономными*. По типу сигналов различают *непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные* блоки.

Для описания кибернетического блока используется одна из форм аналитического описания связи входных и выходных сигналов. Для простейших блоков такое описание может быть получено в виде алгебраического или трансцендентного уравнения:

$$(1.1) \quad x_2 = f(x_1),$$

где $f(\cdot)$ - функция. В более общем случае для описания блоков используются дифференциальные и разностные (рекуррентные) уравнения, автоматные алгоритмы, т.е. выражения вида

$$(1.2) \quad x_2(t) = F(x_1(t)),$$

где $F(\cdot)$ - функциональный оператор.



Рис. 1.1. Электронагревательная печь

Пример 1.1. Рассмотрим электронагревательную печь, т.е. камеру (рис. 1.1), температура в которой t регулируется с помощью электрического нагревателя. Входным сигналом рассматриваемого блока является напряжение нагревателя: $x_1(t) = U(t)$, а выходным - температура: $x_2(t) = t(t)$. Связь выхода и входа описывается функциональным оператором (дифференциальным уравнением):

$$(1.3) \quad T\dot{x}_2(t) + x_2(t) = Kx_1(t),$$

где T - постоянная времени, K - коэффициент передачи. Если напряжение нагревателя постоянно, т.е. $x_1 = U = \text{const}$, то выходная переменная находится как

$$x_2(t) = K(1 - e^{-t/T})x_1.$$

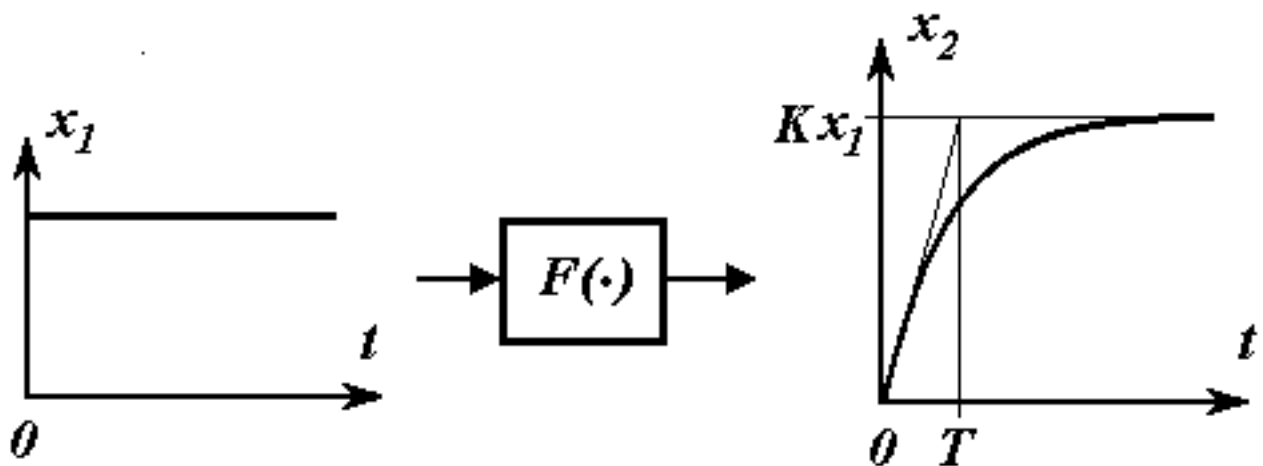
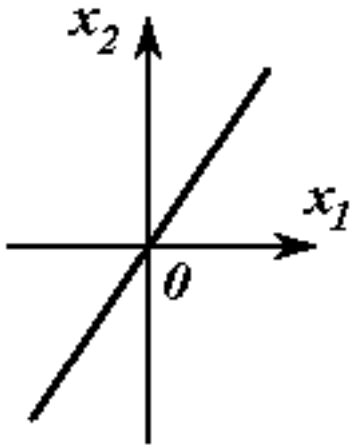


Рис. 1.2.



В установившемся режиме, т.е. после окончания процессов в печи при $t \rightarrow \infty$, связь выходного и входного сигналов описывается простейшим алгебраическим уравнением вида (1.1)

$$(1.4) \quad x_2 = Kx_1 .$$

Аналогичные выражения для описания связей входных и выходных переменных получаются для электрической RC-цепи (рис. 1.3). Здесь $x_1(t)=U_1(t)$ - входное напряжение, $x_2(t)=U_2(t)$ - выходное напряжение схемы, $T=RC$ и $K=1$.

Наконец, те же уравнения (1.1) и (1.2) описывают процесс разгона электродвигателя (рис. 1.4), для которого $x_1(t)=U(t)$ - входное напряжение, а $x_2(t)=\omega(t)$ - скорость вращения вала.

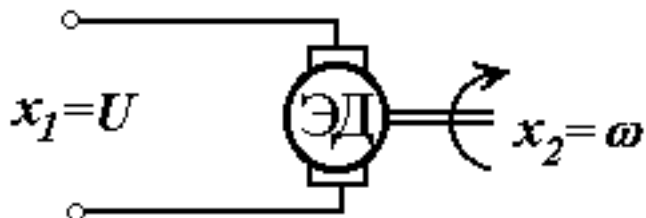
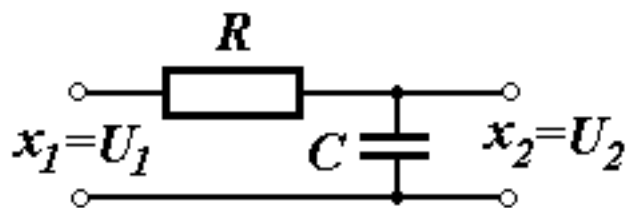


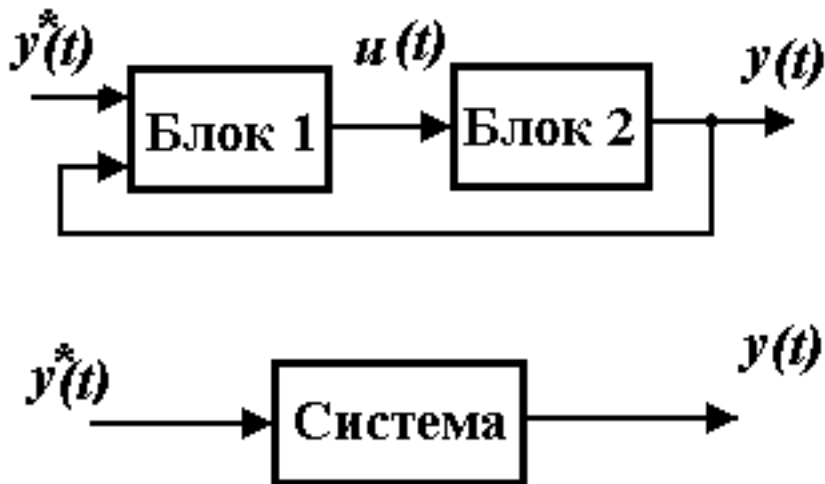
Рис. 1.3. RC - цепь

Рис. 1.4. Электродвигатель

С понятием кибернетического блока связаны следующие задачи:

- идентификации, или определение аналитического выражения (связи) между сигналами x_2 и x_1 ;
- управления, или определение входного сигнала $x_1(t)$, обеспечивающего получение заданного выходного сигнала $x_2(t)$ в предположении, что описание блока известно (такая задача известна в теории дифференциальных уравнений как обратная задача Н.П. Еругина).

1.1.3. Кибернетические системы. Кибернетическая система - это упорядоченная совокупность (система) кибернетических блоков, связанных между собой информационными каналами.



Замечание 1.6. Понятие системы предполагает появление нового качества, вообще говоря, отличного от свойств отдельных ее элементов. Связи, упомянутые в определении, носят сигнальный (информационный) характер.

Для описания системы необходимо получить аналитические зависимости, описывающие каждый из блоков (Блок 1, Блок 2 и т.д.) в отдельности и связи между ними. После эквивалентных преобразований может быть получено общее (эквивалентное) описание системы как составного кибернетического блока с входным сигналом $y^*(t)$ и выходным сигналом $y(t)$. (см. пп. 2.4 и 4.3)

Таким образом, кибернетическая система является сложным блоком. В зависимости от числа входных и выходных сигналов различают *одноканальные* системы (с одним входом и одним выходом), и *многоканальные* системы с несколькими входными и выходными сигналами. Системы, у которых отсутствуют входные сигналы называются *автономными*.

По типу сигналов в системе (или блоках) различают: *непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные системы*, причем последние содержат как непрерывные, так и дискретные блоки (см. ниже).

Определение кибернетической системы позволяет ввести следующие задачи:

- анализа системы, т.е. определения связи между ее входом и выходом (в виде алгебраического или дифференциального уравнения и т.д.), а также нахождения

- косвенных показателей качества системы (быстродействия, точности и т.д.);
- управления (синтеза) кибернетической системы, т.е. нахождения блоков и связей между ними, обеспечивающих заданную связь входных и выходных сигналов, либо заданные качественные показатели.

Известна также прикладная задача проектирования системы, включающая в себя задачу управления (синтеза системы), ее комплектации (выбора физических элементов), разработки прикладных программ управляющих ЭВМ и т.д.

Наиболее распространенным типом дискретно-непрерывных систем являются цифровые системы, в состав которых входят цифровые вычислительные устройства (ЭВМ и цифровые контроллеры).

1.1.4. Дискретно-непрерывные (цифровые) системы. Рассмотрим простейшую цифровую систему управления вращением кинематического механизма (рис. 1.5). В состав системы входит простейший кинематический механизм КМ, электродвигатель ЭД, усилитель У, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП и управляющая вычислительная машина ЭВМ.

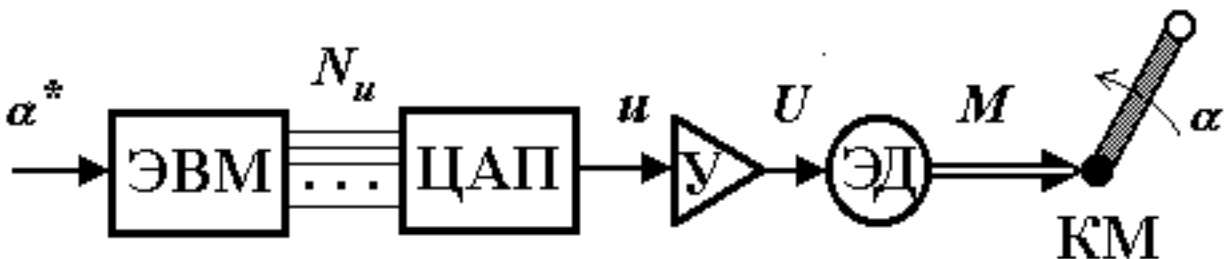


Рис. 1.5. Система управления вращением кинематического механизма

Работа системы происходит следующим образом. Информация о требуемом угле поворота (задание) α^* поступает на ЭВМ, где осуществляется расчет необходимого управляющего сигнала $Nu(t)$. Последний представлен в виде цифрового кода, который преобразуется в аналоговый управляющий сигнал $u(t)$ с помощью цифро-аналогового преобразователя. Так как мощности полученного сигнала $u(t)$ не достаточно для приведения в действие электродвигателя, то требуется подключения усилителя мощности У. Выходное напряжение усилителя $U(t)$, будучи приложено к двигателю, приводит к созданию необходимого движущего момента (сигнал $M(t)$). Момент электродвигателя прикладывается к валу кинематического механизма и обеспечивает

его вращение, т.е. изменение углового положения $\alpha(t)$ от начальной величины $\alpha(0)$ до заданного значения α^* .

Отметим, что сигналы в рассмотренной системе различны по физической природе и способам кодирования. В силу дискретности процессов в цифровых вычислительных устройствах и конечности их разрядной сетки, ЭВМ относится к дискретным блокам, а сигнал на ее выходе $Nu(t)$ является квантованным по времени и уровню.

Система, приведенная на рис. 1.5, относится к классу разомкнутых систем управления, в которых задача управления (изменения состояния КМ) решается без учета реального положения механизма $\alpha(t)$. Это вызывает, во-первых, определенные сложности расчета управляющего сигнала $u(t)$, обеспечивающего заданное угловое перемещение механизма α^* , а во-вторых, не позволяет гарантировать достаточной точности управления в условиях действия на механизм сил тяжести и трения. Указанные недостатки устраняются в замкнутых системах, в состав которых входит подсистема контроля и обратные связи.

Дополним рассмотренную ранее систему следующими элементами (рис. 1.6): измерительным потенциометром, выходное напряжение которого $u_\alpha(t)$, пропорционально текущему значению $\alpha(t)$, усилителем U и аналого-цифровым преобразователем АЦП, осуществляющим преобразование сигнала $U_\alpha(t)$ на выходе усилителя в цифровой код $N_\alpha(t)$, поступающий далее на ЭВМ. Эти элементы в совокупности с ЭВМ составляют цифровую подсистему контроля вращения кинематического механизма, обеспечивающую измерение текущего положения КМ и ввод информации в управляющую вычислительную машину.

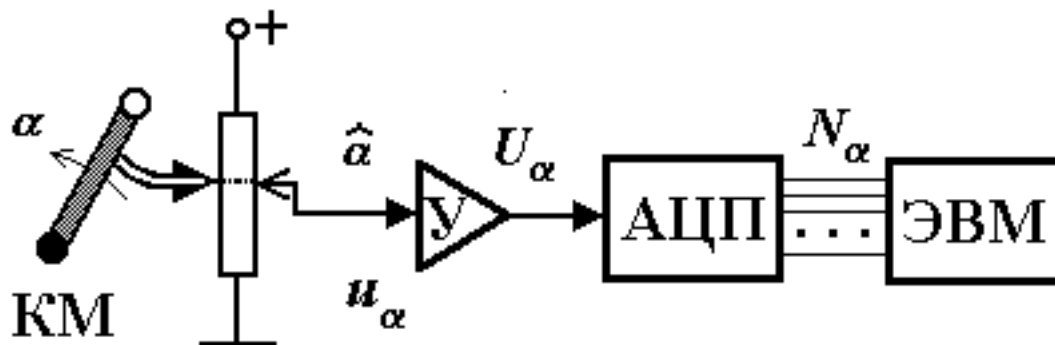


Рис. 1.6. Подсистема контроля

Отметим дискретный характер сигнала (цифрового кода) $N_{\alpha}(t)$, что обусловлено функциональными особенностями АЦП, и, следовательно, дискретно-непрерывный тип рассмотренной подсистемы контроля.

Объединение разомкнутой системы управления (рис. 1.5) и подсистемы контроля (рис. 1.6) позволяет получить замкнутую систему управления. Укрупненная схема такой системы представлена на рис. 1.7. Она включает в свой состав цифровой блок управления и электро-механический блок (ЭМ блок). Последний включает аналоговые элементы системы (кинематический механизм, двигатель, усилители и измерительный потенциометр) и по типу сигналов относится к непрерывным блокам. В блок управления входят ЭВМ и устройства ввода-вывода информации (УВВ), или сопряжения с объектом (УСО), представленные цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями и обеспечивающие сопряжение цифровой и аналоговой частей системы управления.



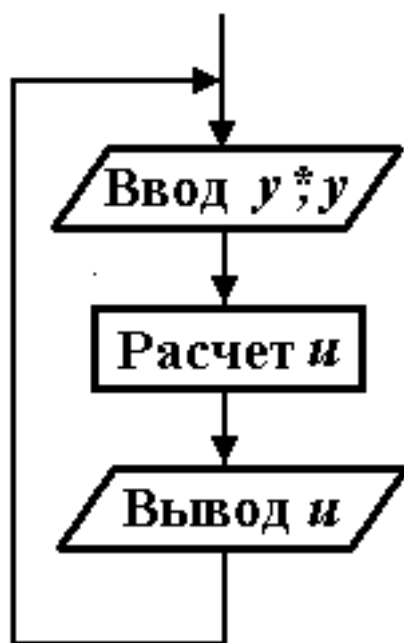
Рис. 1.7. Замкнутая система управления

В функции цифрового блока управления входит расчет управляющего сигнала $u(t)$ на основании задания α^* и текущей информации о положении кинематического механизма $\alpha(t)$. Простейший алгоритм расчета (пропорциональный алгоритм управления) имеет вид

$$(1.5) \quad u(t) = K (\alpha^* - \alpha(t)),$$

где K - постоянный коэффициент. При расчетах по формуле (1.5) управляющий сигнал пропорционален текущему значению отклонения $\alpha^* - \alpha(t)$, что обеспечивает:

- движение кинематического механизма в нужном направлении (в зависимости от знака отклонения) при, $\alpha(t) \neq \alpha^*$;
- остановку механизма при $\alpha^* = \alpha(t)$ в силу $u(t) = 0$ и, следовательно, нулевых значений напряжения на выходе усилителя мощности U вращающего момента M .



Укрупненный алгоритм работы ЭВМ в режиме реального времени представлен на рис. 1.8. Он включает блок ввода данных (задания $y^* = \alpha^*$ и текущего значения $y = \alpha$), блок расчета текущего значения управления u по формуле (1.5) и блок вывода данных (полученного значения u). Циклическое выполнение алгоритма обеспечивает возможность обновления выходных данных в процессе работы системы при изменения

входных данных (текущего значения x).

Циклический характер выполнения программы служит причиной временной дискретности сигналов N x и Nu и цифрового устройства управления в целом. При этом интервал квантования приближенно оценивается временем, необходимым для выполнения одного цикла программы.

Отметим, что рассмотренная система управления является составным кибернетическим блоком с входным сигналом $y^* = x^*$ и выходным сигналом $y = x(t)$. Система содержит *обратную связь* по выходной переменной (сигнал y поступает *обратно* на вход системы). Ее аналитическое описание (связь y^* и y) можно получить на основании известных приемов преобразования динамических систем (см. пп. 2.4 и 4.3), используя описание электромеханического блока (связь сигналов y и u) и формулу (1.5).

1.1.5. Кибернетика и предмет теории автоматического управления. Понятие кибернетики как *науки об управлении и связи в живом (природе и обществе) и машинах* было введено в 1948 году Норбертом Винером. В настоящее время в виде отдельных дисциплин можно выделить следующие разделы кибернетики:

- системный анализ (теория больших систем, теория сложных систем и т.д.);
- теория автоматического управления (ТАУ);
- прикладная теорию информации;
- теория оценивания (идентификации);
- теория вычислительных машин (информатика);
- робототехника и т.д.

В зависимости от области применения различают техническую кибернетику, т.е. кибернетику в технических приложениях, биокибернетику, медицинскую кибернетику, экономическую кибернетику и др.

Теория автоматического управления (ТАУ) - наука об управлении, изучающая задачи анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ), как одного из классов кибернетических систем. Основные разделы ТАУ - это:

- анализ САУ, т.е. анализ устойчивости, структурных свойств, динамических показателей качества, точности;

- синтез САУ, т.е. синтез алгоритмов (аналитических выражений), описывающих блоки системы и их связи, и обеспечивающих заданное (может быть, оптимальное) качество управления.

Современная теория управления занимает одно из ведущих мест в технических науках и, в то же время, относится к одной из отраслей прикладной математики. Теория и практика автоматического управления связана с вычислительной техникой. В этой связи следует отметить, что исследование САУ включает следующие важнейшие этапы:

- моделирование с использованием компьютеров и универсальных (математических) либо специализированных (предметно-ориентированных) пакетов прикладных программ;
- синтез САУ с привлечением современного математического аппарата (методов линейной алгебры, численных методов, теории оптимизации) и, следовательно, машинных методов расчета;
- проектирование системы управления с использованием аппаратных средств вычислительной техники и их программного обеспечения (операционных систем реального времени, средств автоматизации программирования и проч.).

Первый проект по практической реализации цифровых систем был выдвинут в 1950 году американскими фирмами TRW и Техасо. В данном проекте ЭВМ использовалась как средство автоматизации химических процессов. Было установлено, что для успешной реализации цифрового управления требуется

- анализ управляемых процессов;
- хорошие алгоритмы управления.

Эти выводы определили в 60-ые годы интенсивное развитие математических методов управления, ориентированных на использование ЭВМ. Однако их практическая реализация натолкнулась на ряд препятствий, среди которых низкое быстродействие существовавших средств вычислительной техники, их значительные габариты и стоимость, а также низкая надежность.

Решение проблемы было предложено в середине 70-ых годов с появлением серийных и достаточно дешевых микропроцессоров и микро-ЭВМ, которые могли обеспечить требуемое быстродействие управления, имели малые габариты и высокую надежность. Микропроцессорные устройства начинают постепенно вытеснять традиционные электрические и электронные средства управления (регуляторы) в простейших автоматических системах. Более того с развитием микропроцессорной

техники появилась возможность реализации более

сложных алгоритмов для решения нетрадиционных задач управления.

Проектирование, внедрение и эксплуатация современных САУ требует взаимодействия специалистов различных профилей:

- технологов, т.е. специалистов, знающих особенности управляемых процессов и технические требования к проектируемой САУ;
- специалистов по автоматическому управлению, обеспечивающих разработку САУ (алгоритмов управления и контроля);
- специалистов по вычислительной технике для разработки математического обеспечения для проектирования САУ, средств автоматизации программирования, организации вычислений в ПВ (ОСРВ) и комплектации технических средств.

Структура и функциональные компоненты САУ

1.2.1. Схема и функциональные компоненты систем управления. Система автоматического управления содержит следующие функциональные компоненты (рис.1.9):

- объект (управляемый процесс);
- исполнительные устройства ИСУ;

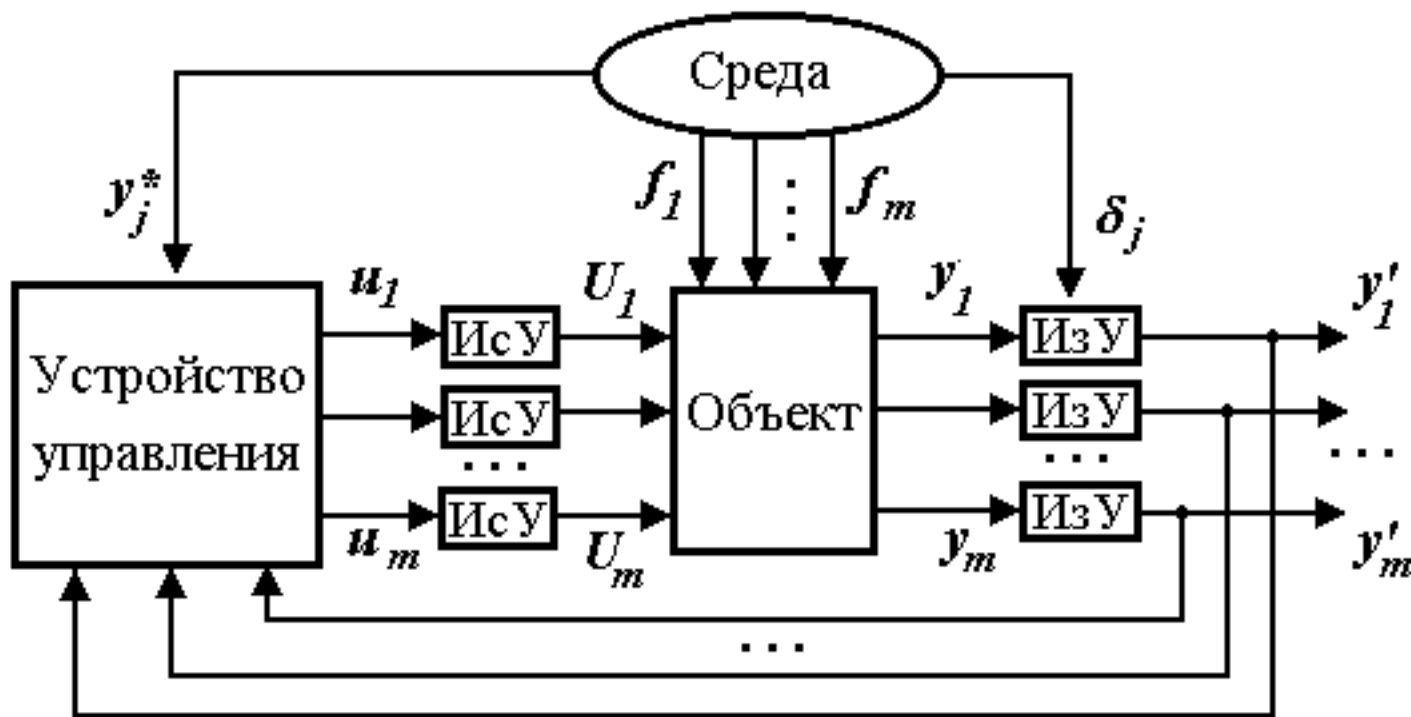


Рис. 1.9. Функциональная схема САУ

- измерительные устройства ИзУ;
- устройство управления УУ.

Объектами технических систем служат: кинематические механизмы, электрические, химические, тепловые процессы и другие технологические процессы.

Текущее состояние объекта характеризуется *переменными состояниями* x $i=x_i(t)$ (точное определение см. п. 3.1.1), к которым относятся физические величины:

- угловые и линейные координаты, скорости и другие механические переменные, описывающие движения кинематических механизмов;
- токи или напряжения электрических элементов схемы;
- температуры и плотности веществ в тепловых и химических процессах

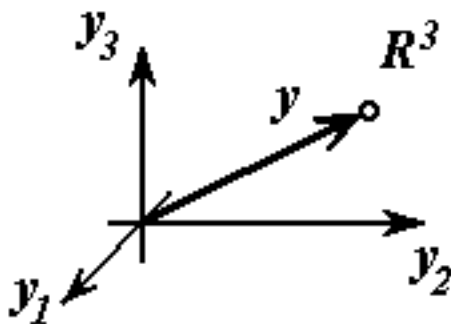
и т.д.

Переменные состояния объединяются в *вектор состояния*

$$x(t) = \{x_i\} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}.$$

К *регулируемым, или выходным, переменным* $y_j = y_j(t)$ относятся те переменные объекта (управляемого процесса), по отношению к которым формулируется основная задача управления. Выходные переменные объединяются в *вектор выхода*

$$y = \{y_j\} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}.$$



Для многосвязных кинематических механизмов вектор выхода обычно представлен

декартовыми координатами рабочей точки механизма (например, схвата робота манипулятора, см. пример 1.2).

Входами объекта являются управляющие органы, к которым прикладываются воздействия U_j исполнительных устройств системы.

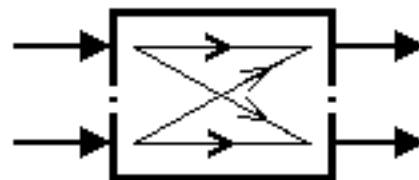
Это - входные оси кинематических механизмов, входные схемы электрических систем, нагревательные элементы и вентили тепловых и химических процессов,



к которым приложены силы или моменты сил электроприводов, электрические напряжения и т.д., вызывающие движение (развитие) управляемого процесса.

Объекты с одним входом и одним выходом ($m=1$) называются *одноканальными*. Соответственно, к *многоканальным* относят объекты с несколькими входами и/или выходами. Последние могут иметь *автономные*

(независимые друг от друга) *каналы*. Часто каналы многоканального объекта



оказываются взаимозависимы и такой объект называется *многосвязным*.

К *внешней среде* системы управления относятся внешние процессы, оказывающие влияние на поведение управляемого объекта. Среда является источником следующих факторов (воздействий):

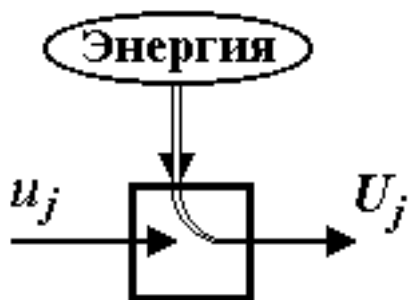
- помех измерения $\delta j(t)$ (см. п. 1.1.1);
- возмущающих воздействий $f_j(t)$;
- внешних задающих воздействий $y^*(t)$ (см. п. 1.1.3).

К возмущающим относят воздействия, препятствующие функционированию объекта (силы сопротивления для кинематических механизмов, температура окружающей среды для тепловых процессов и т.д.). Возмущающие воздействия объединяются в *вектор возмущений*

$$f = \{f_j\} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_\mu \end{bmatrix}.$$

Измерительные устройства (датчики) предназначены для получения информации об объекте и внешней среде y_j , т.е. для электрического измерения переменных состояния, выходных переменных, внешних задающих воздействий и т. д. Различают следующие типы измерительных устройств:

- датчики внутренней информации, предназначенные для измерения переменных объекта (системы управления);
- датчики внешней информации (сенсоры, средства очувствления, средства внешнего контроля) - измерители состояния внешней среды, либо положения объекта по отношению к внешним объектам. В состав измерительных устройств часто включают также вычислительные блоки, осуществляющие первичную обработку информации.



Исполнительные устройства - это устройства, предназначенные для усиления маломощных управляющих сигналов u_j и создания энергетических воздействий U_j на входах объекта, т.е. управляемые источники механической, электрической или тепловой энергии. Наиболее распространенный тип электромеханического исполнительного устройства - это *электропривод* или управляемый преобразователь электрической энергии в механическую (см. пример 1.2).

Устройство управления - это вычислительный блок обрабатывающий полученную с помощью измерителей текущую информацию о состоянии объекта и внешней среды и формирующий *управляющие воздействия* u_j , т.е. маломощные информационные сигналы, поступающие на исполнительные устройства объекта. Управляющие воздействия объединяются в *вектор управления*

$$u = \{u_j\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}.$$

В функции устройства управления входит:

- идентификация объекта и среды (анализ их текущего состояния и, может быть, параметров);
- генерация внутренних задающих воздействий;
- расчет управляющих воздействий u_j по предписанным формулам (алгоритмам управления).

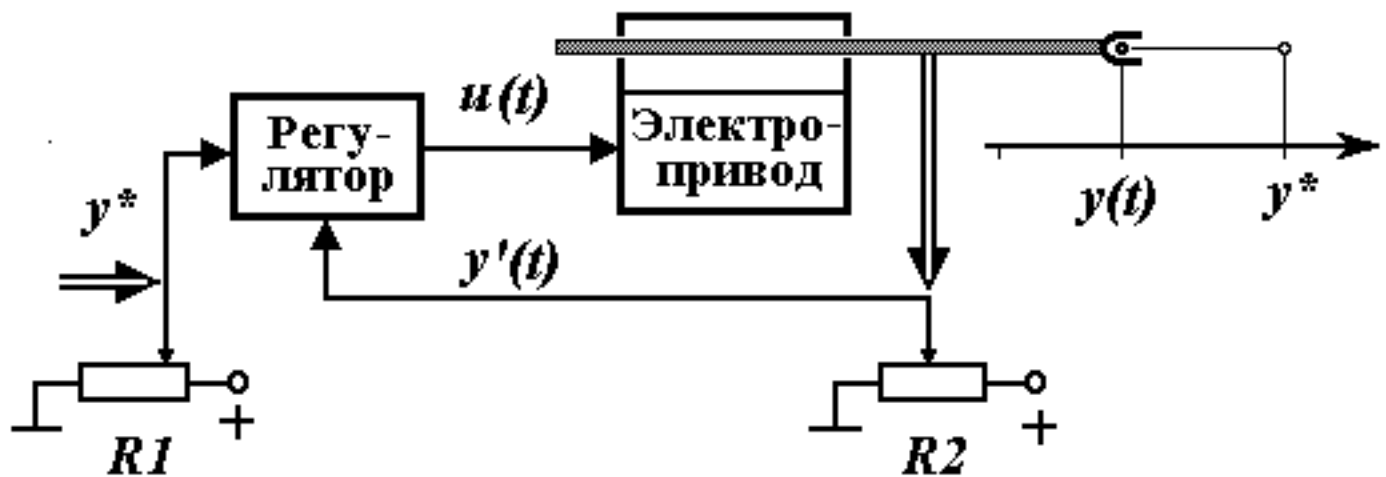


Рис. 1.10. Система управления звеном робота манипулятора.

Пример 1.2. Управление положением кинематического механизма.

Функциональная схема простейшей одноканальной системы управления звеном робота манипулятора (РМ) представлена на рис. 1.10, где введены следующие обозначения:

$y(t)$ - текущее положение звена РМ,

y^* - заданное положение,

$y'(t)$ - измеренное положение,

$u(t)$ - управляющий сигнал.

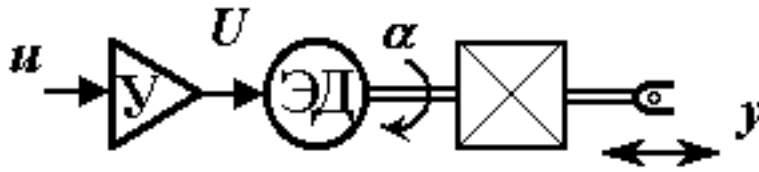
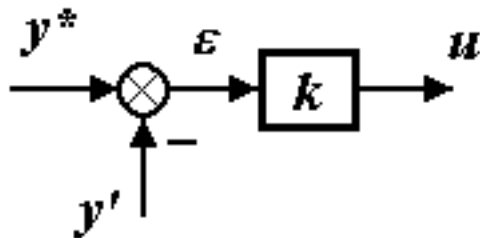


Рис. 1.11. Электропривод

Желаемое положение звена вводится в систему с помощью задающего потенциометра $R1$, который является простейшим задающим блоком (ЗБ). Измерительный потенциометр $R2$ выполняет функции датчика положения (измерительного устройства). Исполнительным устройством является электропривод, состоящий из усилителя мощности $У$, электродвигателя ЭД и механической передачи (редуктор, шариковинтовая передача и т.д.), связанной с управляемым звеном РМ. Схема электропривода представлена на рис. 1.11, где U - напряжение на входе электродвигателя, α - угол поворота вала ЭД.



Важнейшим элементом системы является регулятор, который реализуется на базе аналоговых элементов (усилителей, сумматоров, интеграторов и т.д.) или цифровых схем (ЭВМ). Регулятор рассчитывает значения управляющего сигнала $u(t)$ на основании информации о заданном y^* и реальным $y(t)$ (а точнее, измеренном $y'(t)$) положении звена. Простейший тип регулятора - пропорциональный, или П-регулятор, осуществляющий расчеты по формуле (алгоритму):

$$(1.6) \quad u(t) = k \cdot \varepsilon(t)$$

где k - коэффициент пропорциональности, ε - ошибка (отклонение,

рассогласование) вычисляемая как.

$$(1.7) \quad \varepsilon(t) = y(t) - y'(t).$$

Рассматриваемая система управления предназначена для решения терминальной задачи - задачи перемещения звена РМ в заданное конечное (терминальное) положение y^* : $y \rightarrow y^*$, или, иначе, устранение ошибки положения ε ; $\varepsilon \rightarrow 0$.

Структурная схема системы управления положением, а также временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рис. 1.12, 1.13. Система содержит блок управления, состоящий из задающего блока и регулятора, а также исполнительное (электропривод) и измерительное устройство.

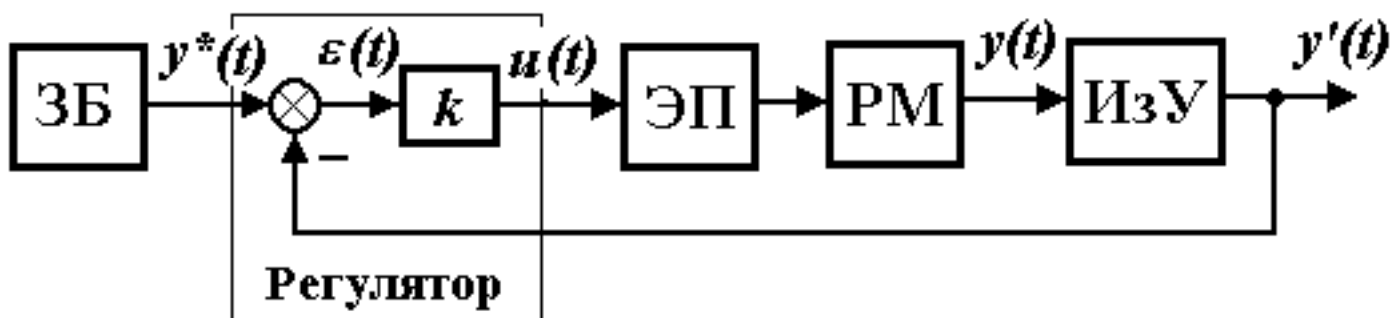


Рис. 1.12. Структурная схема системы управления положением

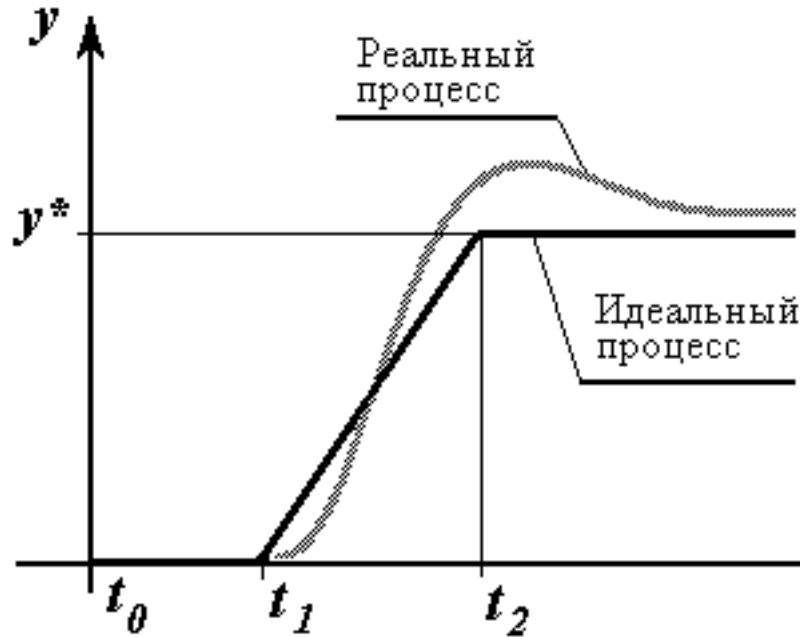


Рис. 1.13.

В переходном процессе можно выделить три этапа. В начале работы системы (от момента времени t_0 до момента t_1) предполагается, что задающая рукоятка потенциометра $R1$ и само звено PM находятся в нулевом положении $y=0$. Так как при этом движки задающего $R1$ и измерительного $R2$ потенциометров также занимают нулевые положения: $y^*=y'=0$, то ошибка ε отсутствует, управляющий сигнал $u=0$ и, поэтому электропривод находится в состоянии покоя. Второй этап - отработка задающего воздействия. В момент t_1 задающая рукоятка переводится в положение y^* , что приводит к появлению сигнала ошибки $\varepsilon = y - y'$ и пропорционального ей управляющего сигнала u . Последний после усиления приводит в движение электродвигатель и, следовательно, звено PM . В момент t_2 измерительный потенциометр $R2$ занимает положение $y'=y^*$, сигнал ошибки опять принимает нулевое значение $\varepsilon(t)=0$ и система останавливается. На третьем этапе ($t > t_2$) система обеспечивает стабилизацию звена в положении $y=y^*$.

Важно отметить, что реальное поведение системы будет отличаться от

рассмотренной идеальной ситуации. Во-первых, в силу инерционных свойств ЭП и объекта (звена РМ) возможно получение колебательного процесса и перерегулирование системы, когда в процессе движения объект сначала проходит дальше заданного положения $y=y^*$, а затем возвращается обратно. Числовые значения показателей колебательности и перерегулирования характеризуют динамические свойства системы и относятся к так называемым динамическим показателям ее качества (см. п. 1.4.1). Во-вторых, в реальных системах не обеспечивается абсолютная точность решения задачи управления - по окончании переходного процесса (т.е. в установившемся режиме) положение РМ реальной системы будет отличаться от задания y^* на величину установившейся ошибки ε у. Динамические и точностные показатели системы могут быть существенно улучшены с помощью достаточно совершенного алгоритма управления (регулятора).

Для обеспечения более плавного перемещения звена механизма в заданную точку часто используется режим слежения, в котором используется переменное задающее воздействие $y^*(t)$. Такой режим требует использования более сложного задающего блока - программно или аппаратно реализованного генератора.

Для измерения механических переменных кроме простейших датчиков перемещения могут использоваться и другие измерительные устройства и сенсорные системы (тахогенераторы, оптические датчики перемещений, дальномеры и системы технического зрения).

Задача рассматриваемой системы управления заключается в таком перемещении звена, при котором его текущее положение отслеживает заданный закон, или $y=y(t)$, т.е. относится к классу задач слежения.

Пример 1.3. Система управления многозвенным манипуляционным роботом (рис. 1.14). Здесь в качестве ЗБ используются различного рода задающие генераторы, а измерительные устройства содержат различные сенсоры и средства вычислительной техники, предназначенные для первичной обработки полученной информации. Выходными переменными системы являются декартовы координаты схвата y_1, y_2, y_3 , изменение которых происходит в результате поворотов звеньев на углы α_j . Задачи системы - перемещение робота в заданную точку, движение по предписанной траектории и т.д.

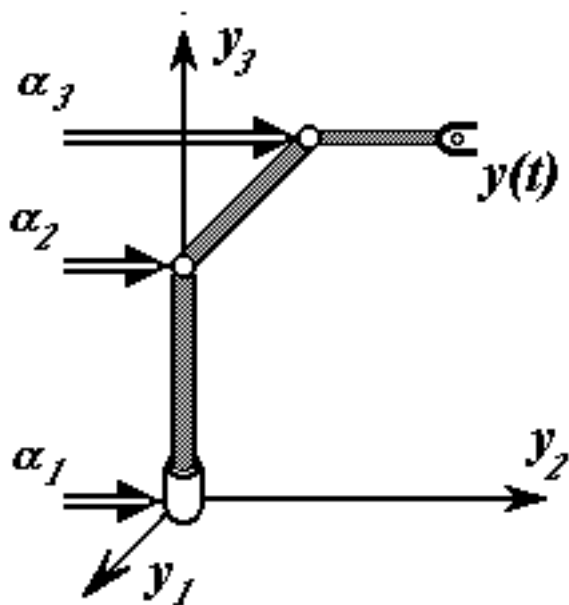


Рис. 1.14. Многозвенный манипулятор

На рис. 1.15 представлена схема системы управления движением руки - естественный аналог рассмотренной выше технической системы управления положением РМ.

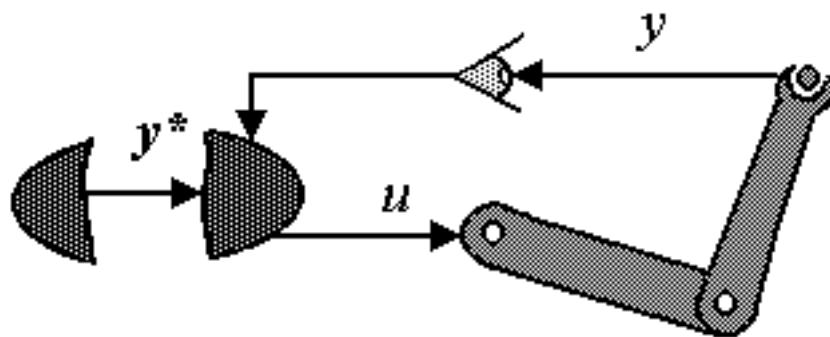


Рис. 1.15. Система управления движением руки.

1 .2.3. Укрупненная схема системы управления. Система управления может быть

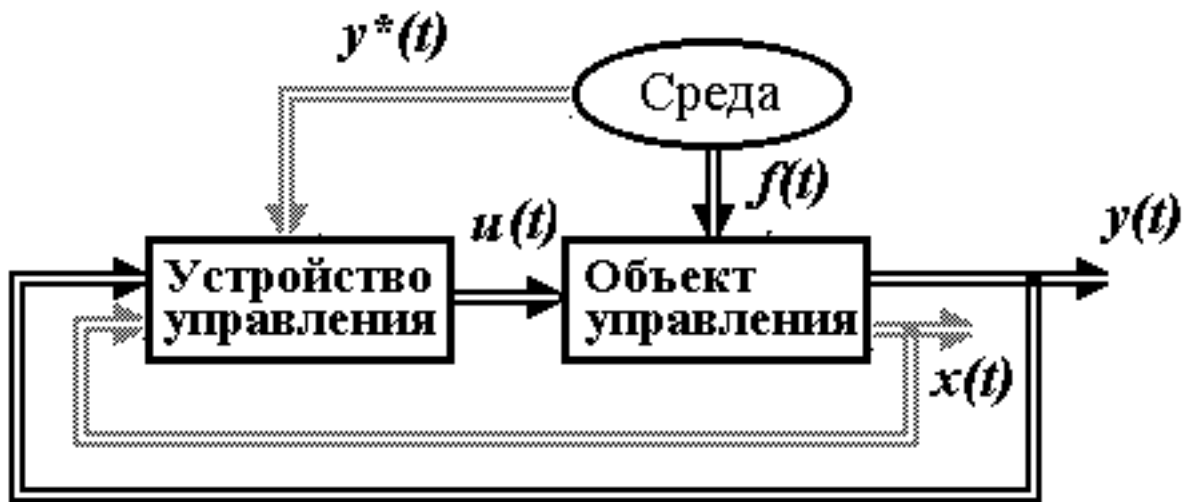


Рис. 1.16

представлена в виде двух основных блоков, взаимодействующих с внешней средой (рис. 1.16). Объект управления (ОУ) - это комплекс элементов системы, наиболее тесно связанных с физической природой управляемого процесса, т.е. собственно объект, измерительные и исполнительные устройства. Эта часть САУ обычно проектируется и комплектуется как единое целое и является ее наиболее жесткой частью. Динамические свойства ОУ (математическая модель) находятся с использованием известных физических законов.

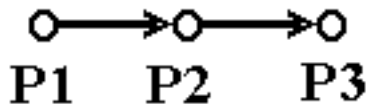
Устройство управления (УУ) - блок, выполняющий вычислительные функции, слабо связанные с физической природой ОУ. Алгоритм его работы зависит от динамических свойств управляемого процесса и задач, решаемых системой управления. Аппаратно современные УУ представляют собой универсальные или специализированные средства вычислительной техники. Их программное обеспечение составляют универсальные системные средства и специальные прикладные программы, осуществляющие расчет управляющих воздействий u . Эти устройства легко приспосабливаются к конкретному ОУ и задаче управления, что определяет гибкость и универсальность УУ.

Задачи управления сложными системами



Сложной системой (СС) называется система, включающая большое число взаимодействующих элементов (подсистем) и обеспечивающая решение достаточно сложной (комплексной) задачи. К таким системам относятся информационные сети (телефонные, локальные, Интернет), транспортные сети, производственные процессы, системы управления сложными (многоканальными, нелинейными, неопределенными) динамическими объектами (например, воздушными и космическими объектами).

Для сложных систем управления характерны следующие признаки:



- комплексный (составной) тип управляемого процесса (объекта), что предполагает включение в его состав нескольких взаимосвязанных более простых (элементарных) объектов O1, O2 и т.д. ;
- необходимость последовательного решения задачи управления, т.е. поочередного выполнения основных действий (режимов работы P1, P2 и т.д.) основного и / или локальных объектов;
- иерархическая структура задачи управления, т.е. подчиненность подзадач, составляющих сложную задачу.



Рис. 1.17

Принято выделять имеющие различный уровень иерархии стратегическую задачу, а также тактические и локальные задачи управления.

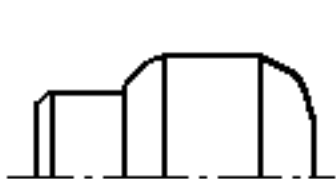
Замечание 1.7. Основным в понятиях сложной задачи и сложной системы является их структурируемость, т.е. возможность разбиения на компоненты меньшей сложности. Выбор таких компонент неоднозначен, а используемая при этом терминология (например, названия уровней иерархии) достаточно условна.

К *стратегическим задачам* управления относят задачи технологического характера: изготовления химического продукта, изделия, детали, управления полетом и проч., т.е. задачи поддержания определенной последовательности действий сложного (комплексного) объекта, в ходе чего решается некоторая задача технологического характера.

Тактическая задача - это элемент общей стратегической задачи, устанавливающий требования к поведению каждого элементарного объекта сложной системы и/или

осуществлению элементарного режима. К тактическим задачам управления относится задача управления движением рулевых устройств летательного аппарата, управления обработкой детали на станке, управления циклом химического процесса.

Пример 1.4. Тактическая задача управления обработкой детали на станке оформляется в виде технологической программы. Последняя состоит из "кадров", каждый из которых содержит закодированную информацию о типе выполняемой операции и ее параметрах (скорости движения, координаты узловых точек, виде и параметрах траекторий движения и т.д.), т.е. задание на выполнение *локальных* задач управления.

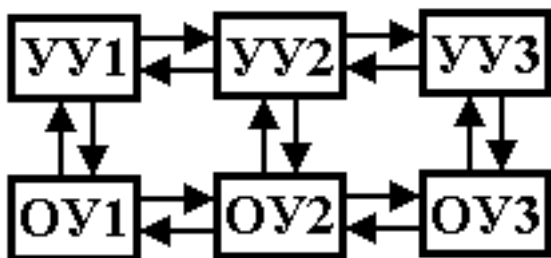


№	Операция	Параметры
1		
2		

Локальная задача - это задача изменения или поддержания состояния элементарного объекта (см. определение термина *управление*). К локальным относятся, в частности, задачи стабилизации положения или скорости, задачи слежения за внешним объектом или задающим сигналом $y^*(t)$.

Таким образом, понятие сложной задачи предусматривает возможность расчленения общей стратегической задачи на ряд более

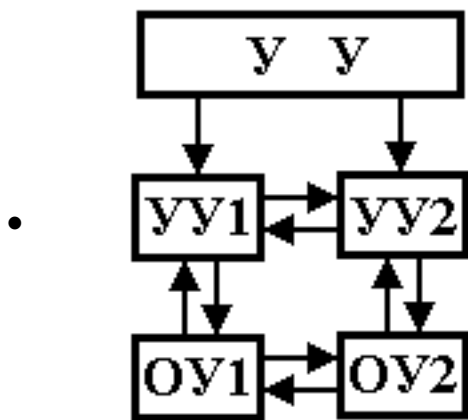
простых задач, решаемых последовательно или параллельно.



принципы управления сложной системой:

Отсюда вытекают следующие

- декомпозиция - расщепление сложной задачи и сложного объекта на более простые компоненты (подзадачи и локальные объекты);
-
-
- децентрализация - выделение своих устройств управления или программных средств (алгоритмов), обеспечивающих решение отдельных подзадач и управление локальными объектами;



иерархическое управление - введение определенной подчиненности подзадач разного уровня сложности и соответствующей подчиненности устройств управления;

-
-
- многорежимное управление (временная декомпозиция) - последовательное переключение решаемых задач и устройств управления.

Многорежимное управление может осуществляться:

- по командам оператора ;
- по заранее установленной жесткой программе;
- методами самоорганизации, что предусматривает автоматический выбор режимов с учетом возникшей ситуации (решение предусматривает использование процедур самообучения и нечетко-логических схем управления).

Рис. 1.18 иллюстрирует схемы аппаратной и программной реализации многорежимного управления.

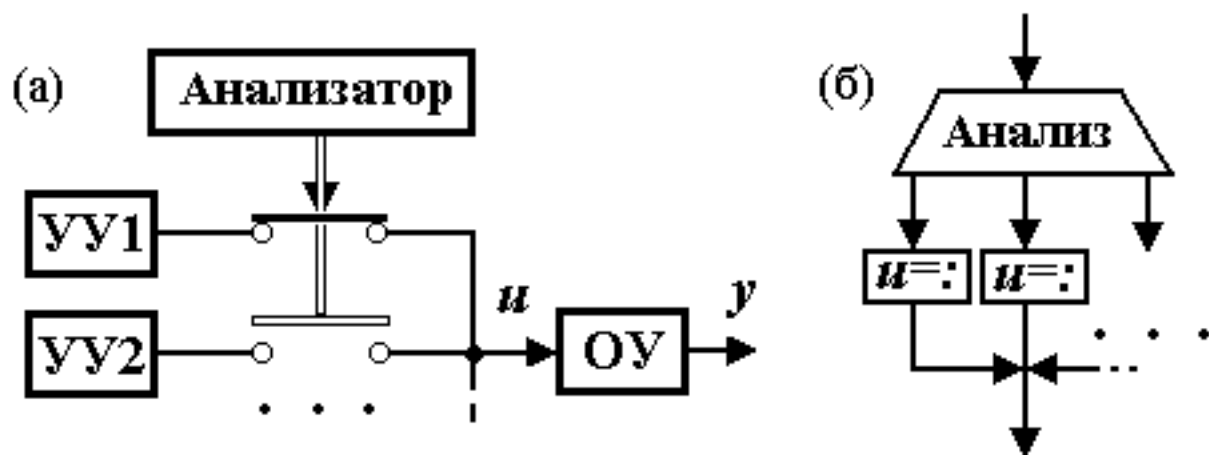


Рис. 1.18 Аппаратная (а) и программная (б) реализация многорежимного управления

Пример 1.5 .(Транспортная система.)

Система предназначена для организации автоматической транспортировки предметов (деталей, изделий и инструментов) на технологическом (производственном, торговом и т.д.) участке.

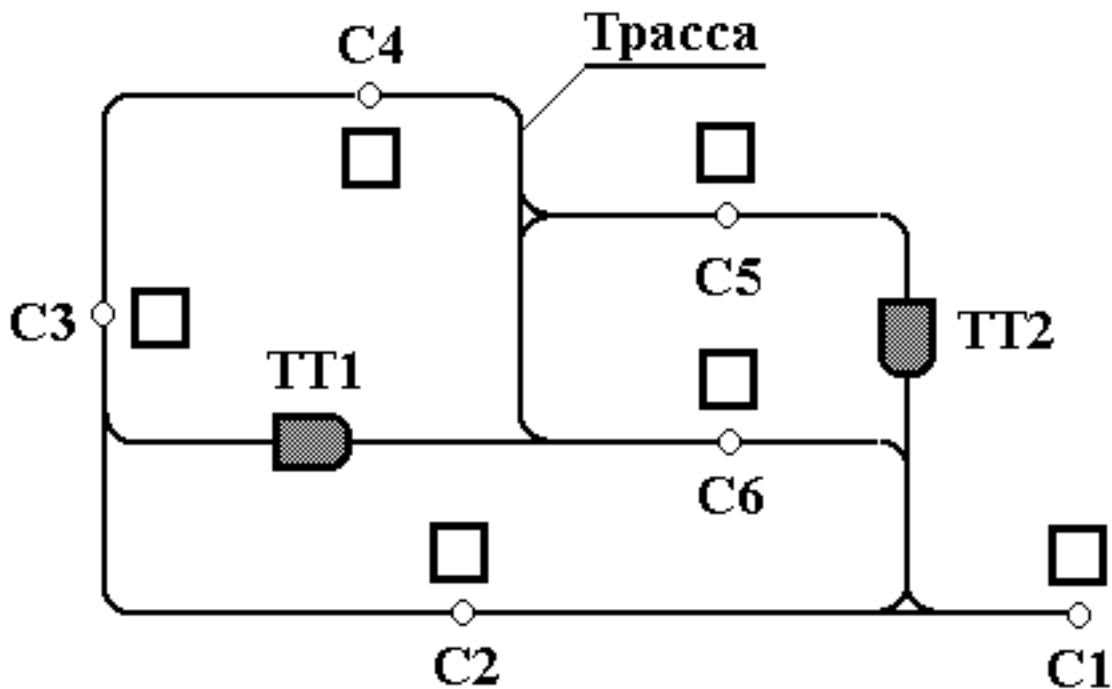


Рис. 1.19. Транспортная система

Схема системы представлена на рис. 1.19, где ТТ1 - ТТ2 - транспортные тележки, С1 - С6 - рабочие станции.

Стратегической задачей такой системы является транспортное обеспечение технологического процесса, т.е. транспортировка предметов между рабочими станциями в соответствии с текущими потребностями участка. Задача разбивается на последовательно и параллельно решаемые тактические задачи - транспортировки груза одной тележкой ТТ i от станции C_i к станции C_j . Локальные задачи, возникающие при движении тележки - это задачи типа

- поддержания заданной скорости движения ТТ;
- стабилизация заданной траектории движения;
- позиционирования (точной остановки) в заданных точках.

Локальные задачи управления и контроля

Локальные задачи управления устанавливают желаемый характер изменения переменных объекта управления. В зависимости от структуры объекта различают задачи одноканального и многоканального управления (рис. 1.20).

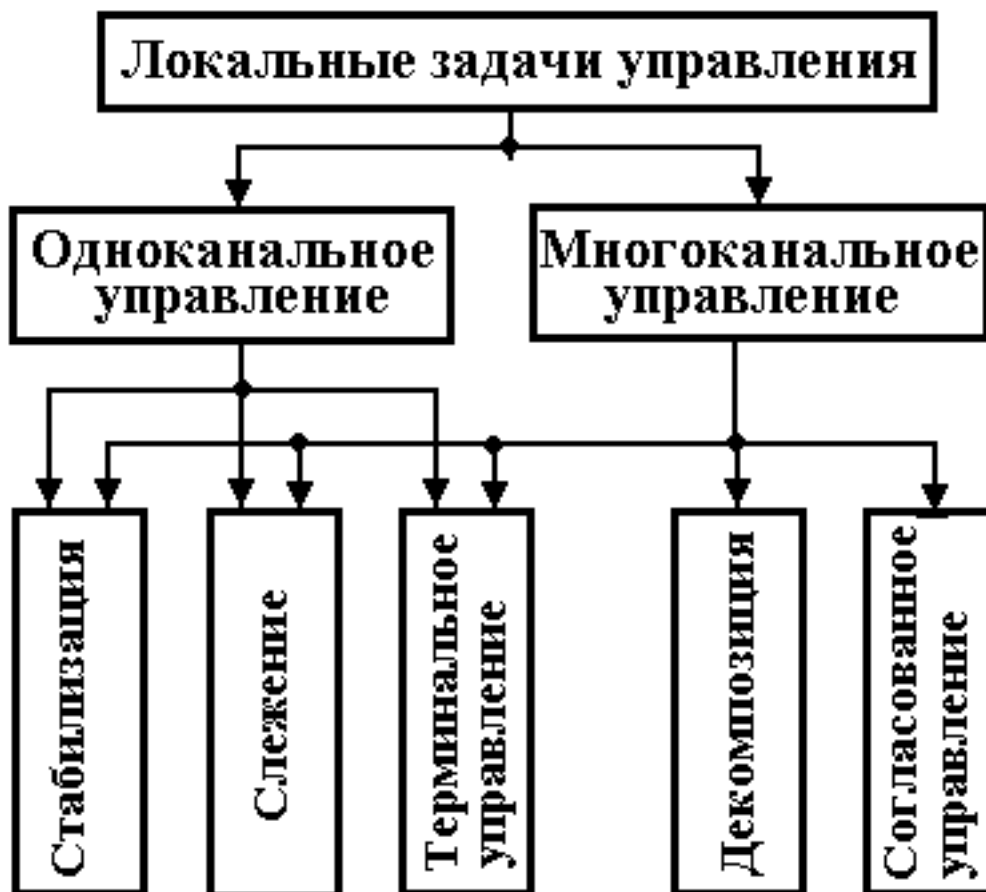
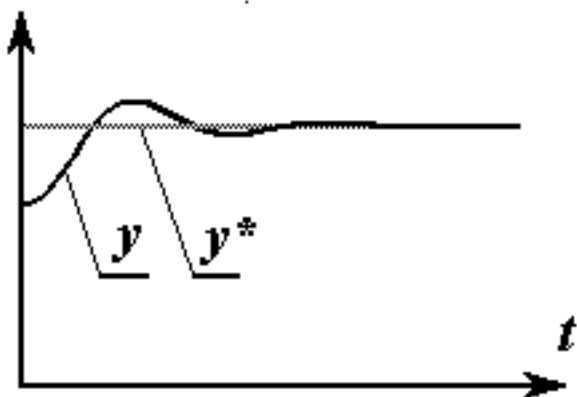
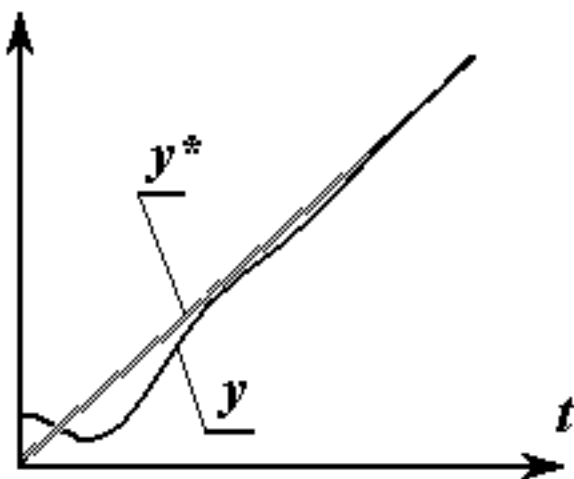


Рис. 1.20



1.4.1. Одноканальное управление и понятие качества системы. В одноканальных задачах управления, к которым относятся задачи стабилизации, слежения и терминального управления, выходная переменная $y(t)$ является скалярной функцией времени.

Задача стабилизации, или регулирования, формулируется как задача поддержание выходной переменной на заданном уровне y^*
 $y = y^* = \text{const.}$

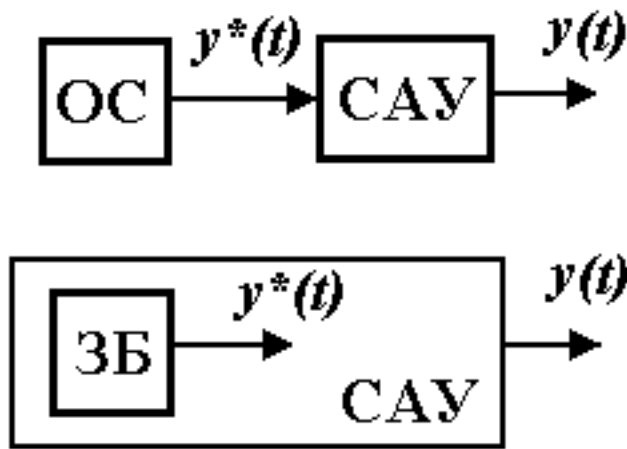


Задача слежения - это задача соблюдения заданного закона $y^*(t)$ изменения переменной y , т.е.

$$y = y^*(t).$$

При этом различают:

- задачи слежения за внешним объектом (*объектом слежения* - ОС), когда функция $y^*(t)$ является выходом ОС и заранее неизвестна;
- задачи программного управления, в которых программа движения $y^*(t)$



генерируется специальным задающим блоком, входящим в состав устройства управления САУ.

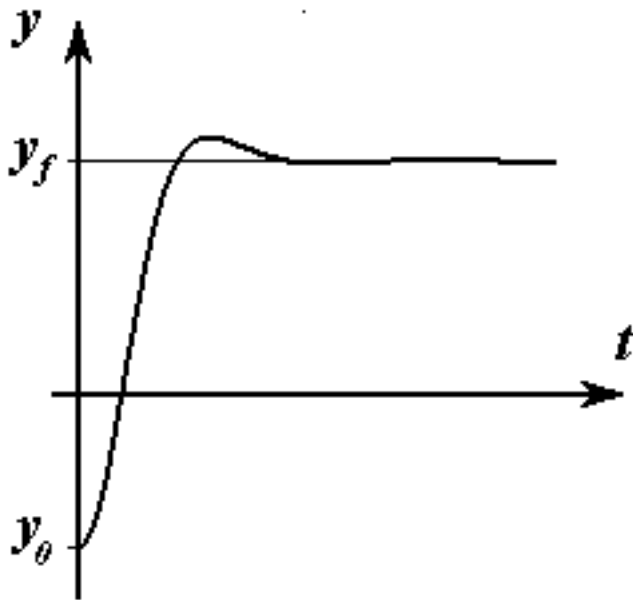
Система автоматического управления, решающая задачи слежения называется *следящей системой*. Сигнал $y^*(t)$, определяющий требуемый закон движения, системы называется *задающим воздействием*. Сигнал

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t),$$

характеризующий текущее значение отклонения выходной переменной от задающего воздействия называется *рассогласованием*, *ошибкой*, или *отклонением*.

При этом значение $\varepsilon_0 = \varepsilon(0) = y^*(0) - y(0)$ - начальное рассогласование системы. Тогда задачи стабилизации и слежения иначе могут быть сформулированы как задачи

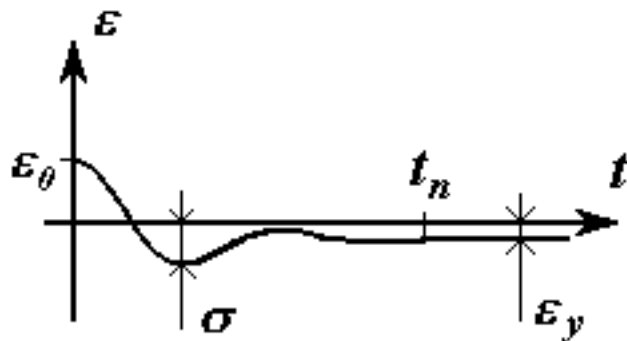
поддержания нулевого значения рассогласования, т.е. $\varepsilon(t) = 0$.



Задача терминального управления заключается в "перемещении" объекта управления в заданную (обычно удаленную) конечную (терминальную) точку y_f :

$$y \rightarrow y_f.$$

Основная особенность терминальной задачи, отличающая ее от задачи стабилизации, заключается в том, что величина начального отклонения $\varepsilon_0 = y_0 - y_f$ достаточно велика. Это обуславливает необходимость выбора особой стратегии управления (минимизации быстродействия или энергетических затрат, необходимости соблюдения ограничений на управляющие сигналы и переменные состояния и т.д.).



Полное устранение рассогласования ε в реальных системах не достигается, причиной чему служат ненулевые начальные значения $\varepsilon(0)$, быстрые изменения задающих воздействий $y(t)$, а также влияние возмущающих воздействий $f(t)$. Для оценки эффективности решения задач управления вводятся так называемые показатели качества управления. Различают динамические показатели, определяющие качество переходного режима работы системы, к которым относятся количественные (численные) оценки быстродействия и колебательности системы, и точностные показатели, определяющие погрешность системы в установившемся режиме, т.е. по окончании переходного процесса. К динамическим показателям относится время переходного процесса t_n и перерегулирование σ , а к точностным - абсолютная погрешность стабилизации или слежения

$$\varepsilon_y^{\tau} = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t)$$

1.4.2. Многоканальное управление. В многоканальных задачах управления выходом объекта служит векторная переменная (вектор выхода) $y = y(t) = \{y_j(t)\}$ и, следовательно, векторными переменными являются также задающее воздействие (вектор задания) $y^* = y^*(t) = \{y_j^*(t)\}$ и рассогласование (вектор ошибок) $\varepsilon = \varepsilon(t) = \{\varepsilon_j(t)\}$. Формулировка основных задач многоканального управления (стабилизации, слежения и терминального управления) практически не отличается от приведенной выше. Кроме них для многоканальных объектов возникает ряд специфических задач, среди которых выделим задачи декомпозиции и согласованного управления.

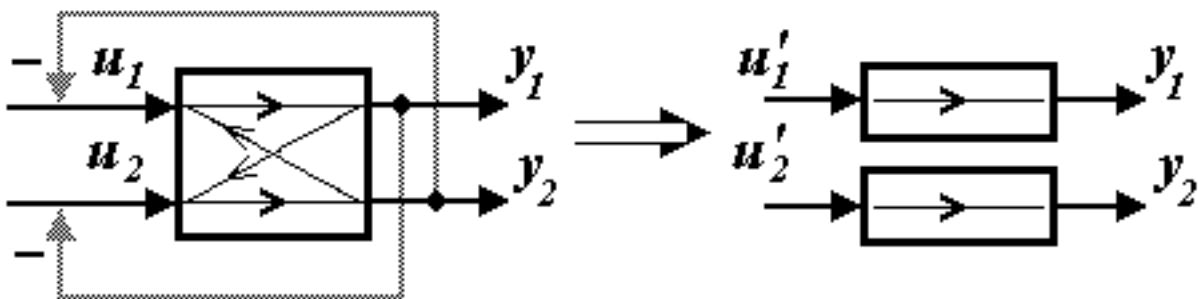


Рис. 1.21. Декомпозиция многоканальной системы

Задача декомпозиции заключается в устранении взаимного влияния каналов системы с целью сведения задачи управления многосвязным объектом к нескольким более простым одноканальным задачам. Решение задачи предусматривает создание дополнительных (искусственных) перекрестных связей между каналами системы, которые компенсируют нежелательное действие внутренних связей объекта управления (рис. 1.21). Это достигается с помощью соответствующих алгоритмов управления, т.е. выбора управляющих воздействий u_j .

Задача согласованного управления наоборот предусматривает организацию принудительного взаимодействия каналов с целью поддержания заданных функциональных соотношений (условий согласования) выходных переменных $y_j(t)$ вида:

$$(1.8) \quad \Psi(y_1, y_2, \dots, y_m) = 0,$$

где Ψ - заданная функция размерности $m-1$. Решение также требует введения искусственных перекрестных связей (рис. 1.22), т.е. координации управляющих воздействий u_j .

Рис. 1.22. Согласование выходных переменных

Наиболее очевидные задачи терминального и согласованного управления возникают при управлении пространственным движением многосвязных механических объектов (роботов, станочных механизмов, транспортных средств). Здесь в качестве выходных переменных системы обычно выступают декартовы координаты y_j рабочей точки механизма в трехмерном физическом пространстве R^3 или R^2 , а задача перемещения рабочей точки механизма из начального положения $y_0 = \{y_{j0}\}$ в точку $y_f = \{y_{jf}\}$ относится к многоканальным терминальным задачам. Если при этом возникает необходимость следования определенной траектории движения S , то возникает задача согласования выходных переменных, в которой условия согласования (1.8) это не что иное, как уравнение S в физическом пространстве.

Пример 1.6. Так называемое контурное движение свата простейшего робота-манипулятора в плоскости R2 осуществляется по отрезкам прямых и окружностей, заданной в виде

(1.9)

$$c_1 y_1 + c_2 y_2 + c = 0$$

или

(1.10)

соответственно. Эти уравнения и определяют условия согласования выходных переменных рассматриваемой многоканальной системы.

1.4.3. Задачи контроля. Вспомогательные задачи определения (идентификации) неизмеряемых переменных и неизвестных параметров системы относятся к задачам автоматического контроля. Это:

- *задача наблюдения*, т.е. оценивание неизмеряемых переменных состояния объекта в условиях действия шумов (фильтрация, наблюдение, предсказание, см. также п.1.1.1);
- *задача идентификации* параметров, т.е. оценивания неизвестных параметров системы (массо-инерционных, электрических и термодинамических и проч.).

Блоки и алгоритмы устройства управления

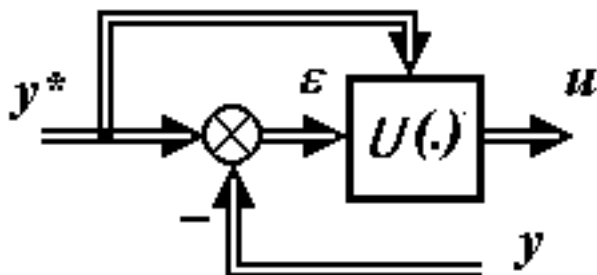
В состав устройства управления системы, предназначенной для решения локальных задач, рассмотренных в п.1.4, входят задающий блок (ЗБ) и регулятор выходных переменных (рис. 1.23).



Рис. 1.23. Многоканальная система управления

Замечание 1.8. В современных системах блоку не обязательно соответствует физическое устройство, в большинстве случаев - это алгоритм или программа расчетов требуемых переменных (сигналов), что соответствует кибернетической трактовке понятия блока (см. п. 1.1).

1.5.1. Регуляторы. Регулятором называется блок (алгоритм), рассчитывающий управляющее воздействие u с целью решения локальной задачи управления.



Алгоритмом управления называется набор аналитических выражений, используемых для расчета управляющих воздействий (термин "алгоритм" происходит от имени Ал-Хорезми и подразумевает систему операций, выполняемых по определенным правилам).

Типовой алгоритм управления по выходной переменной y имеет вид:

$$(1.11) \quad u = U(\varepsilon, y^*, \dots),$$

где рассогласование ε рассчитывается по формуле:

$$(1.12) \quad \varepsilon = y^* - y,$$

а в качестве оператора $U(\cdot)$ могут выступать как алгебраические и трансцендентные функции, так и интегро-дифференциальные операторы, операторы Лапласа, Булевы функции и т.д.

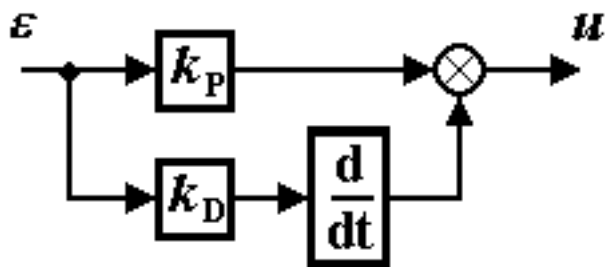
Простейшими алгоритмами управления (регуляторами) являются *регуляторы отклонения* вида:

$$(1.13) \quad u = U(\varepsilon).$$



К ним относятся: пропорциональный, или *П-регулятор*, для которого

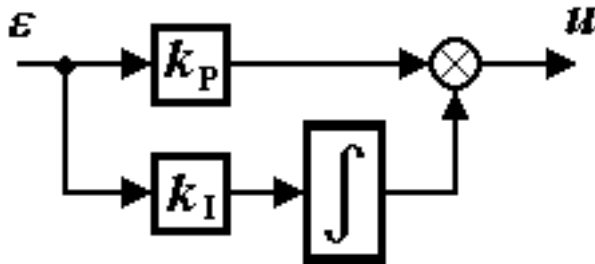
$$(1.14) \quad u = k_P \varepsilon,$$



где k_P - постоянный коэффициент ; пропорционально-дифференциальный, или *ПД-регулятор* :

$$(1.15) \quad u = k_P \varepsilon + k_D \frac{d}{dt} \varepsilon ,$$

где k_D - постоянный коэффициент ;



пропорционально-интегральный, или *ПИ-регулятор* :

$$(1.16) \quad u = k_P \varepsilon + k_I \int_0^t \varepsilon dt ,$$

где k_I - постоянный коэффициент, а также пропорционально-интегрально-дифференциальный (*ПИД-регулятор*)

$$(1.17) \quad u = k_P \varepsilon + k_D \frac{d}{dt} \varepsilon + \int_0^t \varepsilon dt .$$

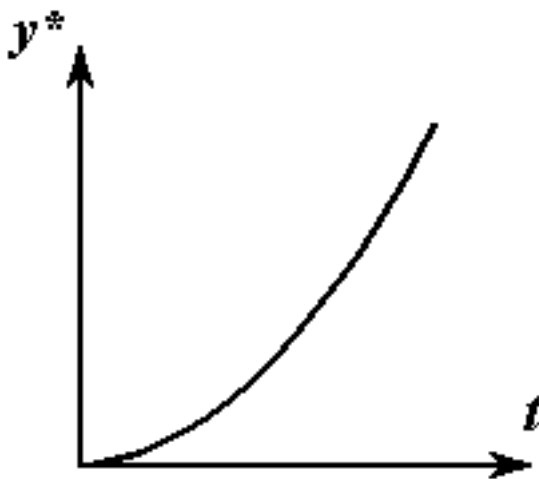
1.5.2. Задающие блоки. *Задающим блоком* называется блок (алгоритм), осуществляющий расчет задающего воздействия $y^*(t)$. В простейших случаях в качестве таких блоков выступают задающие ручки и пульта, а в более совершенных системах - аппаратно и программно реализованные *генераторы задающих сигналов*.

К простейшим задающим блокам можно отнести блоки, генерирующие сигналы для задач стабилизации, где $y^* = Y^* = \text{const}$, и элементарных задач слежения. Так для организации *движения* объекта управления с *постоянной скоростью* $\dot{y}^* = V^* = \text{const}$ используется алгоритм, описываемый дифференциальным уравнением

$$\dot{y}^* = V^*, \quad y^*(0) = Y^*,$$

обеспечивающий генерацию сигнала $y^*(t) = Y^* + V^*t$. Для движения с постоянным ускорением $\ddot{y}^* = a^* = \text{const}$ применяется алгоритм

$$\ddot{y}^* = a^*, \quad y^*(0) = Y^*, \quad \dot{y}^*(0) = V^*,$$

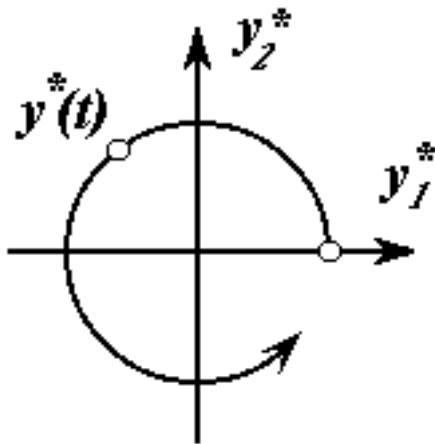


обеспечивающий генерацию сигнала $y^* = Y^* + V^*t + a^*t^2/2$ и т.д.

Более сложным задающим блоком является *интерполятор* - многоканальный задающий блок, предназначенный для расчета текущих значений согласованных задающих воздействий (см. п.1.4), т.е. сигналов $y_j^*(t)$, подчиненных функциональной зависимости:

$$(1.18) \quad \Psi(y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) = 0.$$

Выходные сигналы интерполятора используются в следящих системах, обеспечивающих решение задач согласованного управления и, в частности, траекторного управления многосвязными механическими системами, где требуемая траектория движения рабочей точки S механизма задана уравнением (1.8).



Пример 1.7. Интерpolator системы управления роботом-манипулятором, схват которого перемещается по окружности (1.10), генерирует двумерное задающее воздействие

$$y^*(t) = \{y_1^*(t), y_2^*(t)\}$$

и описывается системой дифференциальных уравнений

$$(1.19) \quad \dot{y}_1^* = y_2^*, \quad \dot{y}_2^* = -y_1^*,$$

с начальными значениями $y_1^*(0) = R, y_2^*(0) = 0$. Система имеет решение

$$(1.20) \quad y_1^* = R \cos t, \quad y_2^* = R \sin t,$$

которое удовлетворяют уравнению (1.10).

Многие современные САУ строятся как *системы управления состоянием объекта*, т.е. обеспечивают решения задач *стабилизации состояния*

$$x = x^* = \text{const}$$

или *слежения по состоянию*, т.е. соблюдение заданного закона изменения вектора состояний:

$$x = x^*(t),$$

где $x^* = \{x^*_i\}$ - вектор задающих воздействий по состоянию. Алгоритмы управления таких систем имеют вид

$$(1.21) \quad u = U(e, x^*, \dots),$$

где рассогласование e рассчитывается по формуле:

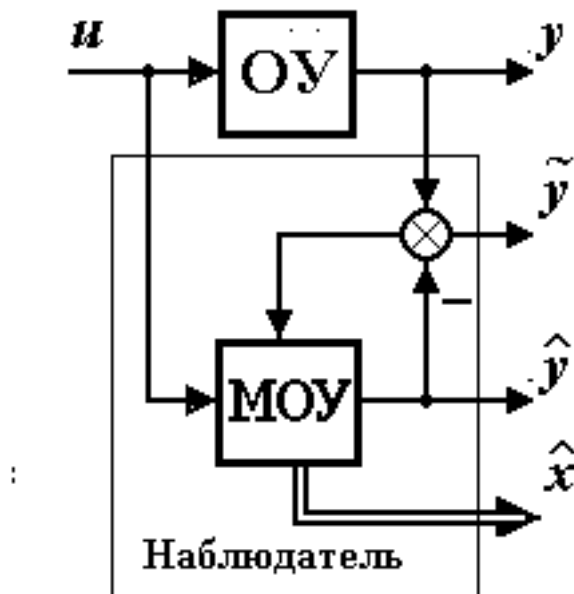
$$(1.22) \quad e = x^* - x.$$

Структура системы управления состоянием иллюстрируется рис. 1.24.



Рис. 1.24. Система управления состоянием

1.5.3. Специальные блоки систем управления и контроля. Для решения задач автоматического контроля, возникающих как в САУ, так и в системах контроля, используются наблюдатели и идентификаторы.



Наблюдателем называется блок (алгоритм), предназначенный для оценивания неизмеряемых переменных состояния $ОУ$ x_i или внешней среды. Структура наблюдателя $ОУ$ включает в себя модель объекта управления $МОУ$, которая вырабатывает текущие значения оценки $\hat{y}(t)$ выходной переменной $y(t)$ и оценки $\hat{x}(t)$ вектора состояния $x(t)$. Поведение модели корректируется за счет обратных связей по ошибке наблюдения (*невязке*)

$$\tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t)$$

Наблюдатель применяется в системах управления состоянием (рис. 1.25), в которых не все переменные состояния могут быть измерены или измерения x_i содержат значительные помехи. В этих случаях рассмотренный ранее алгоритм управления

(1.21) принимает вид

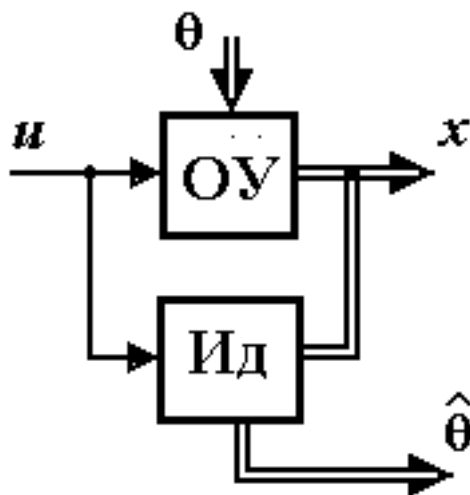
$$(1.23) \quad u = K(\hat{\theta}, x^*, \dots),$$

где оценка рассогласования $\hat{\theta}$ рассчитывается по формуле:

$$(1.24) \quad \hat{\theta} = x^* - \hat{x}.$$

Математическая модель (уравнение) объекта управления содержит коэффициенты θ_i - массо-инерционные, электрические и термодинамические параметры управляемого процесса и других используемых в САУ устройств. Параметры объединяются в вектор параметров

$$\theta = \{ \theta_i \}$$



В тех случаях когда значения параметров изменяются во времени или заранее неизвестны, появляется необходимость в использовании идентификаторов параметров. Идентификатором называется блок (алгоритм) вида

$$(1.25) \quad \hat{\theta} = \Xi(u, x, \dots),$$

где $\Xi(\cdot)$ - динамический оператор, предназначенный для оценивания параметров ОУ, т.е. расчета в реальном времени значения текущей оценки $\hat{\theta}(t)$ вектора θ по имеющейся информации о текущем состоянии $x(t)$ и входном воздействии $u(t)$ объекта.

Идентификаторы применяются в *адаптивных системах управления*, т.е. в системах, в которых параметры регулятора настраиваются в процессе работы системы. В них используются *адаптивные алгоритмы управления* вида:

$$(1.26) \quad u = U(e, x^*, \hat{\theta}, \dots),$$

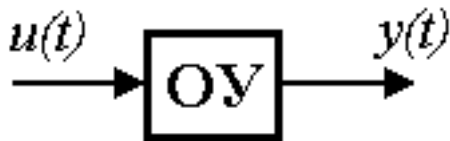
где вектор оценки $\hat{\theta}$ может быть получен с помощью алгоритма идентификации (1.25).

Линейные модели вход-выход

Математической моделью динамической системы принято называть совокупность математических символов, однозначно определяющих развитие процессов в системе, т.е. ее движение. При этом в зависимости от используемых символов различают аналитические и графоаналитические модели. *Аналитические модели* строятся с помощью буквенных символов, в то время как *графоаналитические* допускают применение графических обозначений (см. п.2.1.2).

В зависимости от типа сигналов различаются *непрерывные и дискретные* модели систем. В зависимости от используемых операторов - *линейные и нелинейные*, а также временные и частотные модели. К *временным* относятся модели, в которых аргументом является (непрерывное или дискретное) время. Это дифференциальные и разностные уравнения, записанные в явном виде или в операторной форме. *Частотные* модели предусматривают использование операторов, аргументом которых является частота соответствующего сигнала, т.е. операторы Лапласа, Фурье и т.д.

В этом разделе рассматриваются непрерывные линейные временные модели динамических систем.



Модель вход-выход (ВВ) - это описание связи входных и выходных сигналов динамической системы. Необходимость в таком описании появляется при рассмотрении поведения отдельных блоков и, в частности, объекта управления (ОУ), так и всей системы управления в целом. Различия в математическом описании блоков и системы управления не принципиальны, но требуют использования разных обозначений (см. п.1.5). Так, входным сигналом САУ является задающее воздействие $y^*(t)$, а выходным - переменная $y(t)$. При описании блоков часто используются обозначения $x_2(t)$ и $x_1(t)$, соответственно. В дальнейшем воспользуемся обозначениями, характерными для объекта управления, где входным сигналом является управляющее воздействие $u(t)$, а выходом регулируемая переменная $y(t)$.

2.1.1. Аналитические модели. Линейная модель вход-выход одноканальной динамической системы (здесь - объекта управления) может быть представлена обыкновенным дифференциальным уравнением вида:

$$[\text{M1}]$$

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^{(m)} + b_1 u^{(m-1)} + \dots + b_m u$$

где a_i, b_i - коэффициенты (параметры модели), $a_0 \neq 0, b_0 \neq 0, n - \text{порядок модели}, 0 \leq m < n$. Уравнение [M1] связывает входные сигналы $u(t)$ и их производные $u^{(i)}(t)$ с выходными сигналами $y(t)$ и их производными $y^{(i)}(t)$ на

некотором временном интервале, т.е. при $t \in [t_0, t_f)$. Значения $y(t_0) = y_0$, $\dot{y}(t_0) = \dot{y}_0$, ..., $y^{(n-1)}(t_0) = y_0^{(n-1)}$ называются *начальными значениями* (условиями), а число $r = n - m \geq 1$ - *относительной степенью* модели.

Различают *стационарные системы*, для которых значения параметров неизменны: $a_i = \text{const}$, $b_i = \text{const}$ и можно положить $t_0 = 0$, и *нестационарные модели*, где параметры являются функциями времени, т.е. $a_i = a_i(t)$, $b_i = b_i(t)$. В случае, когда $a_0 = 1$, уравнение называется *приведенным*.

Система, для которой $u(t) \equiv 0$, называется *автономной*. Описание автономной системы дается *однородным* дифференциальным уравнением вида

$$[M1a] \quad a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = 0.$$

Модель [M1] может быть переписана в операторной форме. Для этого введем в рассмотрение *операторы дифференцирования*

и положим, что

.

С учетом введенных обозначений уравнение [M1] легко преобразуется к *операторной форме*